UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

Caio Magalhães Castriotto

Elo Recíproco: um novo sistema de conexões para Estruturas Recíprocas desenvolvido por modelagem algorítmica e Fabricação Digital

CAMPINAS – SÃO PAULO
JANEIRO 2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO
PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA, TECNOLOGIA E CIDADE

TESE DE DOUTORADO

Elo Recíproco: um novo sistema de conexões para Estruturas Recíprocas desenvolvido por modelagem algorítmica e Fabricação Digital

Tese de Doutorado apresentada à banca de defesa, na Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Doutor em Arquitetura, Tecnologia e Cidade, na área de Arquitetura, Tecnologia e Cidade.

Autor: Caio Magalhães Castriotto
Orientadora: Profa. Dra. Maria Gabriela Caffarena Celani
Coorientador: Prof. Dr. Felipe Tavares da Silva

Este exemplar corresponde à versão final da tese defendida pelo aluno Caio Magalhães Castriotto e orientado pela Profa. Dra. Maria Gabriela Caffarena Celani

CAMPINAS – SÃO PAULO
JANEIRO 2023

Ficha Catalográfica

(folha deixada em branco para a inserção da ficha catalográfica após a defesa)

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO
PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA, TECNOLOGIA E CIDADE

Aluno: Caio Magalhães Castriotto

Elo Recíproco: um novo sistema de conexão para Estruturas Recíprocas desenvolvido por modelagem algorítmica e Fabricação Digital

Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Profa. Dra. Maria Gabriela Caffarena Celani
Presidente e Orientadora / Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. António Paulo Teles de Menezes Correia Leitão
Universidade Técnica de Lisboa

Profa. Dra. Andressa Carmo Pena Martinez
Universidade Federal de Viçosa / Judson University

Prof. Dr. Ruy Marcelo de Oliveira Pauletti
Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Carlito Calil Júnior
Universidade de São Paulo

A Ata da Defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno

Campinas, 16 de janeiro de 2023

Dedicatória

A minha família, amigos e professores, que acompanharam a minha jornada, que sorriram, choraram e celebraram comigo.

A todos que acreditam que a Ciência é a ferramenta que ilumina o futuro da humanidade.

E a todos que compartilham do sentimento de um mundo mais justo e recíproco.

In memoriam

Meu Pai, minhas Avós e meus Avôs.

Obrigado, isso tudo também é por e para vocês!

Agradecimentos Pessoais

Ingressei na pós-graduação assim que me formei como arquiteto e urbanista, sem saber o tamanho da aventura que estava por vir, mas com a certeza de que eu iria dar o meu melhor. Em meio a conquistas e perdas, tive a alegria de manter e fazer amizades preciosas, conheci pessoas incríveis e experienciei eventos que nunca cogitei. Por mais que tente, não existem palavras no mundo que consigam expressar a minha gratidão por tudo o que vivi, conheci e compartilhei durante esses últimos anos. Por isso, do fundo do meu coração, obrigado!

Há algumas pessoas ou grupos que preciso expressar meus agradecimentos diretamente.

Família, o suporte de vocês sempre foi importante para a minha vida. Mãe, Biboca, Thiago e Vitor, eu simplesmente não consigo imaginar um mundo sem vocês. Obrigado por cada dia, por cada momento, por absolutamente tudo!

Turma 2012 da UFV, os anos de formado se tornam poucos minutos quando reencontro cada um de vocês e isso é incrível. Obrigado por tantos momentos maravilhosos!

Companheiros de pós-graduação e de laboratório, a jornada muitas vezes se torna solitária e ter com quem conversar, reclamar e dividir as angústias foi essencial para a minha vida. Obrigado por me escutarem e por me concederem a oportunidade de escutar vocês!

Parceiros de jogos online, inclusive os que conheci na Tritons, espairecer passando raiva parece ser um dos meus hobbies favoritos. Obrigado por me aguentarem e darem risadas comigo!

Alunos que tive nesses últimos anos, agradeço a paciência e o aprendizado em conjunto. Obrigado por terem me dado a certeza de que a docência faz parte do meu ser!

Dear ones I met on the other side of the Atlantic Ocean, in a rather cold country known as Denmark, thanks for your hospitality and for sharing special moments with me. Living in Copenhagen has shown me that the world is much bigger than I thought. I hope that one day we will meet again and for that, I will use the Danish expression without proper translation: På gensyn!

Special thanks to Olga Popovic Larsen, that supervised my PhD during the period abroad, and Xan Browne, who worked with me. You both were fundamental to achieve all the results of this work and I am super grateful for that!

Terapeuta Stéfanie, minha saúde mental e física agradece, profundamente, sua presença na minha vida. Obrigado me auxiliar com minha ansiedade e com meus dilemas!

Amigos que fiz pela vida, eu preciso falar o nome de vocês (e talvez eu esqueça alguém, peço perdão desde já): Aline Gomes, Amanda Cunha, Barbara Maia, Camila Nasif, Camilla Rampini, Diana Buras, Fábio Ricci, Fe Malerba, Filipe Campos, Filipe Vidal, Gels Penha, Gi Zuquieri, Giovanni Grandi, Gui Scardini, Henrique Almeida, Íris Loche, Ju Milanez, Lari Negris, Lau Domingos, Marina Iasbik, Mateus Benevenuto, Rafa Braga, Raquel Leite, Verley Coco Jr., Victor Crisci, Yuri Kawamura. Nada seria parecido sem vocês. Obrigado, mesmo!

Gabi Celani (orientadora) e Felipe Tavares (coorientador), eu não teria chegado nem na metade do caminho sem vocês dois. Além de toda a ajuda, vocês são inspirações para mim, tanto como pesquisadores como seres humanos. Algumas palavras suas estão gravadas no meu coração. Gabi, uma vez eu fiz um comentário associando uma viagem que você teria com sucesso, e você me disse algo como "não me considero bem sucedida por causa de um reconhecimento profissional, mas porque faço o que gosto e pela família que tenho". Por muito tempo eu achava que precisava ser melhor para ter sucesso na minha vida, mas hoje reconheço que já sou bem sucedido. É só olhar o tamanho desses agradecimentos e a quantidade de pessoas maravilhosas mencionadas. Felipe, com seu "vamos em frente", sempre me sugeriu que a vida é feita de pequenos começos e que cada passo é importante, por menor que seja. O importante é sempre continuar caminhando. A vocês dois, obrigado por compartilharem tantas experiências, por indicarem caminhos para um futuro melhor e por estarem ao meu lado quando precisei. Espero ter a capacidade de transformar, de forma tão positiva, a vida dos meus futuros orientandos, da mesma forma que vocês transformaram a minha vida. Mais uma vez, reforço, muito obrigado!

Por fim, gostaria de compartilhar uma última percepção. Nas Estruturas Recíprocas, um dos temas centrais desta tese, observo uma beleza única. Avisto a materialização de frases como "um por todos e todos por um", "unidos venceremos" ou "ninguém solta a mão de ninguém". Vejo uma poesia na forma de estrutura. Em meu entendimento, a reciprocidade é uma ideia simples e, ao mesmo tempo, fundamental para a humanidade. Sem ela, nosso desenvolvimento

como sociedade provavelmente não teria sido possível. Mas, parece que alguns grupos esqueceram da sua existência em tempos recentes. Assim, para muito além das tecnicidades, as Estruturas Recíprocas podem se tornar uma forma visual, tátil e física de expressar e relembrar a importância da reciprocidade em nossas vidas.

Agradecimentos Institucionais

Agradeço o apoio garantido pela Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FECFAU) da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Agradeço a todos os professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Tecnologia e Cidade (PPG-ATC), que solucionaram problemas burocráticos, tiraram minhas dúvidas e me ensinaram tanto.

Agradeço o auxílio garantido pela Agência de Inovação da Unicamp (Inova) com o processo de patenteamento do método de geração das conexões e das conexões como um produto.

I appreciate the reception and the opportunity to do part of my PhD in the Institute of Architecture and Technology (IBT) in the Royal Danish Academy (KADK). I thank for the possibility to use all the facilities and for the availability of all the staff that helped me during my time aborad.

Agradeço pelos financiamentos concedidos nas formas de bolsa de pesquisa de doutorado direto e de bolsa de estágio de pesquisa no exterior: processo nº 2019/04043-2, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e processo nº 2019/22605-8, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), respectivamente.

RESUMO

A indústria da construção civil é uma das principais responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa, consumo de recursos naturais e geração de resíduos sólidos urbanos. Por isso, é fundamental encontrar alternativas mais sustentáveis, sendo uma delas o incentivo do uso da madeira. Porém, a compreensão sobre a materialidade pode não ser suficiente para incentivar o uso do material ou solucionar problemas complexos. Uma possibilidade para solucionar essa questão é vislumbrada na revisitação de sistemas construtivos que tirem proveito das características do material. Esse é o caso das Estruturas Recíprocas (ERs), que possibilitam a construção de grandes vãos, com uso de elementos relativamente curtos e um processo de montagem simplificado. Um dos principais desafios dessas estruturas é encontrado no mecanismo de conexão entre as partes, que pode ser a chave para solucionar as complexidades geométricas e estruturais. Assim, o objetivo desta pesquisa é a concepção do Elo Recíproco: um método algorítmico-paramétrico, que gere automaticamente diferentes arranjos de ERs em madeira, aliado à criação de um novo sistema de conexões adaptativo e imbuído da complexidade geométrica das estruturas. Para isso, a pesquisa adota o método *Design Science Research*, baseado em processos abdutivos que estimulam a criação de um **Artefato**. A fundamentação teórica foca os temas madeira como material construtivo, mudanças sobre a produção do detalhe arquitetônico e processos digitais de projeto e fabricação. Soma-se a isso uma Revisão Sistemática da Literatura sobre ERs. O desenvolvimento perseguiu a consolidação dos produtos estipulados pelo método científico, com a compreensão das principais características geométricas das ERs e as diretrizes para as conexões; a criação e o refinamento de um algoritmo, feito de forma iterativa e incremental; a geração de séries de modelos físicos e virtuais, explorando aspectos geométricos e estruturais e; a fabricação de um pequeno pavilhão, em escala 1:1, como prova de conceito. Os resultados obtidos indicam o pleno funcionamento do algoritmo, a realização do sistema de conexões Tipo Morsa e percepções iniciais sobre o comportamento e desempenho estrutural. Além disso, são feitas reflexões sobre a importância de incorporar o detalhe arquitetônico nas etapas iniciais do processo de projeto, como um mecanismo capaz de solucionar problemas antigos e novos. As principais limitações encontradas são relacionadas a formas de fabricação e a aspectos estruturais, mas são indicados caminhos possíveis para superar tais obstáculos.

Palavras-chave: Estruturas Recíprocas, Nexorade, conexões em madeira, processos digitais em arquitetura, modelagem algorítmica, fabricação digital.

ABSTRACT

The civil construction industry is one of the main responsibles for the emission of greenhouse gases, consumption of natural resources and generation of solid urban waste. Therefore, it is essential to find more sustainable alternatives, one of them being the encouragement of the use of wood. However, understanding the materiality may not be enough to encourage the material use or to solve complex problems. One possibility to solve this issue is glimpsed in revisiting building systems that take advantage of the material's characteristics. This is the case of Reciprocal Frame Structures (RFs), which allow the construction of large spans, using relatively short elements and a simplified assembly process. One of the main challenges of these structures is found in the connection mechanism between the parts, which can be the key to solve geometric and structural complexities. Thus, the goal of this research is the design of the Reciprocal Link: an algorithmic-parametric method, which automatically generates different arrangements of wooden RFs, combined with the creation of a new adaptive connection system imbued with the geometric complexity of the structures. For this, the research adopts the Design Science Research method, based on abductive processes that stimulate the creation of an **Artifact**. The theoretical foundation focuses on the themes of wood as a building material, changes in the production of architectural detailing, and digital design and manufacturing processes. Added to this is a Systematic Literature Review on RFs. The development pursued the consolidation of the products stipulated by the scientific method, with the comprehension of the main characteristics of the RFs and the guidelines for the connections; the creation and refinement of an algorithm, done in an iterative and incremental way; the generation of series of physical and virtual models, exploring geometric and structural aspects; and fabrication of a small pavilion, in a 1:1 scale, as a proof of concept. The obtained results indicate the full functionality of the algorithm, the realization of the Clamp Type connection system, and initial insights of the structural behavior and performance. Furthermore, reflections are made about the importance of incorporating the architectural detail in the early stages of the design process, as a mechanism capable of solving old and new problems. The main limitations found are related to manufacturing processes and structural aspects, but possible paths to overcome such obstacles are indicated.

Keywords: Reciprocal Frame Structures, Nexorade, wood connections, digital processes in architecture, algorithmic modelling, digital fabrication.

LISTA DE IMAGENS

Figura 1: Vista noturna do Centro Pompidou-Metz, na França, projetado por Shigeru Ban. A estrutura em madeira é completamente visível através da cobertura têxtil. 27

Figura 2: Vista do observatório no monte Rokko-Shidare, no Japão, projetado por Hiroshi Sambuichi. A ER funciona como invólucro, composta por diversos elementos irregulares de madeira. 28

Figura 3: Diagrama de Venn evidenciando o objeto de interesse desta pesquisa. 29

Figura 4: Exemplos de composições de ERs. (a) Ninho de águia; (b) Caixa de papelão fechada, com as abas se travando; (c) Facas apoiadas sobre copos; (d) Varetas dispostas no jogo de Pega-Varetas. 30

Figura 5: Exemplos de ERs na construção civil. (a) Ponte de Da Vinci e; (b) Cobertura Mandala..... 31

Figura 6: Principais temas e subtemas considerados no desenvolvimento desta tese. As Estruturas Recíprocas são consideradas como a Classe de Problemas. 33

Figura 7: Fazenda em Catuçaba, projetada pelos arquitetos Marcio Kogan, do MK27, e Lair Reis, em parceria com o engenheiro Alan Dias, do escritório Carpinteria. 42

Figura 8: Ripple Wall, estrutura localizada no Laboratório de Fabricação Digital da UNC Charlotte. 48

Figura 9: Esquemas das vigas do tipo (a) Nuki, utilizando a cunha Kusabi, com conexão no meio do pilar e (b) Nageshi, com conexão na lateral do pilar. 55

Figura 10: Detalhe da conexão entre os andares do edifício Swiss Re, em Londres. 70

Figura 11: Vista da obra Nine Bridges Country Club, projetada por Shigeru Ban. É possível notar similaridades da estrutura com o Centre Pompidou-Metz. 71

Figura 12: Diagrama de Fischer e Herr (2001) sobre as abordagens de desenvolvimento de um produto. (a) é a abordagem tradicional e (b) é a abordagem generativa. 77

Figura 13: Equipamento de corte por jato de água, exemplo de um CNC de cinco eixos. 86

Figura 14: Desenhos para fabricação de elementos do Paneum – Wunderkammer des Brotes, feito pelo escritório Design-to-Production. 93

Figura 15: Sistema estrutural conhecido como ponte de Da Vinci, baseado nos princípios das ERs e concebido por Leonardo da Vinci, no século XV. 98

Figura 16: ER Zollinger utilizada na cobertura da estação de transferência entre metrô e trem de Nørrebro, na Dinamarca. 99

Figura 17: ER Hünnebeck utilizada na cobertura da cantina da KADK, na Dinamarca..... 100

Figura 18: Representação em perspectiva das áreas de conexão de um nexor por sobreposição. 114

Figura 19: Elementos e propriedades que constituem um leque de uma estrutura recíproca, demonstrados em um leque triangular por sobreposição. 115

Figura 20: Estrutura do pavilhão Serpentine Gallery de 2005, projetado por Álvaro Siza, Eduardo Souto de Moura e Cecil Balmond. Trata-se de uma estrutura baseada no sistema Zollinger..... 118

Figura 21: Estrutura externa do observatório no monte Rokko-Shidare, no Japão. 126

Figura 22: Diagrama de desenvolvimento da pesquisa utilizando o DSR. 133

Figura 23: Diagrama evidenciando as relações entre os subprodutos que constituem o **Artefato**. 136

Figura 24: Vista do Espaço Plasma da Unicamp, com os equipamentos CNC utilizados para a produção de alguns dos **Modelos** desenvolvidos na pesquisa. Boa parte dos equipamentos nesta sala foram doações vindas do LAPAC. 142

Figura 25: Prensa Universal de Ensaios utilizada nos ensaios destrutivos das conexões 143

Figura 26: Vista da oficina de madeira da KADK com alguns equipamentos utilizados para a produção de protótipos e da prova de conceito. 151

Figura 27: Esquema da estrutura concebida por Sebastiano Serlio no século XV, conhecida como Serlio's Floor. O esquema original pode ser encontrado no primeiro livro da obra Tutte L'Opere D'Architettura Et Prospetiva, escrita por Serlio. 159

Figura 28: Os arranjos em catavento mais comuns para ERs: (a) com quatro ciclos, (b) com três ciclos e (c) com seis ciclos. 159

Figura 29: Exemplos de estruturas de células de grupos de papel de parede específicos: (a) ppg (22x); (b) cm (*x); (c) pmg (22*); (d) p2 (2222); (e) p6m (*632). 161

Figura 30: (a) Unidades de simetria que podem substituir o símbolo representativo e (b) possíveis transformações geométricas do símbolo em uma mesma célula. 162

Figura 31: Os 17 grupos de papel de parede com os símbolos de representação, utilizados para encontrar as possíveis relações simétricas de ERs (a – q). 163

Figura 32: Padrões simples de ERs encontrados nos 17 grupos de papel de paredes, com as unidades de simetria informadas (a – i). 165

Figura 33: Padrões especiais em ERs, encontrados nos 17 grupos de papel de parede, com as unidades de simetria informadas (a – b). 166

Figura 34: Esquema representativo de como é feita a ordenação dos dados em (a) Listas e (b) Árvores. 170

Figura 35: Esquemas que demonstram como é feito o processo de (a) achatamento de árvores em listas e (b) ramificação de listas em árvores. 171

Figura 36: Encapsulamento das operações realizadas pelo algoritmo nas principais operações. (a) geração dos padrões recíprocos; (b) geração dos modelos de barras; (c) geração das geometrias dos nexors e (d) geração da geometria das conexões. 173

Figura 37: Diagrama apresentando todas as operações realizadas pelo algoritmo para a geração de uma Estrutura Recíproca. São destacadas as três principais saídas do algoritmo, sendo a geração dos **Modelos** estruturais, das geometrias tridimensionais dos nexors e das geometrias tridimensionais das conexões. 175

Figura 38: Diagrama apresentando alguns dos estágios de funcionamento do algoritmo. Os números das imagens estão relacionados com as operações da figura anterior. 176

Figura 39: Tipos mais comuns de células que podem constituir uma malha poligonal. 178

Figura 40: Uso de operações de Translação e Rotação para a geração de leques de Estruturas Recíprocas, compostos por 3, 4, 5 e 6 nexors. Esses métodos podem ser aplicados a "n" nexors. 179

Figura 41: Quad-malha definida por **M_nU = 6** e **M_nV = 5**, evidenciando os valores dos índices para cada um dos eixos da malha (**M_a**) e a diferença entre os três grupos de linhas indicada por cores.. 181

Figura 42: Distribuição dos índices nas novas listas geradas para o sentido U e V. Nesse processo as linhas de canto e as limítrofes não são incorporadas. 183

Figura 43: Uso de operações de (a) Translação e (b) Rotação para a geração de leques de Estruturas Recíprocas, compostos por 3, 4, 5 e 6 nexors. Esses métodos podem ser aplicados a "n" nexors..... 184

Figura 44: Disposição da ordem dos elementos em um arranjo gerado pelo método de (a) Translação e (b) Rotação. As relações entre elementos de mesma numeração diferem para cada um dos métodos. 185

Figura 45: Exemplos de distorções em três situações diferentes: (a) com um único ângulo; (b) com um único ângulo no sentido U e outro no sentido V e; (c) todos os ângulos são diferentes. 186

Figura 46: Exemplos de ajustes em três diferentes situações: (a) um único valor no sentido U e V; (b) um valor positivo para U e um negativo para V e; (c) todos os valores são diferentes..... 187

Figura 47: Esquemas de relações entre quatro listas de linhas diferentes e as listas com a projeção dos planos correspondentes de intersecção, utilizados para gerar quatro listas de pontos. Também são obtidos os pontos das bordas neste processo. 189

Figura 48: Conexões feitas entre os pontos de intersecção para gerar as linhas que compõem os Quad-Leques de um padrão de ER..... 191

Figura 49: Exemplo de sólido gerado pela intersecção de duas (a) malhas poligonais, (b) BReps e (c) Linhas, Planos e Pontos..... 193

Figura 50: Exemplo de como são dispostos os eixos de rotação, de inclinação e pendular dos nexors, apresentando os respectivos ângulos associados, tendo como base o eixo da malha e o eixo do nexor. 195

Figura 51: Exemplo de transformação das linhas que representam os eixos dos nexors em ramificações que compõem as arestas superiores, inferiores e as linhas limítrofes. A diferença entre as raízes e as ramificações pode ser vista à esquerda. À direita é apresentado um corte esquemático, em perspectiva, da seção transversal do nexor, destacando cada um dos elementos. 196

Figura 52: Exemplo de como as linhas e planos estão relacionados dentro das ramificações, usando as linhas das arestas superiores como exemplo. 198

Figura 53: Exemplo das linhas contidas nas árvores **T_U. lfTU** e **T_V. lfTV** que compõem uma ER. Cada um dos elementos é utilizado para a obtenção das três principais saídas do algoritmo. 199

Figura 54: Exemplo de um modelo de linhas gerado pelo algoritmo, utilizado como entrada para as simulações estruturais. 200

Figura 55: Linhas que representam as conexões em um modelo de barras. (a) Foco em um leque qualquer do modelo da Figura 54 com a distinção dos três segmentos de um nexor; (b) Pontos iniciais e finais dos segmentos de um leque que integram a região de uma única conexão; (c) Elementos fictícios conectando todas as direções e; (d) Elementos fictícios conectando uma mesma direção..... 201

Figura 56: Exemplo de um modelo de nexors em BReps, utilizado para análises geométricas, para geração das conexões e para os processos de fabricação e montagem..... 202

Figura 57: Evolução dos **Modelos** físicos e virtuais desenvolvidos na pesquisa..... 208

Figura 58: Construção do Padrão de Cataventos a Partir de Pontos Polares: (a) demonstra o padrão formado a partir pela conexão dos pontos e (b) apresenta o padrão de cataventos gerado a partir da rotação dos pontos..... 210

Figura 59: Dois tipos de erros gerados pela abordagem de rotação por pontos polares. Em (a) o valor do ângulo de rotação implica na sobreposição de linhas, enquanto em (b) a sobreposição é causada pela distância dos pontos polares com relação ao centroide..... 211

Figura 60: Exemplos de aplicação do padrão de cataventos em (a) uma superfície plana e (b) uma superfície curva, utilizando o método de rotação sobre linhas..... 212

Figura 61: Superfícies do projeto desenvolvido pelo Grupo 2 durante a disciplina..... 213

Figura 62: Exemplo de um modelo de ER gerado pelo algoritmo com base na superfície do Grupo 2, durante a disciplina AU 254..... 214

Figura 63: Exemplo de uma das quatro pranchas de corte com os elementos planificados e as respectivas marcações, contidas em um arquivo DXF, para montagem do modelo do Grupo 2..... 216

Figura 64: Exemplo (a) dos nexors produzidos por corte a laser, separados pequenos grupos para facilitar a montagem e (b) estrutura parcialmente montada com os nexors. As duas imagens são relacionadas com o modelo do grupo 2..... 217

Figura 65: Exemplo do processo de montagem das estruturas, em que (a) o aluno manuseia um nexor e (b) precisa dobrar ou curvar para fazer o encaixe em um outro elemento. 221

Figura 66: Exemplo do processo de montagem das estruturas, em que (a) o aluno manuseia um nexor e (b) precisa dobrar ou curvar para fazer o encaixe em um outro elemento. 222

Figura 67: Leque da ER feita por Gheorghe e Vierlinger (2017), com o preenchimento da janela do leque com um elemento sólido. 223

Figura 68: Segmentação da linearidade dos Nexors utilizados nos **Modelos** da Série 2. 224

Figura 69: Exemplo de (a) a geometria simplificada do nexor e (b) geometria virtual de uma ER que utiliza conexões por Blocos Sólidos..... 225

Figura 70: Oito das quinze geometrias das conexões, salvas em arquivo STL, dispostas dentro da área de um retângulo de 20cm x 22cm, correspondente ao tamanho da mesa da impressora 3D. 226

Figura 71: Primeiro modelo construído com as conexões de Blocos Sólidos. Em (a) é apresentada a imagem ampliada de um único leque e (b) apresenta o modelo completo..... 227

Figura 72: Processo de simplificação de uma das superfícies do Bloco Sólido, (a) apresenta a geometria curva e (b) o preenchimento da geometria com o acabamento em um plano. 228

Figura 73: Imagens referentes à conexão de Blocos Sólidos; (a) algumas das marcações feitas nos elementos; (b) gabarito improvisado utilizado para o processo de produção e; (c) leque com as conexões entre quatro nexors. 229

Figura 74: Diagrama apresentando a evolução dos protótipos, a partir da ideia de preencher o espaço vazio dos leques para (a) a criação dos Blocos Sólidos, (b) implementação dos gabaritos, (c) redução do volume em placas, e (d) desenvolvimento da conexão Tipo Morsa..... 230

Figura 75: Imagens referentes à conexão em Placa; (a) nexors fixados no elemento central e; (b) leque completo visto de cima, com os quatro nexors. 231

Figura 76: Imagens referentes à conexão por Blocos Sólidos com Gabaritos; (a) nexors fixados no elemento central com auxílio da geometria dos gabaritos; (b) leque completo visto de cima, com os quatro nexors; (c) Leque completo com os nexors alinhados pelos gabaritos e; (d) Produção das conexões por um equipamento CNC..... 232

Figura 77: Conexão por Acoplagem, com uso de braçadeiras contráteis, similar ao sistema de compressão por morsas. 233

Figura 78: Imagens referentes à conexão Tipo Morsa; (a) nexors sendo alocados nas gavetas; (b) leque completo visto de cima, com os quatro nexors; (c) perspectiva da conexão, com destaque para parafuso e arruela; (d) Produção de uma parte da conexão por um equipamento CNC. 234

Figura 79: **Modelos** em escala reduzida dos arranjos de leques de ERs; (a) formados por Blocos Sólidos com Gabaritos e; (b) formados pelas conexões Tipo Morsa 235

Figura 80: Apresentação do sistema de conexão; (a) perspectiva explodida mostrando os principais elementos e; (b) perspectiva da placa inferior com as variáveis que a definem..... 236

Figura 81: Vistas laterais de uma conexão, variando a conexão conforme o ângulo de inclinação; (a) Maior ângulo resulta em maior espessura e (b) ângulo com aproximadamente 2,4 graus de diferença e redução de 15mm na espessura. Medidas em milímetros e ângulos em graus..... 237

Figura 82: Vistas superiores de uma conexão, mantendo o número de subdivisões e alterando o ângulo de rotação; (a) Maior ângulo resulta em maiores comprimentos laterais e (b) metade do ângulo aplicado, diminuindo o tamanho total da conexão. 238

Figura 83: Quatro configurações diferentes de ERs com a conexão Tipo Morsa (a, b, c, d), geradas pelo algoritmo. Foram alterados somente os parâmetros referentes aos números de subdivisões. 239

Figura 84: Modelo tridimensional do leque e vistas superiores dos nexors e das conexões, com as dimensões gerais em milímetros. 241

Figura 85: Modelo utilizado nas análises tridimensionais de um leque de uma ER com a conexão Tipo Morsa. A imagem contém quatro níveis de ampliação do leque, dando enfoque na metade inferior da conexão para demonstrar o refinamento da malha. 244

Figura 86: Vista da Prensa Universal, destacando a distância livre de 60 cm entre os elementos verticais da estrutura do equipamento. 245

Figura 87: Perspectiva parcialmente explodida do quadro utilizado nos ensaios mecânicos, com as medidas gerais de comprimento e largura. 246

Figura 88: Quadro inserido na Prensa Universal para ensaios mecânicos das conexões. 247

Figura 89: Estratégias de abstração das conexões em elementos fictícios, compostas por i) apenas elementos lineares e ii) combinação de elementos lineares com placas. 248

Figura 90: ERs geradas a partir de arranjos por (a) quad-malhas e (b) dia-malhas. Foram mantidos os valores de ângulos de rotação, nexors das bases e dimensões das seções transversais. 251

Figura 91: ERs avaliadas com base em dois **Modelos** gerados na disciplina AU 254; (a) modelo do grupo 2 com encaixes e (b) com elementos fictícios; (c) modelo do grupo 3 com encaixes e (d) com elementos fictícios. 251

Figura 92: Quatro configurações diferentes de ERs em **Modelos** de barras (a, b, c, d), geradas pelo algoritmo. As geometrias são baseadas nos **Modelos** geométricos do final da Série 4. 252

Figura 93: Diagrama do processo de geração das ERs utilizadas nos estudos da **Instância**. (a) geometria base; (b) ER inicial; (c) geometria de subtração e; (d) ER final. 253

Figura 94: Diagrama com as etapas de desenvolvimento do projeto da **Instância**. 254

Figura 95: Estoque de madeira C24 utilizado para produção dos Nexors: a) material encontrado em caçambas; b) segmentação das colunas e; c) estocagem das peças sobre paletes. 256

Figura 96: Processo de colagem de dois painéis de compensado de madeira para conseguir a espessura de 30 milímetros para a produção das conexões. 257

Figura 97: Nexors tipo A e B empilhados sobre um carrinho para serem transportados para a área de montagem da estrutura. 258

Figura 98: Corte dos painéis de compensado de madeira, utilizando a serra industrial disponível na oficina de carpintaria da KADK. 259

Figura 99: Diagrama de posicionamento e rotação dos gabaritos sobre as placas das conexões. 261

Figura 100: Processo de produção dos entalhes das conexões. (a) Posicionamento da tupia manual sobre um dos os gabaritos e (b) estoque de placas produzidas. 262

Figura 101: Ensaio de montagem com cinco leques pertencentes à estrutura. 263

Figura 102: Diagrama do processo de montagem da estrutura: (a) placa inferior da conexão posicionada abaixo de dois nexors já montados; (b) colocação da parte superior da conexão e fixação de outros dois nexors, utilizando as placas como guias e; (c) a conexão é pressionada e o sistema todo é travado no local. 264

Figura 103: Processo de montagem do pavilhão; (a) início da montagem com a estrutura independente e; (b) sistema de alavanca adotado com um tubo metálico 265

Figura 104: **Instância** montada com as conexões Tipo Morsa. Ao fundo está o prédio do Instituto de Arquitetura e Tecnologia da KADK. 266

Figura 105: Todos os elementos da **Instância** armazenados em um prédio da KADK 267

Figura 106: Exemplo de avisos visuais que indicam que algumas das regras estabelecidas no algoritmo não foram respeitadas. Nesse caso, os valores que definem a curvatura, o número de subdivisões e a altura da seção transversal não são compatíveis e não é possível fazer a intersecção entre os nexors. As esferas em amarelo indicam as regiões com problemas. 278

Figura 107: Ajuste do Ângulo Pendular na placa inferior de uma conexão com as mesmas medidas gerais, visando a produção por CNCs de três eixos. 280

Figura 108: Geometrias circunscritas no círculo de diâmetro 177,8mm. Exemplos de como o aumento de uma dimensão implica na diminuição de outra. 281

Figura 109: Variações da geometria das conexões conforme o número de elementos, seguindo os mesmos princípios do método de geração; (a) Três nexors; (b) quatro nexors e; (c) seis nexors. 282

Figura 110: Exemplos de conexões geradas pelo **Método**. (a) diversas geometrias distintas e (b) ampliação das placas superior e inferior e de um leque montado dessa família. 283

Figura 111: Deformações das placas das conexões. As arruelas foram inseridas nas rachaduras para facilitar a visualização. (a) Rachadura na Parede da Conexão; (b) Esmagamento causado pela pressão da arruela e; (c) Ruptura interna da conexão. 293

Figura 112: Resultado visual da distribuição das tensões de cisalhamento na Conexão Tipo Morsa simulada no Ansys. 294

Figura 113: Resultado visual dos leques simulados. (a) Padrão de deslocamento no Ansys; (b) Tensões por Von Mises do Ansys; (c) Padrão de deslocamento no Karamba3D para as conexões por barras e; (d) Distribuição de tensões pelo Karamba3D para as conexões por barras; (e) Padrão de deslocamento no Karamba3D para as conexões por placa e; (d) Distribuição de tensões pelo Karamba3D para as conexões por placa 296

Figura 114: Resultados visuais do desempenho estrutural dos arranjos feitos por (a) Quad-Malha e (b) Dia-Malha. 298

Figura 115: Resultados visuais (escala aumentada) do padrão de deformação das estruturas do (a) Grupo 2 sem conexão; (b) Grupo 2 com conexão; (c) Grupo 3 sem conexão e; (d) Grupo 3 com conexão.. 300

Figura 116: Resultados visuais das simulações realizadas no Karamba3D das quatro configurações diferentes de ERs em **Modelos** de barras (a, b, c, d), geradas pelo algoritmo. 303

Figura 117: Diagrama do processo de montagem da estrutura. (a) primeiros elementos montados sem nenhum suporte; (b) adição de paletes para regular a altura; (c) introdução do sistema de alavanca para as últimas etapas. 306

Figura 118: Remontagem da estrutura com os mesmos elementos utilizados na **Instância**, durante a exposição 70% Less CO2, em Copenhague. 307

Figura 119: Árvore Evolucionária atualizada feita por Charles Jencks (2015). Os últimos caminhos discutidos por Jencks (a partir dos anos 2000) estão destacados, sendo eles, de cima para baixo: *Iconic Building, Patterns of Ornament, Adhocist Memory, Ecological Expression, Critical Modernism* e *New Complexity Paradigm*. 310

*As Figuras usadas nas capas de cada Capítulo desta tese são do acervo pessoal do autor.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Indicadores ambientais comparando madeira, aço e concreto. Nota-se que a madeira é consideravelmente menos impactante do que os outros materiais. 41

Gráfico 2: (a) Consumo de madeira para uso industrial; (b) Distribuição de espécies em florestas plantadas; (c) Origem da madeira utilizada na construção civil e; (d) Principais usos de madeira na construção civil. 45

Gráfico 3: Número de artigos publicados por ano, separados por subcategorias. Linhas de evolução no tempo por categorias gerais. 107

Gráfico 4: Gráfico gerado a partir dos valores contidos na Tabela 2, equações obtidas a partir das linhas de tendência logarítmicas e valores de R-quadrado. 147

Gráfico 5: Valores de tensões e deformações elasto-plásticas dos nexors C24 e as conexões feitas em compensado de madeira. 243

Gráfico 6: Ensaio 1 - Valores de força e deslocamento obtidos pelo ensaio do corpo de prova e definição das curvas superior e inferior. 285

Gráfico 7: Ensaio 2 - Valores de força e deslocamento obtidos pelo ensaio do corpo de prova e definição das curvas superior e inferior. 285

Gráfico 8: Ensaio 3 - Valores de força e deslocamento obtidos pelo ensaio do corpo de prova e definição das curvas superior e inferior. 286

Gráfico 9: Ensaio 4 - Valores de força e deslocamento obtidos pelo ensaio do corpo de prova e definição das curvas superior e inferior. 286

Gráfico 10: Ensaio 5 - Valores de força e deslocamento obtidos pelo ensaio do corpo de prova e definição das curvas superior e inferior. 287

Gráfico 11: Ensaio 6 - Valores de força e deslocamento obtidos pelo ensaio do corpo de prova e definição das curvas superior e inferior. 287

Gráfico 12: Ensaio 1 – Curvas de Tendência Superior e Inferior e Curva Média de Tendência. 288

Gráfico 13: Ensaio 2 – Curvas de Tendência Superior e Inferior e Curva Média de Tendência. 288

Gráfico 14: Ensaio 3 – Curvas de Tendência Superior e Inferior e Curva Média de Tendência. 289

Gráfico 15: Ensaio 4 – Curvas de Tendência Superior e Inferior e Curva Média de Tendência. 289

Gráfico 16: Ensaio 5 – Curvas de Tendência Superior e Inferior e Curva Média de Tendência. 290

Gráfico 17: Ensaio 6 – Curvas de Tendência Superior e Inferior e Curva Média de Tendência. 290

Gráfico 18: Análise das Curvas de Tendência Médias e Média Final das Curvas de Tendência. 292

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1: Encaixes de acordo com Riley (1905), Jackson e Day (1985), Noll (2002) e Fairham (2007). Apesar de alguns tipos terem tradução para português, é comum utilizar a nomenclatura em inglês para se referir a esses tipos de conexões. Alguns exemplos são apresentados no final. 53

Quadro 2: Principais lacunas de conhecimento sobre Estruturas Recíprocas e os artigos em que elas foram encontradas ou estão relacionadas. 120

Quadro 3: Descrição do **Método** algorítmico utilizado para a geração automatizada das conexões desenvolvidas nesta tese. A apresentação das informações é acompanhada de figuras que ilustram o processo, utilizando um leque composto por quatro nexors diferentes como exemplo. 204

Quadro 4: Geometrias desenvolvidas pelos seis grupos de alunos, durante a disciplina AU 254. 218

Quadro 5: Demonstração do funcionamento e da adaptabilidade do algoritmo, com a variação dos valores de entrada e aplicação em três geometrias distintas. 271

Quadro 6: Síntese da pesquisa, relacionando os objetivos estipulados com os resultados alcançados, as principais limitações encontradas e possíveis estudos futuros para superar obstáculos que ainda são presentes. 328

Tabela 1: Condução da RSL – Síntese dos procedimentos, definição da amostra e quantidade de artigos selecionados para a extração de dados. Os números adicionados são referentes à atualização dos dados. 105

Tabela 2: Valores referentes à constante definida por Timoshenko e Goodier, dada as relações entre dimensões da seção transversal **ht** dos elementos. 146

Tabela 3: Valores dos parâmetros utilizados nos componentes "Series" do Grasshopper, com objetivo de extrair os dados corretos para gerar as listas **L_UTU** e **L_VTV**. 182

Tabela 4: Valores dos parâmetros utilizados nos componentes "Series" do Grasshopper, com objetivo de extrair os dados corretos para gerar as listas de linhas e planos de intersecção. 188

Tabela 5: Valores dos parâmetros utilizados nos componentes "Series" do Grasshopper, com objetivo de extrair os dados corretos para gerar as listas de pontos de borda. 190

Tabela 6: Tempo de processamento (em segundos) que Grasshopper demanda para realização de uma, cem e dez mil intersecções idênticas entre diferentes tipos de elementos geométricos. 194

Tabela 7: Sentido das Translações para geração das ramificações da árvore de dados e elementos geométricos relacionados com cada lista 196

Tabela 8: Materiais e valores de referência das propriedades mecânicas, utilizados para as simulações dos **Modelos** da Série Paralela. 241

Tabela 9: Valores máximos obtidos para deslocamento e tensões nos arranjos gerados a partir de uma Quad-malha e uma Dia-malha e os valores calculados de Índice de Projeto dos dois casos. 299

Tabela 10: Valores máximos obtidos para deslocamento e tensões nos arranjos gerados a partir das ERs geradas pelos Grupos 2 e 3 (AU 254), com e sem conexões e os valores calculados de Índices de Projeto. 300

Tabela 11: Valores máximos obtidos para deslocamento e tensões nos arranjos gerados para a **Instância** e os valores calculados de Índices de Projeto dos quatro casos. 302

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 25
1.1. NOÇÕES GERAIS SOBRE ESTRUTURAS RECÍPROCAS 29
1.2. JUSTIFICATIVA DO TEMA E OBJETIVOS 31
1.2.1. Implicações Gerais do Método Científico 33
1.2.2. Objetivo Geral 35
1.2.3. Objetivos Específicos 35
1.3. ESTRUTURA DA TESE 36
2. MADEIRA: UM FUTURO SUSTENTÁVEL 40
2.1. O CENÁRIO DA MADEIRA NO BRASIL 44
2.2. MADEIRA E CONSTRUÇÃO CIVIL NA ERA DIGITAL 46
2.2.1. A Indústria de madeira engenheirada no estado de São Paulo 50
2.3. SISTEMAS DE CONEXÃO EM MADEIRA 51
2.3.1. Sistemas japoneses de encaixes 54
2.4. SÍNTESE 56
3. DETALHE ARQUITETÔNICO: CHAVE PARA INOVAÇÃO 59
3.1. DETALHE NA ERA DIGITAL 62
3.1.1. Impacto das ferramentas digitais 65
3.2. NOVAS FRONTEIRAS 67
3.2.1. Materialização 71
3.3. SÍNTESE 72
4. TECNOLOGIAS DIGITAIS: UM MEIO DE AUTOMAÇÃO 76
4.1. INTELIGÊNCIA DE PROJETO 79
4.1.1. Personalização em Massa 80
4.1.2. Flexibilidade de Produção 82
4.1.3. Tolerância Zero? 84
4.2. TECNOLOGIAS CAD/CAM 85
4.2.1. Materialidade como parâmetro para fabricação 90
4.2.2. Prototipagem rápida e desenvolvimento de produtos 91
4.3. SÍNTESE 92
5. ESTRUTURAS RECÍPROCAS: CLASSE DE PROBLEMAS 96

5.1. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA E IDENTIFICAÇÃO DE PONTOS CRÍTICOS PARA PROJETO E PRODUÇÃO 97
5.2. PROCEDIMENTOS 102
5.2.1. Planejamento 102
5.2.2. Condução 105
5.3. ARTIGOS IDENTIFICADOS 106
5.3.1. Teoria 107
5.3.2. Prática 111
5.4. ANÁLISE DOS ARTIGOS 112
5.4.1. Definições 113
5.4.2. Classificações 116
5.4.3. Lacunas identificadas 119
5.5. SÍNTESE 128
6. MATERIAIS E MÉTODOS: A CIÊNCIA DO ARTIFICIAL 131
6.1. ETAPAS RELATIVAS AO PROBLEMA 134
6.1.1. Revisão geral da literatura 134
6.1.2. Revisão Sistemática da Literatura (RSL) 135
6.1.3. Ciclos incrementais de conscientização do problema 135
6.2. ETAPAS RELATIVAS AO ARTEFATO 135
6.2.1. Construto 136
6.2.2. Método 137
6.2.3. Modelos 140
6.2.4. Instância 150
6.3. ETAPAS RELATIVAS AOS RESULTADOS 152
6.3.1. Resultados de projeto e consolidação do artefato 152
6.3.2. Teoria Emergente 152
6.3.3. Conclusões 153
7. DESENVOLVIMENTO: ELO RECÍPROCO 155
7.1. CONSTRUTO: RECIPROCIDADE DE IDEIAS 157
7.1.1. Fundamentação geométrica das ERs 158
7.1.2. Princípios norteadores das conexões 167
7.2. MÉTODO: MODELAGEM ALGORÍTMICA E PARAMÉTRICA 168
7.2.1. Sistema de nomenclatura e conceitos de listas e árvores 169

7.2.2. Visão geral e parâmetros de entrada 172
7.2.3. Processo de discretização e estrutura de dados de uma malha poligonal 177
7.2.4. Operações geométricas para geração de padrões recíprocos 183
7.2.5. Ajustes das operações geométricas para o processamento do algoritmo 192
7.2.6. Saída A: Geração de modelos de barras 199
7.2.7. Saída B: Geração das geometrias dos nexors 201
7.2.8. Saída C: Geração das geometrias das conexões 203
7.3. MODELOS: ASPECTOS GEOMÉTRICOS E ESTRUTURAIS 208
7.3.1. Série 1: Modelagem do padrão em catavento 209
7.3.2. Série 2: Oficina prática com alunos de arquitetura 212
7.3.3. Série 3: Concepção das conexões por Blocos Sólidos 222
7.3.4. Série 4: Iterações do Bloco Sólido para o Tipo Morsa - Elo Recíproco 229
7.3.5. Série Paralela: modelos estruturais digitais e físicos 240
7.4. INSTÂNCIA: FACILIDADE DE FABRICAÇÃO E MONTAGEM 253
7.4.1. Reivindicação do material 255
7.4.2. Fabricação dos componentes 257
7.4.3. Montagem da estrutura 262
8. RESULTADOS: CONSOLIDAÇÃO DO ARTEFATO 269
8.1. FUNCIONAMENTO DO ALGORITMO 269
8.2. IMPACTO DAS VARIÁVEIS DAS CONEXÕES 279
8.2.1. Flexibilidade no processo de fabricação das conexões 279
8.2.2. Derivações do método de geração das conexões 282
8.3. AVALIAÇÃO EXPLORATÓRIA DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL 284
8.3.1. Ensaios físicos de desempenho estrutural das conexões 284
8.3.2. Simulações virtuais de comportamento estrutural das conexões 294
8.3.3. Simulações virtuais de comportamento estrutural global das ERs 297
8.4. INFORMAÇÕES OBTIDAS PELA FABRICAÇÃO E MONTAGEM 305
9. TEORIA EMERGENTE: REFLEXÕES 309
10. CONCLUSÕES 316
10.1. CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS 318
10.2. LIMITAÇÕES ENCONTRADAS 323
10.3. PESQUISAS FUTURAS 325
10.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS 327

REFERÊNCIAS 331
APÊNDICE I: RELATÓRIOS DE VISITAS TÉCNICAS 346
APÊNDICE II: TABELAS DE VARIÁVEIS, LISTAS E ÁRVORES UTILIZADAS NO ALGORITMO 364
APÊNDICE III: PERMISSÕES PARA REPRODUÇÃO DE ARTIGOS.....373
APÊNDICE IV: MODELO DO TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO.....378
APÊNDICE V: PROTOCOLO DO PEDIDO DE PATENTE 383
APÊNDICE VI: DADOS OBTIDOS PELOS ENSAIOS FÍSICOS DAS CONEXÕES USADOS PARA CALCULAR AS CURVAS TENDÊNCIA 386

1. INTRODUÇÃO

> *Se a dominante intelectual das vanguardas do início do século XX era a filosofia e a dominante intelectual das vanguardas do final do século XX era a teoria, então a dominante intelectual das pós-vanguardas do século XXI se tornou a inteligência.*
>
> *SPEAKS, Michael*[1].

Duas das principais questões tratadas pela Arquitetura na atualidade são a sustentabilidade e o uso de novas tecnologias computacionais (SYKES, 2010). A inteligência a que Speaks (2010) se refere na epígrafe desta página está relacionada às possibilidades de utilização de novos sistemas, processos e materiais na arquitetura, que muitas vezes podem contribuir para uma maior sustentabilidade ambiental, social e econômica. Um bom exemplo são os recentes avanços na área de ciências da madeira para o uso na construção civil. Historicamente, trata-se de um material de baixa confiabilidade e com diversas limitações, dada suas características anisotrópicas, de suscetibilidade ao fogo e de alta variabilidade de propriedades mecânicas entre espécies. Uma das consequências percebidas até os dias de hoje são os altos valores exigidos como fatores de segurança, presentes em leis e normas técnicas pelo mundo todo. Todavia, progressos sobre a ciência da madeira combinados com o uso de novos sistemas computacionais, capazes de realizar simulações avançadas e lidar com geometrias complexas, fazem com que esta seja um dos materiais com maior potencial para o desenvolvimento sustentável da construção civil no século XXI.

Desde o final da década de 1980 as preocupações globais sobre os impactos da atividade humana sobre o meio ambiente aumentam exponencialmente. Em 2015, a Organização das Nações Unidas (ONU) divulgou os dezessete Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, como parte da Agenda 2030. Tratam-se dos principais temas que devem ser trabalhados por todas as nações para a promoção de um futuro econômico, social e ambiental saudável. Nesse cenário, explorar o uso da madeira para a construção pode apresentar oportunidades importantes e

---

[1] SPEAKS, Michael. Design Intelligence. In: SYKES, A. Krista (org.) **Constructing a New Agenda:** Architectural Theory 1993 – 2009. New York: Princeton Press, 2010. p. 211. Traduzido pelo autor.

únicas. Alguns fatos bem conhecidos enfatizam isso; ela é um biomaterial proveniente de fontes renováveis (IBÁ, 2017), que tem capacidade de reduzir o efeito estufa e sua industrialização é menos prejudicial ao meio ambiente, quando comparada à maioria dos produtos sintéticos e de origem animal (GAUZIN-MULLER, 2005).

Ao mesmo tempo, processos em toda a cadeia produtiva da indústria madeireira podem tirar proveito da automação, desde a colheita até o produto final. Na construção civil, o uso da madeira pode oferecer uma oportunidade ímpar, uma vez que o material pode ser altamente beneficiado com o uso de tecnologias digitais de projeto, fabricação e montagem (DEPLAZES, 2005). A concepção de novos produtos de madeira requer uma abordagem de design que considere as demandas exclusivas de novos métodos produtivos, muitas vezes relacionados ao uso de máquinas de controle numérico computadorizado (CNC) (LANDSCHEIDT, KANS e WINROTH, 2017). Nesse sentido, o *Computer-Aided Design* (CAD) e o *Computer-Aided Manufacturing* (CAM) podem auxiliar no desenvolvimento de soluções mais viáveis e sustentáveis, com baixo desperdício, otimização para fabricação e facilidade de montagem. Dentre as principais características dessas tecnologias, destacam-se a alta precisão e personalização da produção (SOUZA e COELHO, 2003).

No entanto, o nível de automação na indústria da construção é consideravelmente diferente entre os países. No caso da indústria brasileira, há uma grande variedade de equipamentos disponíveis, mas muitas vezes não são utilizados em todo o seu potencial. Alguns dos principais desafios e obstáculos estão relacionados a aspectos jurídicos, econômicos, culturais e de informação. Em outras palavras:

> [...] a razão principal para a não incorporação da Fabricação Digital na projetação e construção de edificações no Brasil deve-se, neste momento, essencialmente à desinformação, muito mais do que a uma alegada indisponibilidade tecnológica, à falta de formação e treinamento formal no contexto do ensino de projeto de arquitetura e à falta de ligações mais próximas entre escolas de arquitetura e a indústria da construção civil. (SILVA, *et al,* 2009, p.431).

Por outro lado, algumas experiências internacionais podem dar uma ideia das possibilidades para o futuro. O vencedor do prêmio Pritzker de 2014, Shigeru Ban, pode ser um exemplo de

como explorar e combinar madeira com processos de Fabricação Digital para alcançar algo único na arquitetura, como no projeto do Centro Pompidou-Metz (Figura 1). Dentre os agentes envolvidos neste trabalho, destaca-se a participação do Design-to-Production. O escritório ajudou a definir, detalhar e orientar o processo de produção de quase 1.800 segmentos de madeira laminada colada de dupla curvatura. Apesar das críticas e dos problemas deste projeto, ele demonstra como é possível viabilizar e produzir componentes personalizados para construções complexas e que demandam soluções muito específicas (CANEPARO, 2014; CELANI e LENZ, 2014).

Figura 1: Vista noturna do Centro Pompidou-Metz, na França, projetado por Shigeru Ban. A estrutura em madeira é completamente visível através da cobertura têxtil.

Fonte: Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ARCHI_Pompidou_center_-_Metz.jpg>. Autor: Audrey ICON, 2010. Licença: CC Unrestricted. Acesso em: 27 de janeiro de 2019.

O papel desempenhado pelo Design-to-Production expressa, de certa forma, o surgimento de um novo profissional da construção civil. Oxman e Oxman (2010) sugerem que este novo agente é responsável por garantir a viabilidade econômica e de execução de um projeto, utilizando tecnologias digitais para preencher as lacunas entre os processos de projeto, fabricação e construção. Nesse cenário, uma lógica diferente de projeto pode surgir, em que a materialidade, os desempenhos estrutural e ambiental, a fabricação e a montagem se tornam questões proeminentes. Um mecanismo chave que pode levar a respostas e soluções viáveis é o detalhamento (GARCIA, 2014). Sob essa perspectiva, as próprias definições, possibilidades e funções do Detalhe Arquitetônico devem ser revisitadas (FORD, 2011).

Mesmo as considerações sobre a materialidade e o uso de processos digitais para o projeto de arquitetura podem não ser suficientes para resolver certos problemas complexos. Somando-se a isso, a exploração de sistemas construtivos que tirem proveito das propriedades dos materiais pode ser uma forma de alcançar resultados melhores e mais viáveis. Nesse sentido, uma das muitas abordagens consiste em revisitar sistemas estruturais específicos, como as Estruturas Recíprocas (ERs) (LARSEN, 2008). Um dos principais exemplos contemporâneos de aplicação deste tipo de estrutura é a envoltória do observatório do monte Rokko-Shidare (Figura 2).

Figura 2: Vista do observatório no monte Rokko-Shidare, no Japão, projetado por Hiroshi Sambuichi. A ER funciona como invólucro, composta por diversos elementos irregulares de madeira.

Fonte: Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rokko_shidare2.jpg>. Autor: KENPEI, 2012. Licença: CC 3. Acesso em: 27 de janeiro de 2019.

Recentemente, alguns arquitetos, engenheiros e pesquisadores têm demonstrado um interesse renovado por essas estruturas, dadas as possibilidades inovativas proporcionadas pelo uso de ferramentas digitais para projeto, fabricação e montagem (LARSEN, 2008; PUGNALE e SASSONE, 2014). Essas inovações muitas vezes estão ligadas à possibilidade de resolução de questões históricas graças aos avanços tecnológicos e científicos (MESNIL *et al,* 2018). De fato, o uso de Fabricação Digital e sistemas computacionais parece ser uma abordagem interessante para resolver inúmeros problemas encontrados até o início do século XXI (NABAEI e WEINAND, 2011; PUGNALE e SASSONE, 2014; KOHLHAMMER *et al,* 2014; ARAULLO e HAEUSLER, 2017).

Assim sendo, o objeto de interesse desta tese se encontra na intersecção entre o uso da madeira como material construtivo estrutural, o sistema de ERs como uma forma de emprego desse material e as tecnologias digitais como um meio de definição geométrica e de fabricação dessas estruturas e de suas conexões (Figura 3).

Figura 3: Diagrama de Venn evidenciando o objeto de interesse desta pesquisa.

Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

1.1. NOÇÕES GERAIS SOBRE ESTRUTURAS RECÍPROCAS

Estruturas Recíprocas (ERs) são um tipo muito singular de sistema estrutural. Embora seja bem conhecido entre pesquisadores que estudam estruturas espaciais, não é um tipo de sistema amplamente utilizado na construção civil. Para facilitar a compreensão do que é uma ER, uma breve explicação é apresentada nesta seção. Trata-se de um tipo de estrutura de barras, baseada no princípio de apoio mútuo entre os elementos. Isso significa que (1) cada elemento tem duas funções simultâneas e não sobrepostas, atuando como suporte para e sendo suportado por outro elemento; e (2) pelo menos três elementos diferentes são necessários para construir uma ER.

Outra característica interessante é a possibilidade de construção de grandes vãos com elementos relativamente curtos. O conceito fundamental das ERs pode ser encontrado na natureza, em ninhos de pássaros (SONG *et al,* 2013) (Figura 4a), ou em produtos artificiais, tais como: talheres equilibrados sobre copos (Figura 4b), caixas de papelão fechadas (Figura 4c) ou, até mesmo por acidente, como em um jogo de Pega-Varetas (Figura 4d).

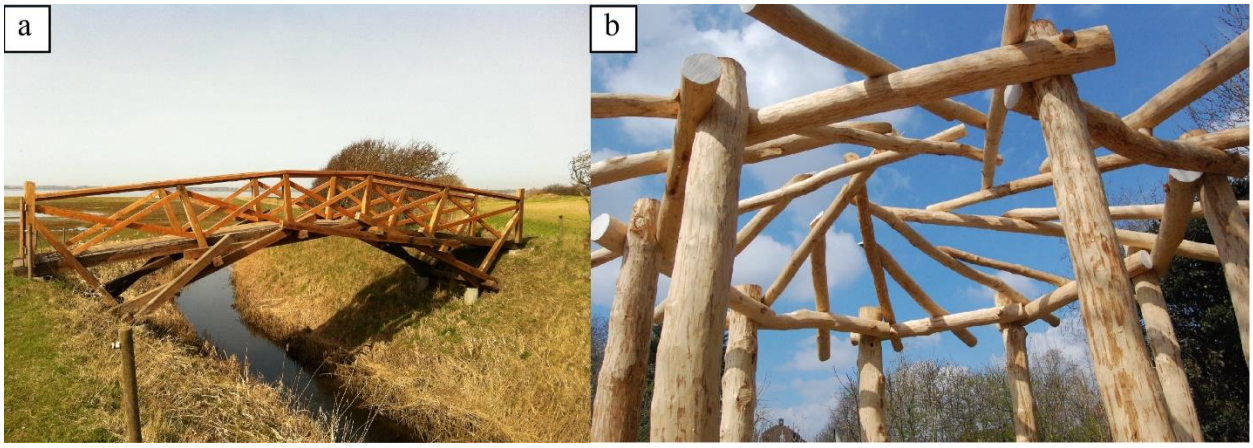
Figura 4: Exemplos de composições de ERs. (a) Ninho de águia; (b) Caixa de papelão fechada, com as abas se travando; (c) Facas apoiadas sobre copos; (d) Varetas dispostas no jogo de Pega-Varetas.

Fonte: (a) Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gfp-eagle-nest.jpg>. Autor: Yinan Chen. Licença: CC Unrestricted. Acesso em: 17 de abril de 2021.; (b), (c), (d) Acervo pessoal, 2021.

Na escala da construção civil, há uma série de diferentes tipos de ERs, encontrada em diferentes períodos da história. Esse é o caso da ponte de Da Vinci (Figura 5a), das coberturas Mandala (Figura 5b), do sistema Zollinger, do observatório no monte Rokko-Shidare, entre outros. Uma semelhança que pode ser notada nos mais distintos tipos de ERs, é o fato de, em sua grande maioria, as conexões entre os elementos são feitas por sobreposições, podendo ou não apresentar entalhes e / ou fixadores mecânicos.

Para uma compreensão mais aprofundada sobre as ERs e as oportunidades de solução de problemas utilizando modelagem algorítmica, foi conduzida uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), explicada no Capítulo 5 e no artigo publicado por Castriotto, Celani e Silva (2020). Contudo, para garantir uma visão geral inicial das ERs, são mencionadas as principais lacunas identificadas durante a RSL: 1) Complexidade ou inviabilidade de se estruturar geometrias com curvatura acentuada; 2) A altura da seção transversal dos elementos deve ser idêntica ou muito similar entre todos os elementos; 3) Conexões por sobreposição e atrito não podem ser utilizadas para estruturas permanentes devido a Normas ou Legislações; 4) Entalhes em conexões geram áreas de menor resistência no material; 5) As complexidades geométricas ficam espalhadas por todos os elementos da estrutura; 6) Dificuldade de acoplar estruturas secundárias para sistema de cobertura e/ou vedação.

Figura 5: Exemplos de ERs na construção civil. (a) Ponte de Da Vinci e; (b) Cobertura Mandala.



Fonte: (a) Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Leonardo_da_Vinci_bridge_Karby.jpg>. Autor: CN Trading. Licença: Free Art License. Acesso em: 17 de abril de 2021.; (b) Disponível em: <https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Wholewoods_reciprocal_roof_0010.jpg> Autor: Adrian Leaman. Licença: CC 4.0. Acesso em: 22 de abril de 2021.

1.2. JUSTIFICATIVA DO TEMA E OBJETIVOS

Existem duas premissas que devem ser mencionadas para compreender a relevância desta tese. Uma é ambiental, que considera a madeira como uma das alternativas mais sustentáveis para o desenvolvimento da construção civil nos anos vindouros. Outra é a potencial mudança sobre a forma de atuação de arquitetos e engenheiros, que pode ser relacionada tanto com o desenvolvimento de tecnologias digitais de projeto, fabricação e montagem, como com a

crescente demanda de soluções interdisciplinares. Nesse cenário, questões como materialidade, detalhamento e complexidade geométrica e estrutural surgem com revigorado interesse, com explorações teóricas e práticas que tentam superar obstáculos prévios e que se propõem a encontrar as limitações atuais. Mais do que isso, o detalhe como forma de expressão arquitetônica se apresenta como a manifestação de novas possibilidades e o prenúncio de mudanças inevitáveis. A discussão de todo esse cenário é apresentada por diversos autores, como Schor (1987), Deplazes (2005), Oxman e Oxman, (2010), Deamer (2010), Ford (2011) e muitos outros. Nas palavras de Chris Luebkeman, líder do Centro de Prospecção Estratégica da ETH Zurich:

> Eu sempre acreditei que, quando olho para o futuro, a primeira coisa é que as mudanças são constantes. Nós não podemos parar a mudança [...]. Eu fiquei realmente fascinado com essa questão da construção digital. Através da industrialização, era inconveniente ter detalhes ou complexidade, porque nossa missão era fazer tudo o mais uniforme possível, para ser capaz de fazer combinações. Mas, agora, nós temos complexidade de graça. Porque, quando você está imprimindo algo, não importa se é uma linha reta ou uma linha curva, do ponto de vista da máquina, do ponto de vista digital, é exatamente a mesma coisa. Então, conseguimos o detalhe de volta, o que eu acho realmente incrível [...]. Tudo se torna o que sua mente é capaz de fazer, o que você é capaz de projetar, e assim você pode combinar estrutura e função de uma forma que perdemos [...] (LUEBKEMAN, Chris. 2020. Fala transcrita do trecho 17:50 – 19:01, com cortes. Traduzida pelo autor).

Tendo como base o contexto mencionado, as ERs surgem como um ponto de convergência entre subtemas delineados nesta tese. Isso porque são estruturas beneficiadas por algumas características da madeira, principalmente pela possibilidade de construir grandes vãos com elementos relativamente curtos e leves. As ferramentas digitais podem ser utilizadas como um meio para solucionar aspectos geométricos e estruturais complexos, que são intrínsecos a essas estruturas. Há também o potencial de incorporar princípios de personalização em massa (ou de pequenas séries) para aplicação em formas não convencionais. Soma-se a isso a exploração do detalhe arquitetônico-estrutural pelo desenvolvimento de um novo sistema de conexões que permita maior versatilidade e adaptabilidade das ERs. Com isso em mente, as ERs assumem o papel de classe de problemas a ser desenvolvida nesta tese (Figura 6).

Figura 6: Principais temas e subtemas considerados no desenvolvimento desta tese. As Estruturas Recíprocas são consideradas como a Classe de Problemas.

Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

1.2.1. Implicações Gerais do Método Científico

Para a condução da pesquisa, foi adotado como método científico principal o Design Science Research (DSR), dada sua relação com processos de prototipagem, descobertas fortuitas e aumento das chances de obtenção de características inovadora. Conforme explicitado mais adiante (no Capítulo 6 desta tese) este método visa um produto final denominado como **Artefato**, que pode ser constituído por **Construto, Método, Modelo, Instância e / ou Teoria Emergente**. Para facilitar a comunicação e interpretação, bem como evitar confusões (por exemplo, entre o método científico e o **Método** do DSR), os termos referentes ao **Artefato** são escritos em negrito e com a primeira letra maiúscula.

O desenvolvimento do **Artefato** foi realizado tanto em ambiente virtual como físico, com simulações estruturais, produção de maquetes em escala reduzida, protótipos parciais e um pavilhão em escala 1:1. Os conhecimentos gerados nesta tese foram utilizados para o pedido de uma patente, produção de artigos científicos, aprofundamento de aspectos teórico-práticos das ERs e embasam discussões sobre as possibilidades atuais e futuras das ERs e da produção do detalhe em arquitetura.

É fundamental compreender uma das características desta tese que está diretamente relacionada com o método científico: a **ausência de hipóteses iniciais**. De acordo com Dresch, Lacerda e Antunes Júnior (2015), os métodos científicos tradicionais tentam lidar com problemas teóricos ou com questionamentos originados a partir da observação de fenômenos reais. Isso é feito por meio de explorações, descrições, explicações e predições. Por sua vez, o *Design Science* parte da necessidade de se projetar ou construir um determinado artefato. A principal preocupação é de prescrever e formalizar soluções. Outra diferença substancial é o fato de os métodos científicos tradicionais se basearem em métodos indutivos, dedutivos ou hipotético-dedutivos, enquanto o *Design Science* faz uso de métodos abdutivos (VAISHNAVI e KUECHLER, 2015; DRESCH, LACERDA e ANTUNES JÚNIOR, 2015).

> O método abdutivo consiste em estudar fatos e propor teorias para explicá-los. Assim, a abdução é um processo de criação de hipóteses explicativas para um determinado fenômeno / situação. Em uma fase posterior, outros métodos científicos podem ser usados para testar essas hipóteses. A abdução é considerada como um processo que é, acima de tudo, criativo. Por causa dessa característica, é o método mais indicado para a compreensão de uma situação ou problema, justamente por conta do processo criativo intrínseco a esse tipo de raciocínio. Mais do que isso, é o único método científico que possibilita a introdução de uma nova ideia (FISCHER e GREGOR, 2011). Peirce (1975) enfatizou que o raciocínio abdutivo é característico de descobertas científicas revolucionárias (DRESCH, LACERDA e ANTUNES JÚNIOR, 2015, p. 61. Traduzido pelo autor).

Além disso, a produção do conhecimento por pesquisas fundamentadas no *Design Science* também é diferente. Além de seguir todas as premissas de rigor científico, ele deve ser relevante e útil para profissionais, indústrias ou governos, superando os limites do universo acadêmico. Assim, o *Design Science* visa a concepção e desenvolvimento de um **Artefato** que serve de base para a construção de teorias e hipóteses posteriores. Conforme Dresch, Lacerda e Antunes Júnior (2015) indicam, o conhecimento gerado pelo *Design Science* não explica como as coisas são ou se comportam, mas como poderiam ser.

1.2.2. Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é a concepção de um método algorítmico-paramétrico para gerar ERs em madeira, aplicadas a múltiplas geometrias, desde formas convencionais até complexas e livres. Simultaneamente, a criação de um novo sistema de conexão, que se adapta às diferentes configurações de ERs e é gerado automaticamente pelo algoritmo, sendo o elo entre geometria e estrutura. O algoritmo e as conexões conformam o **Artefato** (de acordo com o DSR), nomeado como Elo Recíproco.

1.2.3. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta tese estão listados abaixo:

a) Realizar uma fundamentação teórica sobre os temas centrais: i) madeira; ii) detalhamento arquitetônico; iii) tecnologias digitais para projeto e fabricação e; iv) ERs;
b) Estabelecer os princípios teóricos geométricos e as implicações práticas no processo de geração de ERs e dos sistemas de conexões (**Construto**, conforme o DSR);
c) Desenvolver um algoritmo para a geração automatizada de ERs, de forma que se adaptem à diferentes geometrias de entrada – sejam simples ou de forma livre (**Método**, conforme o DSR);
d) Desenvolver um novo sistema de conexão, também gerado automaticamente pelo algoritmo, que incorporem a complexidade geométrica das ERs e facilitem o processo de fabricação e montagem (**Método**, conforme o DSR);
e) Implementar, no algoritmo, processos de simulação estrutural paramétricos, embasados em resultados obtidos por simulações estruturais mais complexas e avaliações físicas (**Modelo**, conforme o DSR);
f) Produzir **Modelos** e protótipos, em escala reduzida ou parcial, das ERs e das conexões, para auxiliar no processo de desenvolvimento iterativo e incremental, bem como nos estudos de fabricação e montagem (**Modelo**, conforme o DSR);
g) Construir um pequeno pavilhão, em escala 1:1, como prova de conceito (**Instância**, conforme o DSR);
h) Realizar um aprofundamento científico, embasado nos resultados obtidos, sobre as conquistas e limitações das soluções alcançadas (**Teoria Emergente**, conforme o DSR).

i) Discutir a importância do desenvolvimento do detalhe como um mecanismo potencial para alcançar soluções inovadoras (no sentido da palavra em inglês *novelty*, e não, necessariamente, *innovation*) na concepção arquitetônica, mais especificamente na interface com concepção estrutural (**Teoria Emergente**, conforme o DSR).
j) Generalizar os resultados obtidos e apontar pesquisas futuras.

1.3. ESTRUTURA DA TESE

Os parágrafos a seguir apresentam como esta tese está estruturada, sendo uma visão geral do que é esperado nos próximos capítulos. O Capítulo 1 se concentrou na apresentação dos principais temas desta pesquisa, contendo uma breve contextualização do problema, a classe de problemas e quais os objetivos almejados.

Os capítulos 2, 3 e 4, contemplam uma fundamentação teórica geral e podem ser lidos em paralelo. Em cada um, o assunto abordado tem certo grau de autonomia, mas são igualmente importantes em relação às ERs. Por isso, podem ser considerados "capítulos recíprocos".

O Capítulo 2 oferece uma visão geral da madeira como recurso natural e como material construtivo. Apresenta alguns dados sobre os impactos da construção civil no meio ambiente, bem como o conceito de "resíduo" na indústria madeireira. Há também uma breve apresentação das novas possibilidades advindas do uso de produtos de madeira engenheirada na construção civil. As últimas seções contêm uma explicação de quais tipos de conexões são mais comuns para estruturas de madeira.

O Capítulo 3 é referente à reflexão teórico-prática sobre a importância do detalhe arquitetônico para a produção contemporânea da arquitetura e as relações recém estabelecidas com as tecnologias digitais de projeto, fabricação e montagem.

O Capítulo 4 contém uma breve introdução sobre ferramentas e tecnologias digitais de projeto e de fabricação. Além disso, traz considerações teóricas sobre os conceitos de personalização em massa e em pequenas séries, a importância da prototipagem para o desenvolvimento de novos produtos e o conceito de tolerância zero em arquitetura.

O Capítulo 5 é referente à Revisão Sistemática da Literatura (RSL) de ERs, sendo está uma etapa fundamental do método científico adotado (DSR). Os objetivos principais deste tipo de revisão são: adquirir uma compreensão profunda de um tema específico e circundar os principais desafios e problemas relacionados com esse assunto. São explanados os principais conceitos, aspectos históricos e avanços científicos com relação às ERs.

O capítulo 6 possui uma breve explicação sobre as ciências do artificial e descreve o método Design Science Research (DSR), adotado na pesquisa. São explicitadas as etapas, os procedimentos e as ferramentas utilizadas para a o desenvolvimento desta tese.

O capítulo 7 apresenta todo o processo de desenvolvimento do Elo Recíproco. Este capítulo é dividido em seções que englobam a consolidação do **Construto**, a criação do **Método** algorítmico e do **Método** de geração das conexões, a definição e produção dos **Modelos** geométricos, de análise estrutural e de fabricação, e a construção da **Instância**, sendo esta um pavilhão em escala 1:1.

O Capítulo 8 explicita os resultados obtidos. São evidenciadas algumas das possibilidades de exploração do algoritmo, apresentando resultados dos arranjos estruturais conforme são alterados os valores das variáveis de entrada. São constatadas algumas das principais potencialidades de adaptabilidade do sistema de conexão, enfatizando a possibilidade de se utilizar diferentes sistemas de produção e de aplicar o mesmo método de geração a outros arranjos de ERs. Também são informados e comparados os dados obtidos pelas análises e simulações estruturais, indicando valores iniciais satisfatórios.

O Capítulo 9 contém a **Teoria Emergente**, como uma forma de discussão e reflexão acerca do tema detalhamento arquitetônico na Era Digital. O **Artefato** desenvolvido nesta tese (Elo Recíproco) é usado para colocar em evidência um novo paradigma da produção de arquitetura, relacionando a importância da concepção do detalhe arquitetônico nas fases iniciais do processo de projeto como uma forma de se obter soluções com potencial inovador.

O Capítulo 10 conclui a tese, relacionando os objetivos estipulados no primeiro capítulo com o que foi efetivamente alcançado. São indicadas as principais contribuições científicas desta tese, incluindo a compreensão das ERs como um tema de pesquisa relevante, avanços sobre o desenvolvimento e uso de conexões específicas para esse tipo de estrutura e como isso pode

estar relacionado com produtos potencialmente inovadores. Também são apontadas as principais limitações encontradas durante o desenvolvimento desta tese, constatando aspectos desde a revisão da literatura até a consolidação da **Instância**. Por fim, são apresentados os estudos futuros que poderão superar alguns dos obstáculos constatados nas limitações, como a importância de se fazer outros tipos de ensaios físicos nas conexões e o aprimoramento do algoritmo.

2. MADEIRA: UM FUTURO SUSTENTÁVEL

> *A madeira é a coisa mais ecológica. Aço, concreto - estamos consumindo apenas de uma quantidade limitada. A madeira é o único material renovável. Um edifício de concreto dura apenas cem anos e é muito difícil de substituir ou reparar, enquanto a madeira é muito fácil de reparar. Também é melhor. Um material tão bom.*
>
> *BAN, Shigeru*[2].

A preocupação crescente sobre a possibilidade de uma calamidade ambiental é presente em diversas (se não todas) as áreas do conhecimento, discutida por milhares de pesquisadores e remediada por alguns governos. A Conferência de Estocolmo de 1972, o Protocolo de Montreal de 1987, a ECO-92 de 1992, o Protocolo de Kyoto de 1997, a Rio+10 de 2002, a Rio+20 de 2012 e o Acordo de Paris de 2015 são apenas alguns exemplos de esforços internacionais para preservação e recuperação do meio ambiente. A preocupação com problemas ambientais fomentou, em meados do século XX, a criação dos conceitos de Reduzir, Reutilizar e Reciclar, popularmente conhecidos como os 3Rs (BALLS, 2009). Esses conceitos só foram adotados pela indústria da construção civil no final do século XX, e mais recentemente tiveram desdobramentos com o surgimento dos conceitos de *upcycling*[3] e *cradle-to-cradle* (BRAUNGART e MCDONOUGH, 2013; MCDONOUGH e BRAUNGART, 2002). Todavia, o setor da construção permanece como um dos maiores consumidores de energia e matéria-prima do mundo. Para alcançar um futuro mais sustentável, a ONU (2016) indica que a redução dos impactos sobre a saúde humana e o meio ambiente pode ser alcançada com:

1) Uso de recursos mais eficientes, que sejam (a) recicláveis; (b) renováveis, naturais ou abundantes; (c) beneficiados por processos eficientes de produção; (d) disponíveis localmente; (d) resgatados, reformados ou reprocessados; (e) reutilizáveis e; (f) embalados em conteúdos recicláveis;

---

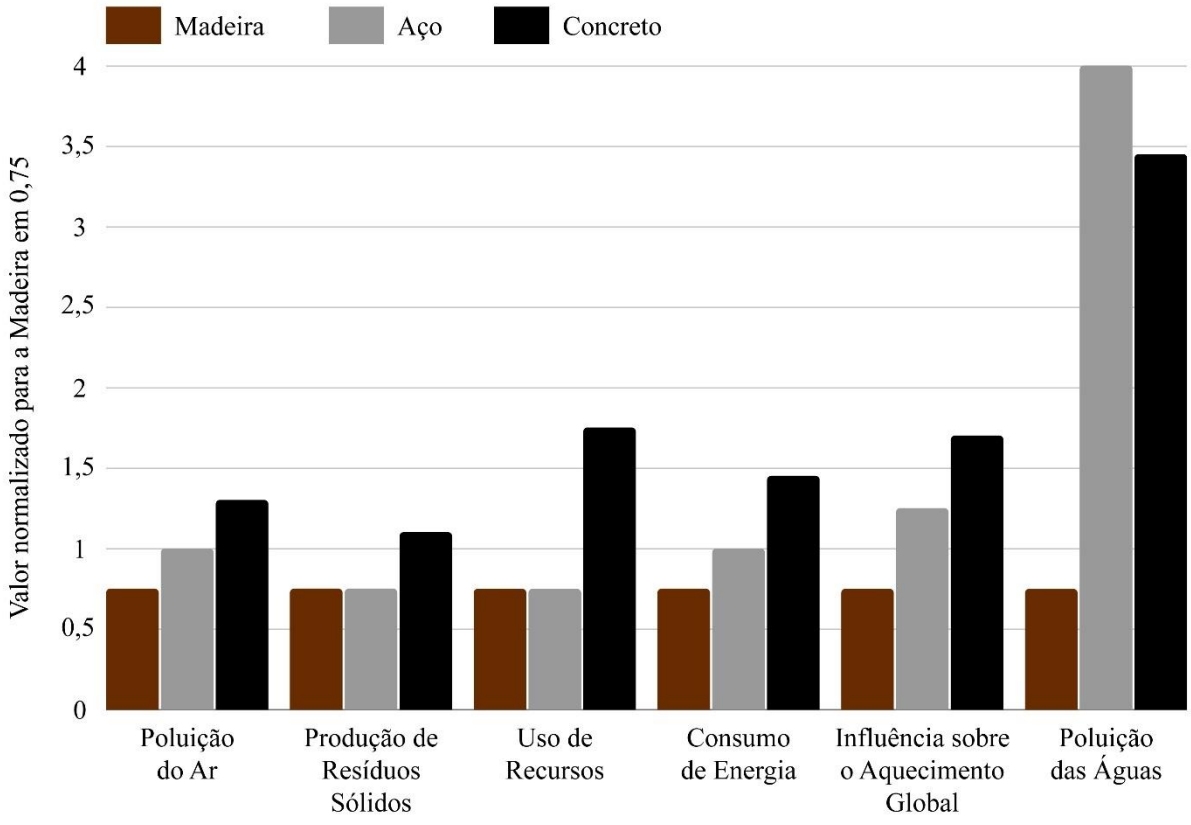
[2] BAN, Shigeru. **Paper Palaces**: interview. [11 e 18 de agosto de 2014]. New York: The New Yorker. Entrevista concedida a Dana Goodyear. Disponível em: <http://www.newyorker.com/magazine/2014/08/11/paper-palaces>. Acesso em: 22 de março de 2017. Traduzido pelo autor.

[3] *Upcycling* é a reutilização de um produto com o aumento de sua qualidade ou valor. O oposto e mais comum é o *downcycling*, que é a reutilização de um produto com perda parcial da qualidade ou valor.

2) Uso de materiais mais duráveis.
3) Uso de materiais que melhorem a qualidade do ar interno dos ambientes, com características de (a) baixa ou nenhuma toxicidade; (b) emissões químicas mínimas; (c) instalações com baixa produção de compostos orgânicos voláteis; (d) resistência à umidade; (e) manutenção saudável;

Nesse contexto, a madeira parece ser uma das melhores alternativas. Trata-se de um material com alta eficiência energética, proveniente de fontes renováveis que são capazes de reduzir o efeito estufa (GAUZIN-MÜLLER, 2005). Isso porque possui origem biológica, ao contrário do concreto e do aço. Comparando esses três materiais, a madeira possui características mais sustentáveis com relação à poluição do ar, quantidade de resíduos gerados, uso de recursos, consumo de energia, poluição das águas e potencial contra efeitos do aquecimento global (Gráfico 1). Ao mesmo tempo, a madeira também é imbuída de valores históricos e culturais (MENGES, SCHWINN e KRIEG, 2017).

Gráfico 1: Indicadores ambientais comparando madeira, aço e concreto. Nota-se que a madeira é consideravelmente menos impactante do que os outros materiais.



Fonte: ONU, 2016, p. 7. Gráfico remodelado e traduzido pelo autor, 2021.

De fato, as árvores dependem da energia solar para a realização da fotossíntese, processo no qual dióxido de carbono é absorvido e gás oxigênio é liberado. Isso faz com que as florestas (naturais e plantadas) sejam consideradas como sumidouros de carbonos e reguladores fundamentais da atmosfera terrestre (CHURKINA *et al,* 2020). Depois de colhida, a madeira pode ter diversos destinos, como por exemplo, servir de combustível ou ser usada para a produção e papel e celulose. No caso da construção civil, a madeira geralmente é utilizada de quatro formas diferentes: (1) como elementos temporários que são descartados no final da obra, aumentando a quantidade de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU); (2) como materiais de acabamento e revestimento, levando em consideração aspectos estéticos e/ou características acústicas e de conforto térmico; (3) em estruturas de telhados, o que exige certas propriedades mecânicas do material e; (4) como elementos estruturais, o que implica em cálculos mais complexos e maior responsabilidade do material. Em outras palavras, isso significa que há uma forma que resulta em desperdícios e que deve ser evitada, e outra mais sustentável, que é alcançada por construções em madeira. Para ilustrar a eficiência desse tipo de construção, pode-se mencionar a fazenda em Catuçaba (Figura 7), feita totalmente em madeira. Ela recebeu o primeiro LEED Platinum (maior nível do certificado) residencial no Brasil, premiação que reconhece os atributos de eficiência energética e sustentabilidade de uma obra.

Figura 7: Fazenda em Catuçaba, projetada pelos arquitetos Marcio Kogan, do MK27, e Lair Reis, em parceria com o engenheiro Alan Dias, do escritório Carpinteria.

Disponível em: <https://images.adsttc.com/media/images/5785/a156/e58e/ce71/6600/008e/slideshow/featured_image.jpg?1468375377>. Autor: Fernando Guerra. Licença: permissão concedida pelo autor da foto para reprodução nesta tese. Acesso em: 05 de maio de 2018.

Além disso, existem diversas oportunidades de se explorar a madeira com foco nos 3Rs (Reduzir, Reutilizar e Reciclar). De acordo com Bill Addis (2006), trata-se de um material que pode ser facilmente reaproveitado para uso interno de edificações, como em revestimentos ou mobiliário, podendo ser entendido como abordagens de *downcycling*. Por outro lado, ainda há um desafio em sua reutilização como elemento estrutural (*upcycling*) devido à necessidade de avaliar a qualidade do material. Isso depende de dois fatores principais: (1) o quão fácil é identificar e definir as propriedades, o desempenho, a condição e a qualidade do material e; (2) a necessidade e intensidade do trabalho de recondicionamento do material para melhorar suas características mecânicas, como a remoção de parafusos e pregos, por exemplo (ADDIS, 2006).

Sob uma perspectiva mais tecnológica, Molina e Calil Junior (2010) explicam que a madeira utilizada na construção civil possui características interessantes para processos industriais. As propriedades físicas do material, como sua alta trabalhabilidade e seu peso específico, são favoráveis para os processos de industrialização (ou pré-fabricação) de componentes, de transporte e de montagem no local, resultando em maior agilidade e qualidade. Cheret e Seidel (2014) indicam que os processos industriais necessários para transformar a madeira natural em material de construção consomem muito menos energia do que os utilizados na produção de aço, alumínio, concreto, plástico e tijolo. Por ser tratar de um material natural fibroso, com elevado número de cavidades, a madeira é um dos materiais que possui melhor capacidade de isolamento térmico e acústico entre os materiais estruturais mais tradicionais. Simultaneamente, algumas espécies de madeira têm maior resistência à compressão do que o concreto e, em condições semelhantes, a madeira pode permitir soluções mais leves do que o aço.

Elevados níveis de industrialização da transformação da madeira em um produto podem ser exemplificados pela indústria moveleira. Embora diversos projetos ainda sejam concebidos para serem executados por humanos, várias empresas já exploram todo o potencial da automação, desde o manuseio e corte até a montagem. Isso só é possível quando o produto é concebido e projetado com foco na produção por tecnologias digitais, incorporando as demandas e os requisitos específicos de logística, ferramentas e equipamentos que acompanham essas tecnologias (LANDSCHEIDT, KANS e WINROTH, 2017).

2.1. O CENÁRIO DA MADEIRA NO BRASIL

O Brasil não é exceção à regra, tendo o setor da construção civil como um dos mais poluentes para o meio ambiente. Dados do Governo Federal do Brasil (2005), apontam que os Resíduos da Construção Civil (RCC) geram problemas estéticos, ambientais e de saúde pública, que representam entre 50% e 70% da massa total de RSU, sobrecarregando os sistemas de limpeza pública. Além disso, Sjöström (1992) indica que o setor é o maior consumidor de recursos naturais do planeta, com estimativas que variam de 20% a 50% do total de recursos existentes.

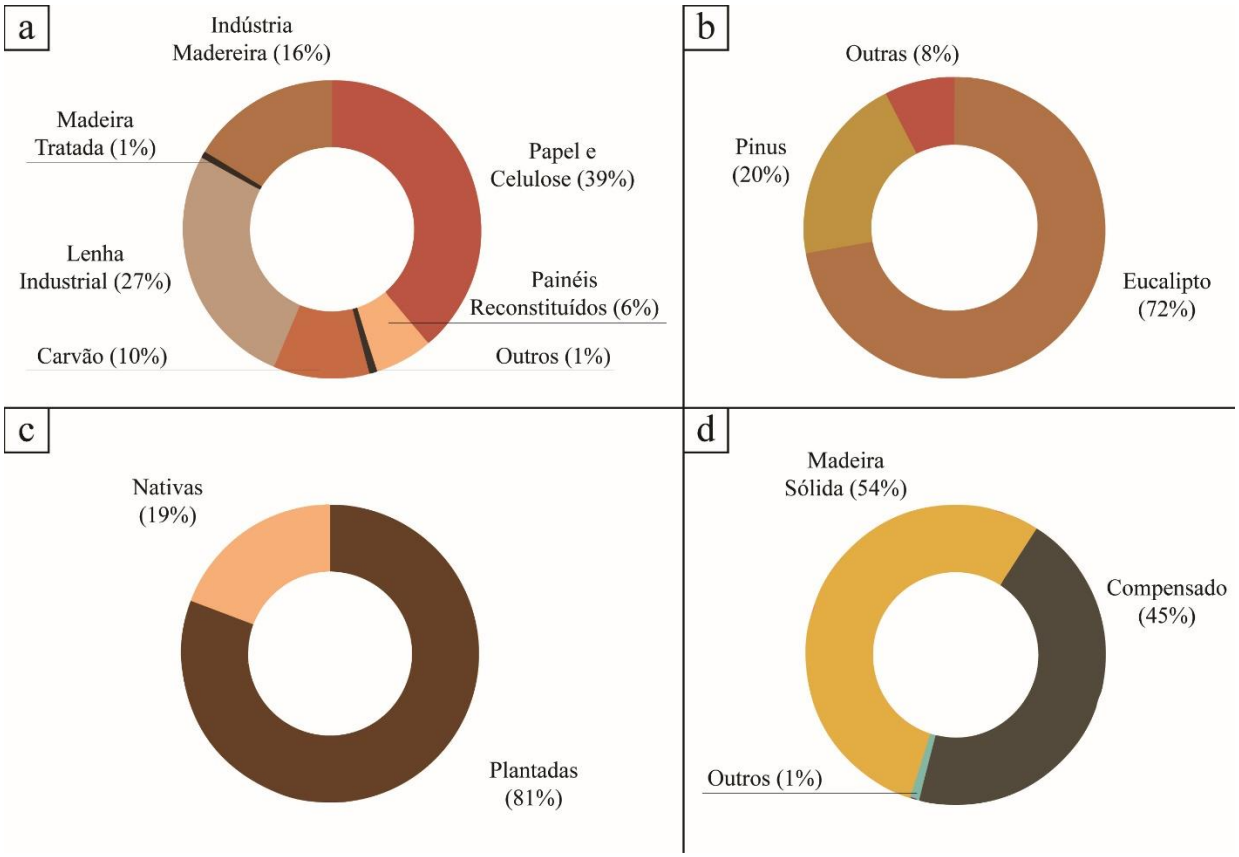
Conforme informações disponibilizadas pelo SEBRAE, SENAI e GTZ (2013), a construção civil consome, em média, entre 1 e 8 toneladas/habitante/ano de agregados naturais, e cerca de 2/3 do total de madeira natural extraída. Além disso, se o ritmo de extração for mantido, reservas de cobre e zinco se esgotariam em torno de 60 anos. Também pode ser mencionado que a forma de uso de recursos não é ideal. Como exemplo, Sobral *et al,* (2002) apontam que de toda a madeira consumida em construções verticais, 80% são utilizadas como escoramento da obra ou fôrmas de concreto, sendo descartadas no final da obra. Dos 20% restantes, uma grande parcela é utilizada em produtos beneficiados, como esquadrias, portas e pisos.

A situação expressa por esses dados não tende a melhorar em um futuro próximo. Estimativas apresentadas no relatório anual da IBÁ (2017) indicam que até 2050, a população mundial atingirá a marca de 9,1 bilhões de pessoas. Isso aumentará a demanda por fontes de materiais renováveis e de bioenergia, exigindo um adicional de 250 milhões de hectares de florestas plantadas espalhadas por todo o globo. Essas projeções colocam em pauta a discussão de como a madeira pode ser uma das poucas maneiras de resolver a sustentabilidade na construção.

O Brasil ainda tem menos de 1% do território ocupado por florestas plantadas, com um total de 7,84 milhões de hectares. Esse número representa 91% da produção de madeira para uso industrial e 6,2% do PIB do país. As florestas plantadas também contribuem para reduzir a pressão do extrativismo das florestas naturais, uma vez que produzem mais, em uma área menor e mais bem controlada e fiscalizada. Da mesma forma, ajudam a preservar a biodiversidade e contribuem com outros fenômenos naturais, como a conservação do solo, polinização, controle climático e formação de corredores naturais. Em números, isso se traduz em mais de 6 milhões de hectares de áreas naturais, incluindo Áreas de Preservação Permanente (APPs), Reservas Legais (RLs) e Reservas Particulares do Patrimônio Natural (RPPNs) (IBÁ, 2017).

Para assegurar a legalidade da madeira, um dos principais instrumentos utilizados para regulamentar e gerenciar o balanço entre preservação e extração é a concessão de Certificações de Manejo Florestal[4], atualmente garantidas a 5,4 milhões de hectares do total plantado. Os gráficos 2a e 2b apresentam as formas de consumo e as espécies das árvores nas florestas plantadas em 2016, enquanto os gráficos 2c e 2d estão relacionados com a origem e o uso da madeira na construção civil, em 2011.

Gráfico 2: (a) Consumo de madeira para uso industrial; (b) Distribuição de espécies em florestas plantadas; (c) Origem da madeira utilizada na construção civil e; (d) Principais usos de madeira na construção civil.



Fonte: Gráficos elaborados pelo autor, 2018. Dados disponibilizados pela IBÁ (2017).

[4] No Brasil, as principais organizações que emitem essas certificações são o Conselho Brasileiro de Manejo Florestal (FSC) e a Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes (PEFC), representada no país pela Cerflor.

2.2. MADEIRA E CONSTRUÇÃO CIVIL NA ERA DIGITAL

Devido às grandes variações e irregularidades naturais, a madeira apresenta características mecânicas heterogêneas, anisotrópicas, hierárquicas e complexas. Durante séculos, essas variáveis implicaram em dificuldades de cálculo e de precisão sobre o comportamento do material. Nesse sentido, tecnologias digitais foram desenvolvidas com o objetivo de se obter melhor compreensão sobre as propriedades e comportamentos complexos da madeira. As informações obtidas podem, então, ser utilizadas como estratégias e vantagens no processo de projeto, de forma mais precisa, detalhada e confiável (MENGES, 2012).

Os avanços tecnológicos sobre a ciência da madeira se traduzem, em geral, em duas abordagens de uso do material. Um tem por objetivo se apropriar da anatomia e da geometria dos troncos das árvores como elementos definidores da forma e da lógica construtiva, considerando características como direcionalidade, anisotropia e heterogeneidade. O outro visa a transformação da madeira em produtos homogêneos, isotrópicos, com uma ou duas direções predominantes, mas que ainda preservam algumas das principais características do material; estes são conhecidos como produtos de madeira de engenheirada (MENGES, SCHWINN e KRIEG, 2017).

Leonard Guss (1995) sugere que o termo madeira engenheirada se tornou muito abrangente, mas em sua compreensão, é referente a qualquer produto estrutural provido por processos industriais sobre o material. Alguns dos exemplos mais conhecidos são: Madeira Compensada, Madeira Microlaminada (LVL), Madeira Laminada Colada (Glulam ou MLC), Madeira Laminada Pregada (NLT), Madeira Laminada Cruzada (CLT) e Chapa de Tiras de Madeira Orientadas (OSB). Alguns desses produtos são conhecidos há décadas, principalmente a MLC, utilizada desde o século XIX. Porém, foi apenas na década de 1940 que passou a ser um produto efetivamente viável, em decorrência dos avanços tecnológicos acerca de fixadores químicos. Já a CLT foi utilizada pela primeira vez em uma residência, em 1993. De fato, esses produtos só tiveram ampla difusão e aplicação na construção civil a partir do século XXI.

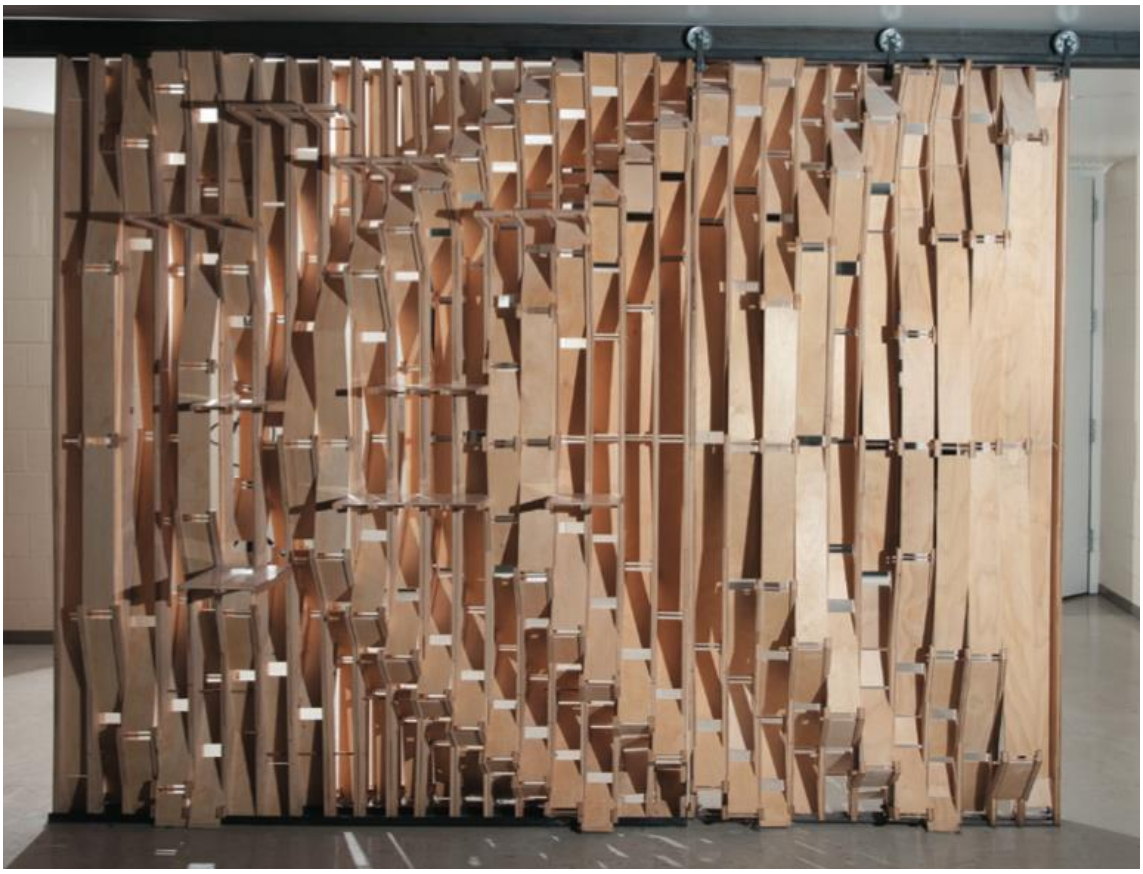
Para justificar o uso desse tipo de produto, ao menos dois argumentos pertinentes são apresentados. Do ponto de vista mercadológico, madeiras consideradas como mais nobres e de melhor qualidade demoram muito para crescer e, ao mesmo tempo, o desflorestamento tem levado a uma rápida diminuição das espécies. Por isso, a madeira utilizada, atualmente, para a

produção de estruturas é derivada de espécies que não eram vistas como produtos comercializáveis em meados do século XX, principalmente pinus e eucalipto. Do ponto de vista de conhecimento técnico, os processos industriais são capazes de garantir maior uniformidade no material, retirando imperfeições, defeitos e pontos fracos. Isso implica em cálculos mais simples, menor quantidade de simulações e processos auxiliados por equipamentos com elevado grau de precisão (como os CNCs). A engenharia dos materiais aplicada à madeira garante segurança para sua utilização por parte de arquitetos e engenheiros, uma vez que as características, a qualidade e o desempenho do produto são mais controlados e bem definidos (GUSS, 1995).

A qualidade da madeira como material construtivo é evidente para alguns profissionais, sendo a promessa do único material sustentável, do ponto de vista ambiental, para as edificações nas próximas décadas. Todavia, a falta de confiança e experiência, junto com um conhecimento desatualizado e uma cultura conservadora, sobre o uso da madeira são as principais razões que impedem o amplo desenvolvimento da construção em madeira na Europa e no mundo. É necessário repensar as interpretações sobre as potencialidades do material, explorando suas características positivas desde os estágios iniciais do processo de projeto, como fatores que viabilizam a fabricação e construção (KRIEG, 2017).

Beorkrem (2013) cita uma série de projetos na tentativa de exemplificar como a combinação das propriedades da madeira com a Fabricação Digital pode orientar decisões geométricas, estruturais, de fabricação e de montagem. Alguns deles são o *Dunescape* (SHoP Architects); *Imaterial/Ultramaterial* (Nader Tehrani); *Sequential Wall* (Gramazio & Kohler); *Ripple Wall* (Digital Arts Center); *ICD/ITKE Pavilion* (Achim Menges e Jan Kippers); *Stratifications* (Gramazio & Kohler) e; *Trondheim Camera Obscura* (Norwegian University of Science & Technology). No caso do *Ripple Wall* (Figura 8), por exemplo, a montagem das conexões foi feita sob compressão, sem a utilização de equipamentos ou ferramentas auxiliares. Para isso, era necessário gerar um sistema de atrito, que somente foi viabilizado pela combinação da espessura do material com a dimensão da fresa utilizada pela máquina CNC.

Figura 8: Ripple Wall, estrutura localizada no Laboratório de Fabricação Digital da UNC Charlotte.



Fonte: Disponível em: <https://darts.charlotte.edu/sites/darts.charlotte.edu/files/fields/gallery/field_gallery_image/Screen_Shot_2014-02-01_at_1.03.43_PM_0.png>. Acesso em: 05 de junho de 2018.

Além disso, os últimos anos mostraram um grande número de inovações tecnológicas voltadas para a sistemas construtivos em madeira. O uso de processos computacionais, como simulações, escaneamentos, digitalizações e robótica, permite aproveitar as condições naturais do material para estruturas e edifícios. As possibilidades proporcionadas pelo uso de *Big Data* e *Big Analytics*, assim como os avanços nas tecnologias de tomografia e escaneamento, podem permitir a inclusão de todas as informações coletadas sobre o material como condicionantes do processo de projeto. Em um futuro próximo, essas tecnologias podem incentivar o uso da madeira a partir do simples desmembramento de troncos de árvores, utilizando sua forma natural (MENGES, SCHIWNN e KRIEG, 2017).

Em conversa com os representantes de Holzbau Amann e Holzbau Müllerblaustein, Schwinn (2017) questiona as limitações atuais da construção em madeira. São apontados obstáculos

relacionados: (1) às restrições dos processos de manufatura subtrativos; (2) à transposição de informações para projetos arquitetônicos, estruturais e de manufatura e; (3) à multiplicidade de regras e diferenças legislativas em um único país (neste caso, a discussão era com relação à Alemanha, mas é possível generalizar para outros países).

Esses três aspectos ficam mais evidentes quando se considera a produção de elementos curvos de madeira, devido ao desafio de manter as fibras intactas e garantir as capacidades mecânicas do material. A conformação da dupla curvatura demanda gastos excessivos em tempo de trabalho e em desperdício de material e, consequentemente, é considerada ineficiente e cara. Isso é explicado, em parte, pelo fato de a indústria não ter evoluído em direção a esse tipo de fabricação. Por outro lado, a transferência de dados entre arquitetura, engenharia e fabricação ainda é considerada lenta, sendo consequência da grande quantidade de retrabalho necessário, mesmo para pequenas mudanças no projeto. Apesar dos métodos computacionais, paramétricos e associativos sejam mais capazes de lidar com essas modificações, ainda não estão otimizados para diversas situações. Para resolver algumas dessas questões, levar em consideração os processos de fabricação processo de projeto pode contribuir para reduzir o desperdício de tempo, material, esforço e dinheiro (SCHWINN, 2017).

A partir de sua conversa com Manfred Grohmann e Jan Knippers, Krieg (2017) aponta três reformulações necessárias sobre a interpretação e compreensão da madeira. Deve-se repensar as tipologias estruturais, os fluxos do processo de projeto e as potencialidades do material. Só assim seria possível superar as limitações e desafios atuais. A exploração de novos sistemas construtivos permite o desenvolvimento de formas livres e complexas, ampliando as fronteiras dos processos de Fabricação Digital. Todavia, a Personalização em Massa, por exemplo, ainda é um grande desafio para a consolidação de novas geometrias estruturais, uma vez que grande parte da indústria ainda está focada na inovação de produtos padronizados. Nesse sentido, é perceptível uma lacuna entre a pesquisa científica e o uso comercial da Fabricação Digital (KRIEG, 2017).

Conforme argumentado por Kilian (2017), a pesquisa em arquitetura deve ter um papel ativo no desenvolvimento de processos computacionais para suprir suas próprias demandas, sem depender de modelos de outras disciplinas. As explorações feitas na investigação científica, no que diz respeito às novas técnicas e à complexidade dos materiais, permitem oportunidades e

soluções únicas. Esse pode ser um caminho para provar que é possível trazer mudanças e inovações aos processos industriais e à estética arquitetônica.

> Na melhor das hipóteses, vimos apenas um vislumbre do que é possível no futuro próximo. Na pior, o desenvolvimento tecnológico pode se tornar uma forma de controlar o acesso à implementação da arquitetura, semelhante a outras indústrias que passaram por uma consolidação excessiva e processos de produção simplificados. Mas o argumento mais poderoso contra este cenário é a forte cultura *bottom-up* de pesquisa individual que existe dentro e em paralelos dos institutos de pesquisa representados que, em muitos casos, são facilitadores cruciais por meio de suas contribuições *open-source* e pesquisas inovadoras (KILLIAN, 2017, p. 217. Traduzido pelo autor).

2.2.1. A Indústria de madeira engenheirada no estado de São Paulo

Existem diversos pesquisadores no Brasil que promovem o desenvolvimento tecnológico e científico da madeira para a construção civil. Porém, alguns poucos escritórios de arquitetura (Severiano Porto, Marcos Acayaba, MK 27, Jacobsen Arquitetura, Aleph Zero e 23 Sul) e de engenharia (Helio Olga, Carpinteria, Amata e Rewood) se dedicam, parcialmente, à produção de novos projetos que utilizam sistemas construtivos em madeira. Em geral, essa produção é feita em parceria com um número limitado de indústrias nacionais (ITA Construtora, Crosslam, Rewood e Esmara). Na tentativa de solucionar esse problema, algumas iniciativas recentes têm tido o propósito de trabalhar com toda cadeia produtiva da construção em madeira, do plantio e extração até a utilização do material na obra.

Esse é o caso do Núcleo de Referência em Tecnologia da Madeira, fundado em 2017 e situado em São Paulo, que procura difundir, amparar, defender, incentivar, favorecer e capacitar todo o setor madeireiro no país. Dentre os principais agentes envolvidos neste Núcleo, encontram-se as principais indústrias de beneficiamento da madeira para a construção. Apesar disso, o cenário é um pouco nebuloso e com diversos obstáculos. Para compreender as principais limitações e as potencialidades existentes, desde os tipos de madeira até os equipamentos disponíveis e os processos utilizados para o beneficiamento do material, foram feitas visitas técnicas, apresentadas nos relatórios do Apêndice I.

Ao considerar o processamento por equipamentos de Fabricação Digital, os principais produtos da indústria nacional são a MLC (Rewood e Ita Construtora) e a CLT (Crosslam). Dentre os equipamentos disponíveis, pode-se citar CNCs de cinco e de três eixos, prensas hidráulicas e mecanismos analógicos para formação de dupla curvatura em peças estruturais. Mesmo assim, as edificações que utilizam esses materiais ainda expressam uma parcela muito pequena do total, quando se observa o cenário nacional da construção civil. No entanto, algumas conquistas já foram alcançadas. Uma das mais notáveis é a execução da obra da Dengo Chocolates, um edifício vertical de quatro andares (o mais alto em madeira do país) feito com CLT e MLC.

As principais espécies utilizadas para a obtenção de madeira engenheirada no país são pinus e eucalipto. Ao considerar a grande diversidade de xilófagos e fungos e as variáveis climáticas, é imprescindível que o tratamento da madeira seja feito de forma excelente. Nesse sentido, pinus se apresenta como uma espécie mais adequada, pois sua menor densidade permite a maior penetração dos agentes químicos para a proteção do material. Apesar da densidade menor sugerir um desempenho estrutural inferior ao do eucalipto, isso também significa uma redução de peso na estrutura (CALIL NETO, 2011).

2.3. SISTEMAS DE CONEXÃO EM MADEIRA

Diversas empresas apresentam inúmeras formas de conexões em madeira e um número ainda maior de soluções em fixadores mecânicos e químicos. Possivelmente, um dos maiores exemplos é a Rothoblaas, uma multinacional especializada no assunto. No entanto, duas razões justificam a necessidade de revisitar os sistemas tradicionais mais comuns de conexões. Por um lado, é necessário considerar o processo de montagem ao longo do desenvolvimento do produto, idealmente evitando o uso de elementos adicionais. Por outro lado, desdobramentos advindos da funcionalidade e da geometria de métodos tradicionais pode ser uma estratégia para alcançar uma solução inovadora.

Das partes dos sistemas construtivos em madeira, as conexões são tratadas como um assunto particularmente complexo. Robeller e Weinand (2017) indicam que ondas de avanços tecnológicos sobre processos de fabricação ao longo da história exerceram grande influência sobre os sistemas de encaixes de estruturas em madeira. A primeira onda foi referente à utilização de ferramentas manuais, como serras, machados e cinzéis, com a produção de encaixes integrais, em que os esforços são transferidos entre as partes através de relações

geométricas. A segunda onda foi perceptível quando a industrialização e a produção em massa substituíram os métodos tradicionais de articulações, através da adoção de fixadores mecânicos, produzidos em uma velocidade muito maior, como pregos, parafusos e placas de metal. A terceira e atual onda é visualizada através da introdução de equipamentos de controle numérico e aumento no nível de personalização, com o vislumbre de novas possibilidades relativas ao aumento no grau de eficiência e de variação sobre a fabricação de componentes através do controle da informação.

De modo geral, Tamke e Thomsen (2009) sugerem que sistemas de encaixe tradicionais apresentam algumas características muito interessantes que podem ser exploradas por meio de tecnologias digitais: (1) Possibilidade de atingir requisitos geométricos e tectônicos específicos; (2) Comportamento físico em paralelo com toda a estrutura, com expansões semelhantes sob variação de temperatura e umidade; (3) Alta taxa de personalização e pré-fabricação; (4) Nível de tolerância e; (5) Eficiência e agilidade na montagem.

Não obstante, é possível encontrar uma vasta literatura relacionada às tipologias de encaixes em madeira. Os trabalhos de Jackson e Day (1985), Noll (2002) e Fairham (2007) são apenas alguns exemplos. De forma geral, a classificação dos encaixes pode ser dividida em quatro aspectos: (1) aqueles usados para prolongar vigas e pedaços de madeira, em que as variações dependem dos requisitos de resistência; (2) aqueles usados para conectar dois ou mais elementos em um ângulo específico; (3) aquelas cuja função é conectar placas em um mesmo plano e; (4) casos especiais, usados em situações específicas (RILEY, 1905). Outro sistema de classificação segue a funcionalidade, geometria e método de conexão de cada junta. Cruzando as informações fornecidas por Riley (1905), Jackson e Day (1985), Noll (2002) e Fairham (2007), é possível encontrar os principais tipos de encaixe e seu propósito geral, como é apresentado no Quadro 1. Outros tipos de encaixes podem ser encontrados na literatura, no entanto, uma grande parte deles poderia ser alocada na categoria especial de Riley (1905), como é o caso do *Birdsmouth*, mencionado por Fairham (2007) como um dos encaixes variados.

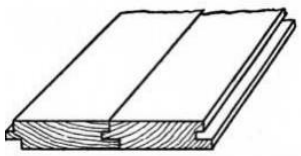
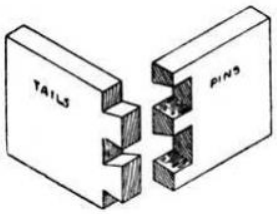
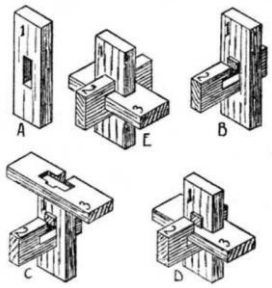
Do ponto de vista estrutural, os sistemas de conexão podem ter outro tipo de classificação, dependendo dos principais esforços estruturais e da finalidade do elemento. A carpintaria tradicional pode ser dividida em encaixes para montagens, emendas e acoplamentos, que podem ser feitos entre dois elementos de madeira ou por meio de fixadores. O fixador químico mais comum é a cola, frequentemente usada para reforço estrutural. No caso dos fixadores

mecânicos, existe uma grande variedade, separados em (1) elementos de conexão: pregos, grampos, parafusos comuns, parafusos auto-brocantes e pinos e; (2) elementos conectores: anéis, anéis placa e placas de pregos (ARGÜELLES ÁLVAREZ, *et al,* 2015).

Um dos possíveis futuros dos encaixes para estruturas em madeira é vislumbrado no artigo escrito por Cokcan *et al.* (2016). O objetivo desse era projetar e construir uma estrutura a partir de conexões que não dependessem de elementos de fixação. Dessa forma, seria possível montar e desmontar a estrutura inúmeras vezes. No entanto, a geometria desejada era muito irregular, o que exigia geometrias únicas para cada conexão. Para solucionar, foram desenvolvidos encaixes do tipo *dovetail*, cada uma com um ângulo específico entre os elementos, que foram gerados automaticamente e produzidos com ferramentas de Fabricação Digital (COKCAN *et al.* 2016).

Quadro 1: Encaixes de acordo com Riley (1905), Jackson e Day (1985), Noll (2002) e Fairham (2007). Apesar de alguns tipos terem tradução para português, é comum utilizar a nomenclatura em inglês para se referir a esses tipos de conexões. Alguns exemplos são apresentados no final.

<table>
<tr><th>Riley</th><th>Jackson e Day</th><th>Noll</th><th>Fairham</th></tr>
<tr><td rowspan="5">Conexões usadas para prolongar elementos lineares ou que estão em um mesmo plano</td><td>-</td><td colspan="2">Scarf</td></tr>
<tr><td colspan="3">Dowelling</td></tr>
<tr><td>Plain Butt</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>Splined</td><td>Edge-to-Edge</td><td>-</td></tr>
<tr><td colspan="3">Tongue and Groove[1]</td></tr>
<tr><td rowspan="10">Conexões usadas em elementos lineares ou que formam ângulos</td><td colspan="2">Halving</td><td rowspan="2">Halving</td></tr>
<tr><td colspan="2">Lap</td></tr>
<tr><td colspan="3">Mortise-and-Tenon</td></tr>
<tr><td colspan="3">Bridle</td></tr>
<tr><td colspan="3">Dovetails[2]</td></tr>
<tr><td colspan="3">Miter</td></tr>
<tr><td>Hinge</td><td>-</td><td>Hinge</td></tr>
<tr><td colspan="2">Housing</td><td>-</td></tr>
<tr><td>Finger</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>Conexões Especiais</td><td>Knock-Down</td><td>-</td><td>For Curved Work, Miscellaneous and Puzzle[3]</td></tr>
</table>

Exemplos	 [1]*Tongue & Groove.* In: Fairham, 2007, p. 49.	 [2]*Dovetail Joint.* In: Fairham, 2007, p. 133.	 [3]*Mortising Puzzle*. In: Fairham, 2007, p. 201.

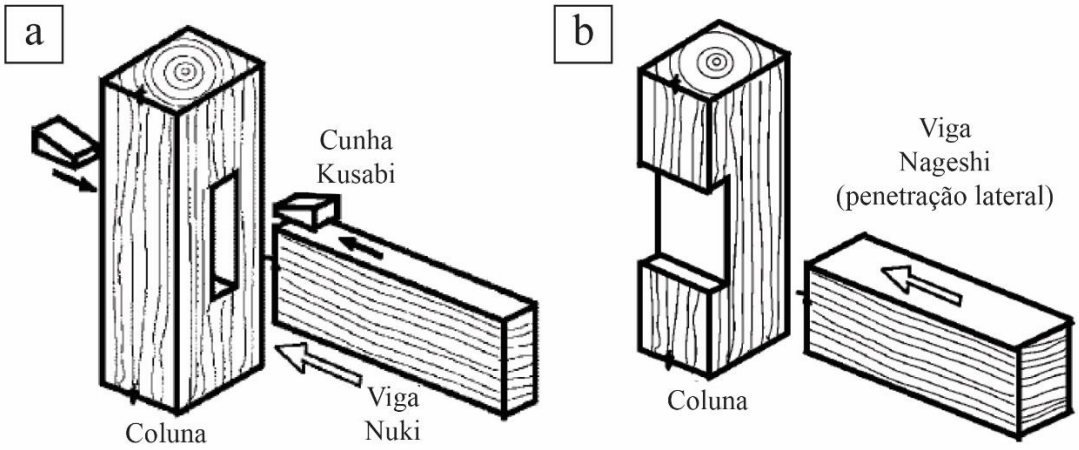
Fonte: elaborado pelo autor, 2020.

2.3.1. Sistemas japoneses de encaixes

A arquitetura tradicional japonesa usava vários tipos de encaixes e inúmeras estruturas feitas de madeira. Na verdade, estudos aprofundados explicam os valores culturais e religiosos sobre espécies específicas de árvores e o simbolismo por trás de seu uso na construção. Embora este assunto não seja discutido nesta tese, ele pode ser uma das justificativas para abordagens tão complexas aos sistemas de construção de madeira na cultura japonesa. De acordo com Shiratori, Komatsu e Leijten (2008), uma das grandes vantagens da utilização de encaixes com relação madeira-madeira é a ductilidade contínua e a capacidade de absorção de energia. No entanto, o raro uso de elementos adicionais muitas vezes implica em geometrias complicadas.

Dois sistemas de encaixe muito comuns encontrados em santuários e edifícios tradicionais no Japão são as vigas Nuki com a cunha Kusabi (Figura 9a) e as vigas Nageshi (Figura 9b). Com base nisso, Shiratori, Komatsu e Leijten (2008) desenvolveram um novo sistema de conexão, denominado K-N (Kusabi - Nageshi). Embora não tenham explorado o uso da Fabricação Digital, algumas de suas considerações podem ser relevantes para esse método de produção, especialmente com relação à qualidade das espécies atualmente disponíveis, quando comparadas às utilizadas na arquitetura tradicional.

Figura 9: Esquemas das vigas do tipo (a) Nuki, utilizando a cunha Kusabi, com conexão no meio do pilar e (b) Nageshi, com conexão na lateral do pilar.



Fonte: SHIRATORI, KOMATSU e LEIJTEN, 2008. (a) p. 1040 e (b) p. 1042. Editadas e traduzidas pelo autor.

Os autores apontam que alguns dos principais desafios atuais se encontram em características como (1) inconsistência e baixa densidade; (2) menor resistência mecânica; (3) maior incidência de defeitos (nós, granulação cruzada); (4) menor estabilidade devido à pouca idade, resultando em um maior número de defeitos durante a secagem e; (5) menor diâmetro dos troncos. Isso indica que estudos que revisitem sistemas tradicionais podem permitir novas interpretações e são necessários para viabilizar e expandir a construção em madeira no século XXI (SHIRATORI, KUMATSU e LEIJTEN, 2008).

Outro desafio pode ser encontrado na relação entre o tamanho das peças projetadas e os equipamentos disponíveis para a fabricação. Quando o elemento é maior do que as dimensões trabalháveis, é necessário separar o objeto em vários componentes e encontrar métodos de união das partes. Nesse sentido, a exploração de técnicas específicas pode ampliar horizontes e possibilidades de produção, uma vez que os métodos de união frequentemente utilizados na Fabricação Digital incluem adesivos, fixadores metálicos e geometrias extremamente simplificadas (KANASAKI e TANAKA, 2013).

Ainda de acordo com Kanasaki e Tanaka (2013), é possível encontrar técnicas refinadas, tanto culturalmente como tecnicamente, nas raízes da arquitetura tradicional japonesa, conhecidas como Tsugite - utilizada para aumentar o comprimento linear de peças - e Shiguchi - com o objetivo de conectar elementos que se posicionam de forma angular. Elas abrangem centenas

de tipos de encaixes, cada um com aplicações e funções próprias. A ordem de montagem dos componentes é cautelosamente decidida e, ao contrário de técnicas ocidentais, como as originadas da Alemanha, elas não utilizam fixadores metálicos ou adesivos. Para os autores, um olhar superficial e descuidado pode sugerir a aplicação de um conhecimento empírico e experimental para a utilização dessas técnicas. Todavia, cada uma das geometrias utilizadas é originada a partir de formas básicas, compostas de 10 a 20 tipos com uma ou duas funções diferentes. A combinação dessas formas básicas e a demanda de funções específicas é o que gera a forma final.

Essas duas técnicas foram criadas, especificamente, para uso em arquitetura. Isso significa que utilizam características próprias da construção, como o peso próprio das peças como condicionantes para a conformação dos encaixes. Entretanto, a diferença sobre o método de produção exige alterações nas geometrias. Por exemplo, equipamentos CNC podem gerar cantos arredondados por causa da fresa e a vibração da máquina pode causar pequenos defeitos nas superfícies. Isso significa que, ao transpor as técnicas Tugite e Shiguchi para a Fabricação Digital, é imprescindível considerar as características equipamento como parâmetros de projeto, para que sejam fabricadas geometrias ideais para encaixes (KANASAKI e TANAKA, 2013).

2.4. SÍNTESE

A madeira é um dos materiais mais promissores para a construção civil. Ao mesmo tempo que é uma alternativa sustentável para um dos setores mais nocivos para o meio ambiente, também possui características vantajosas e atrativas para o processamento industrial, principalmente quando são utilizados equipamentos de controle numérico. A compreensão e a apropriação das propriedades do material como variáveis de projeto são fundamentais para o desenvolvimento de soluções mais interessantes e factíveis.

As possibilidades proporcionadas pelo material são diversas. Uma forma de exemplificar isso é a comparação do uso do material com os sistemas estruturais descritos por Heino Engel (2001). O sistema de seção-ativa é um dos mais tradicionais e antigos da construção em madeira, conforme constatado por Sobon e Schroeder (1984), e está presente em construções em *post and beam* (pilar e viga) e em *timber frame* (armação de quadros de madeira). Mais do que isso, inúmeras experiências recentes, como as descritas por Beorkrem (2013), combinam

diversos sistemas descritos por Engel (2001) com as tecnologias digitais de projeto e fabricação, com o intuito de se obter aplicações inovadoras da madeira e, por vezes, superar obstáculos que persistiram por décadas.

O uso de produtos de madeira engenheirada, especialmente MLC e CLT, sugere que processos profundos de industrialização são consistentes com as demandas contemporâneas da arquitetura. De certa forma, é uma oportunidade de usar a madeira para a construção de grandes vãos, formas complexas e alcançar maior sustentabilidade de forma integrada. Especificamente no caso do Brasil, a expectativa mais otimista é de que o uso de produtos engenheirados de madeira alavanque processos de industrialização mais intensos em toda a cadeia da construção civil, incorporando princípios das indústrias 3.0 e 4.0.

Ao mesmo tempo, isso não significa que o uso mais tradicional e comum da madeira deve ser descartado. Na realidade, o uso de tecnologias de escaneamento 3D, digitalização e fabricação digital pode favorecer novas abordagens que incorporem a anatomia natural da madeira como um parâmetro de projeto. Além disso, as tecnologias digitais facilitam os processos de avaliação da madeira, sobretudo para reuso, o que pode incentivar a criação de novos produtos e projetos que visam o *upcycling*.

Além disso, o desenvolvimento de conexões especiais pode ser um mecanismo para alcançar soluções mais viáveis, seja considerando a eficiência estrutural ou econômica. Nesse sentido, a utilização de sistemas computacionais e de Fabricação Digital para geração de conexões pode ser uma grande contribuição para o desenvolvimento de sistemas estruturais específicos que explorem as potencialidades do material.

> Colocar duas ou mais partes individuais juntas criará uma união, e a maneira como isso é detalhado – a solução da junta – irá influenciar a aparência, o desempenho e a durabilidade de todo o edifício. Também influenciará a estratégia de desmontagem da construção [...]. Os requisitos funcionais serão determinados pelas características do material e pelas tecnologias utilizadas. Os requisitos estéticos serão determinados por tradições construtivas, estilo arquitetônico e idiossincrasias do próprio arquiteto. (EMMIT, OLIE e SCHMID, 2004, p. 144 e 147. Traduzido pelo autor).

3. DETALHE ARQUITETÔNICO: CHAVE PARA INOVAÇÃO

> *Detalhes são agora os super-detalhes, info-detalhes, hiper-realistas, infra-detalhes da arquitetura. O detalhe agora se tornou mais minuciosamente projetado, valioso e poderoso do que imaginávamos anteriormente. Agora, os mais minúsculos, imateriais e invisíveis detalhes arquitetônicos podem fazer o maior trabalho arquitetônico e ter os melhores efeitos arquitetônicos.*
>
> *GARCIA, Mark*[5].

Com o término das Duas Grandes Guerras Mundiais, em 1945, o mundo ingressou numa etapa de amplo desenvolvimento tecnológico, reconhecido por diversos autores como a Terceira Revolução Industrial. A partir de meados da década de 1970, diversos eventos alteram dinâmicas internacionais, trabalhistas e sociais. Alguns dos marcos importantes que podem ser listados: a ONU declara 1975 como Ano da Mulher, dando início à década da mulher. No mesmo ano ainda ocorre o final da Guerra do Vietnã, e a dupla Bill Gates e Paul Allen fundam a Microsoft. O ano seguinte é marcado pela criação da Apple, por Steve Jobs e Steve Wozniak. A era dos "*blockbusters*" do cinema tem início em 1977, com o lançamento de Star Wars: Episódio IV - Uma Nova Esperança. A Guerra do Afeganistão tem início em 1979. Em 1980 é publicado o padrão da Ethernet, além de ocorrer a primeira videoconferência da história. A *Nintendo Entertainment System* (NES) é lançada em 1985, um dos principais motivos da popularização dos videogames. Ainda nesse ano, Mikhail Gorbachev assume a liderança da USSR e inicia os acordos para término da Guerra-Fria. O maior desastre nuclear da história acontece em Chernobyl, em 1986. Três anos depois o mundo se encontra marcado por diversas revoluções nos países, até então, socialistas, culminando na queda do Muro de Berlim. Em paralelo, as tecnologias de *Computer Aided-Design* (CAD) e de *Computer Aided-Manufacturing* (CAM), que começaram a ser desenvolvidas na metade do século XX, tiveram

[5] GARCIA, Mark. Histories, Theories and Futures of the Details of Architecture. In: **Architectural Design**: Future Details of Architecture. New Jersey: Wiley & Sons, v. 84, n. 04, jul/aug. 2014. p. 21. Traduzido pelo autor.

avanços consideráveis a partir da década de 1970, sobretudo após a padronização da linguagem gráfica e da criação de técnicas computacionais para elementos 3D, desenvolvidas pela IBM.

É nesse cenário que Naomi Schor publica o livro "*Reading in Detail: Aesthetics and the Feminine"*, datado de 1987. Embasada em autores como Michel Foucault, Roland Barthes, Jacques Derrida e Adolf Loos, Schor (1987) tenta responder como que o detalhe assume um papel central nas discussões das artes visuais e literárias, em momentos de crises culturais e de reinterpretação de conceitos pré-estabelecidos. As ideias de Schor (1987) são corroboradas por Deamer (2010), que propõe uma discussão similar sob o ponto de vista da arquitetura.

Antes, é importante ressaltar que o modelo de produção fordista do início do século XX, não apenas sistematizou o trabalho e os métodos de produção em uma cadeia linear horizontal, como demandou uma hierarquização vertical do conhecimento, o que também alterou a dinâmica organizacional dos escritórios de arquitetura. O Detalhe Arquitetônico é afetado diretamente por essas mudanças, uma vez que fica fadado à última etapa de produção, e sua concepção se torna dissociada da idealização do projeto arquitetônico, passando a ser realizada pelo profissional de menor grau em hierarquia no escritório. É justamente este profissional, desvinculado dos resultados do seu próprio trabalho e insatisfeito com os métodos de projeto, que representa a crise e as contradições que se manifestaram, principalmente, no Detalhe Arquitetônico; e que continua tendo desdobramentos até a produção contemporânea de arquitetura (DEAMER, 2010).

É também este jovem e insatisfeito arquiteto que começa a trabalhar com projetos paramétricos, nos quais a forma cede lugar à topologia e as relações espaciais se tornam performativas. Isso é alcançado por meio de um processo de causa e efeito, composto por equações numéricas, no qual as informações para construção, fabricação e montagem são as mesmas que orientam o projeto (DEAMER, 2010). É justamente fazendo uso de tecnologias digitais, que este jovem profissional encontra um caminho para sua "revolução", de ruptura com os aspectos lineares e hierárquicos estabelecidos pela indústria tradicional. A tecnologia deixa de ser uma finalidade para ser um meio; o arquiteto se encontra livre das restrições impostas pela própria tecnologia e a utiliza como mecanismo para solucionar os problemas (DEAMER, 2010).

As mudanças no processo de projeto, decorrentes tanto das aspirações das gerações mais novas de arquitetos como pelos impactos dos avanços tecnológicos alteraram, de fato, a dinâmica nos

escritórios. Não é apenas pelo fato de um profissional poder ser contratado para o desenvolvimento de um único projeto, ou ainda, por seu local de trabalho poder ser remoto, mas principalmente pela necessidade de troca de informações constante entre todos os envolvidos no desenvolvimento do trabalho. A partir do momento em que o detalhe faz parte desse conjunto de informações que, por sua vez, são disseminadas entre todas as partes envolvidas no projeto, têm-se um novo entendimento sobre a produção do Detalhe Arquitetônico, que está confundida (propositalmente) com o processo de projeto (DEAMER, 2010). Nessa situação, o detalhe pode ser considerado como o mecanismo capaz de viabilizar a exequibilidade formal de um sistema (EMMIT, OLIE e SCHMID, 2004).

Embora seja possível descrever um cenário que indique uma mudança na concepção dos detalhes arquitetônicos, autores como Deamer (2010), Salingaros (2010), Ford (2011), Celani (2014) e Castriotto *et al,* (2017) apontam que o futuro ainda é nebuloso. Por um lado, utilização de tecnologias digitais aliadas associadas às complexidades da arquitetura contemporânea (relações sociais, urbanas, econômicas ou ambientais) pode ser uma forma eficaz de garantir a autonomia do arquiteto. Por outro, pode levar a um novo tipo de aprisionamento tecnológico; a tentação de usar manipulações digitais para produzir formas incompreensíveis e sem sentido também é real (SALINGAROS, 2010; BARBOSA NETO, 2013).

> […] é precisamente nos momentos de mudanças radicais que precisamos estar mais vigilantes. Se os fundamentos são estabelecidos para uma noção menos reificada de identidade profissional, precisamos nos preocupar para que eles não sejam substituídos por outra forma de reificação. A tentação de ver objetos brilhantes e complexos possibilitados pela Fabricação Digital, produzidos como um fim em si, é grande. No entanto, isso não apenas substitui uma forma de objetivação por outra, mas também nos deixa como sujeitos definidos pela tecnologia que tão felizmente buscamos por libertação. Nesse caso, não teríamos progredido além dos limites de produção que motivaram os teóricos do século XIX a criticar o detalhe industrial. É muito mais interessante usar a tecnologia para dispensar identidades fixas em conjunto. (DEAMER, 2010, p. 88. Traduzido pelo autor)

3.1. DETALHE NA ERA DIGITAL

Conforme Schor (1987) e Deamer (2010), o detalhe nas artes visuais, de modo geral, é o primeiro elemento a evidenciar mudanças significativas na sociedade. Tanto as interpretações do detalhe do produto como a de novas dinâmicas entre projetistas e engenheiros, realizadas por Boothroyd, Dewhurst e Knight (2002), são evidências de profundas transformações no processo de produção. Analogamente, uma das primeiras formas de observar essas mudanças na arquitetura está na compreensão de Deplazes (2005) sobre o detalhe construtivo e sua incorporação nos estágios iniciais do processo de projeto. Estas mudanças e as implicações são explicitadas por Rivka Oxman e Robert Oxman no artigo *The New Structuralism*.

De acordo com Oxman e Oxman (2010), o termo Novo Estruturalismo é referente a uma mudança cultural sobre a forma de produção da arquitetura, que ocorre através da integração entre sistemas estruturais, tectônicas digitais, materialização, fabricação e pesquisa. Isso se deu a partir dos avanços tecnológicos iniciados durante a Terceira Revolução Industrial (nos processos, nas ferramentas e nos equipamentos relacionados com a produção do objeto arquitetônico) que romperam com os processos lineares de produção.

A principal forma de percepção do Novo Estruturalismo é através da relação inédita de trabalho entre profissionais, representada por uma nova geração de engenheiros estruturais (mais evidente na imagem Peter Rice) que atuam em parceria com os arquitetos desde os estágios iniciais do processo de projeto, com o intuito de incorporar novas tecnologias e, primordialmente, viabilizar a materialização e fabricação dos elementos projetados. (OXMAN e OXMAN, 2010).

O trabalho colaborativo entre os profissionais, associado com as ferramentas e processos (tectônicas) digitais, permitiu que as equipes formadas por arquitetos e engenheiros assumissem o dever de integrar a arquitetura com as tecnologias dos materiais, em busca de otimizações estruturais, geométricas e performativas (ambientais) simultaneamente. O Novo Estruturalismo faz com que arquitetos, engenheiros e fabricantes assumam, novamente, o controle da responsabilidade sobre os processos de projeto, produção e construção. (OXMAN e OXMAN, 2010).

O rompimento dos modelos de produção decorrente das novas tecnologias foi muito mais brutal do que poderia ser esperado. As inovações em processos, métodos e ferramentas foram disruptivas, demandando uma reinterpretação das tectônicas de projeto. O trabalho do Design-to-Production pode ilustrar como as informações providas a partir das tectônicas digitais possuem o papel de processo de projeto, de fabricação e de construção, simultaneamente. Isso contrasta abruptamente com as tectônicas digitais, a partir de modelos representativos. (OXMAN e OXMAN, 2010)

A materialidade se tornou um dos fatores de maior influência para a produção de arquitetura através das novas tecnologias de fabricação – e não se trata de técnicas de modelagem, mas de uma revolução na forma de se produzir arquitetura, a partir de processos que priorizam a estrutura, o desempenho e as propriedades dos materiais, a partir de sistemas generativos projetados por arquitetos e engenheiros (OXMAN e OXMAN, 2010).

É possível associar as proposições de Oxman e Oxman (2010) a um contexto muito maior, definido por Klaus Schwab (2016) como a Quarta Revolução Industrial – em que a fronteira entre físico, digital e ambiental não é mais nítida, conformando espaços e relações híbridas. A indústria 4.0, como é chamada na Alemanha, é marcada pelo desenvolvimento dos sistemas cíber-físicos (CPS), pela formação da Internet das Coisas (IoT) e da Internet de Tudo (IoE), Fabricação Digital, Inteligência Artificial, Robótica e acesso a *Big Data* e a *Big Analytics*; tecnologias utilizadas pelas Fábricas Inteligentes, como forma de otimização dos processos de produção. Conforme o autor, essas tecnologias disruptivas indicam alterações em cadeias produtivas inteiras, uma vez que as possibilidades geradas pela conexão entre pessoas por dispositivos móveis, poder de processamento e acesso ao conhecimento beiram o infinito.

No caso da arquitetura, Celani e Frajndlich (2016) apontam que a aplicação de novas tecnologias e processos sobre a produção do componente construtivo implica em um aumento no grau de variação e personalização, estabelecendo uma nova indústria, inovadora e orientada para o cliente. Contudo, os impactos da Indústria 4.0 na construção civil e arquitetura ainda não podem ser precisamente avaliados. As teorias, em geral, especulam possibilidades e vislumbram futuros que podem ou não se concretizar.

Em 2014, a revista *Architectural Design* publicou uma edição especial sobre o futuro do Detalhe Arquitetônico. Artigos de diversos autores foram publicados com a intenção de

estabelecer relações entre o tema e a produção de arquitetura através de ferramentas e equipamentos digitais. O editor dessa edição e responsável pelo texto introdutório, Mark Garcia (2014) introduz o tema da revista através de uma abordagem histórica e teórica. Para ele, o Detalhe Arquitetônico não deve ser tratado apenas como uma questão objetiva, material e física, mas como um elemento imbuído de aspectos subjetivos, experimentais, imateriais, efêmeros, perceptivos, relacionais e fenomenológicos.

A compreensão do detalhe em arquitetura pode ter dois significados muito contrastantes. Uma positiva, considerando o detalhe como a tradução do controle, exatidão, resolução, precisão, especificação, concentração, compreensão, extensão e plenitude de determinada obra. Outra negativa, pela interpretação de excesso, decadência, trivialidade, insegurança, privação e limitação. (GARCIA, 2014)

Essa dualidade sobre o valor e significado do detalhe em arquitetura, em conjunto com o processo de estandardização e a predominância a ideia de que o "todo é maior do que a soma das partes" fez com que a segunda visão apresentada fosse institucionalizada no processo de projeto e nos escritórios de arquitetura. Como prova, durante o século XX, apenas a revista alemã *DETAIL* e Edward Ford[6] publicaram textos sobre o assunto com maior profundidade (GARCIA, 2014).

A nova geração de arquitetos mencionada por Oxman e Oxman (2010) foi responsável não apenas por reinterpretar os processos em arquitetura, considerando a fabricação e a montagem, as novas tecnologias, materiais e mídias, mas também asseguraram uma noção mais consistente

[6] De forma resumida, Ford (2011) propõe: 1) Detalhe como Abstração ou o Não-Detalhe, tendo relação direta com o modernismo e a eliminação da ornamentação; 2) Detalhe como Tema, apresentado quase que como uma oposição ao Detalhe como Abstração, é a relativo à expressão do detalhe como ornamento, reforçado pela repetição de elementos por toda a edificação; 3) Detalhe Autônomo, manifestado em elementos que são independentes ou desvinculados do contexto da obra, tanto formalmente como conceitualmente, apresentando regras, formas de expressão e critérios próprios; 4) Detalhe como Representação da Construção, visto em elementos que atuam como uma retórica a questões tectônicas da edificação, com o objetivo de estabelecer uma ordem – de distanciamentos, efeitos visuais ou materialidade e 5) Detalhe como Conexão, referente às partes do edifício e as relações que estabelecem entre si e com o todo, podendo expressar grandes intenções, que vão além do arranjo estrutural.

sobre a importância do detalhe em arquitetura. De acordo com Garcia (2014), essa geração é caracterizada por arquitetos hipersensíveis ao detalhe, que geraram uma ruptura com os processos tradicionais e condicionaram uma evolução do tema em arquitetura.

3.1.1. Impacto das ferramentas digitais

Diversos artigos científicos e livros foram publicados no final do século XX e início do XXI sobre a aplicação de novas tecnologias (como as ferramentas de projeto e os equipamentos de prototipagem rápida) na arquitetura. Todavia, o principal foco estava na produção de protótipos ou na exploração de possibilidades (muitas vezes formais) geradas pela tecnologia. A elaboração de detalhes utilizando novos recursos não era uma pauta evidente nas discussões teóricas e práticas da arquitetura.

Informações mais específicas sobre estratégias de produção utilizando equipamentos industriais podem ser mais facilmente encontradas em livros e artigos de áreas como engenharia mecânica e de produção, que não são consultados, em geral, por arquitetos. Esse é o caso da obra *Product Design for Manufacture and Assembly* de Boothroyd, Dewhurst e Knight, com a primeira edição lançada em 1983, e que faz parte da literatura fundamental para a formação de engenheiros mecânicos e de produção. É importante mencionar que esse é um livro que não apresenta discussões estéticas ou estilísticas, porém, a aplicação de seus conceitos adaptados para o Detalhe Arquitetônico poderia tornar os projetos muito mais efetivos e econômicos.

O termo *Design For Manufacture and Assembly* (DFMA ou Projeto para Fabricação e Montagem) é definido por Dewhurst, Boothroyd e Knight (2002) como uma convergência de dois outros termos que já eram utilizados pela indústria: o *Design For Manufacturing* (DFM ou Projeto para Fabricação) e o *Design for Assembly* (DFA ou Projeto para Montagem). O primeiro considera que o projeto de determinado produto deve considerar as especificidades dos equipamentos que serão utilizados para a fabricação, com o intuito de otimizar ao máximo todos os aspectos envolvidos na produção, como tempo, custos e desperdícios. Já o segundo é referente ao projeto que facilita a montagem através do aprimoramento dos elementos e do processo que resultam no produto, como a velocidade, praticidade de junções e tipos de ferramentas.

Um dos principais objetivos do DFMA é a redução do tempo e dos custos relacionados com a produção e a montagem de um produto. Apesar de demandar maior tempo nos estágios iniciais de projeto, as etapas de prototipagem e fabricação compensam um atraso inicial relativo, fazendo com que o produto esteja disponível no mercado mais rapidamente, quando comparado aos processos de desenvolvimento sem embasamento no conceito de DFMA (BOOTHROYD, DEWHURST e KNIGHT, 2002).

Um exemplo de DFMA é a de simplificação da estrutura de um produto. Supondo que um objeto apresente elevado número de peças com alto grau de similaridade, sua produção ou montagem pode ser inviável, já que as pequenas diferenças podem representar grandes dificuldades, como desperdício de material ou complicações nos encaixes. O DFMA pode viabilizar a manufatura e construção através do agrupamento de peças similares, realizando pequenas alterações e simplificações nos elementos, a fim de transformar a similaridade em igualdade. Dessa forma, ocorre uma otimização no uso do material, nos processos de produção e na união das partes no elemento final (BOOTHROYD, DEWHURST e KNIGHT, 2002).

Por um lado, a preocupação de definir e aprimorar os detalhes de um produto nos estágios iniciais do processo de projeto acarreta mudanças significativas na estrutura organizacional dos escritórios e nas relações dos profissionais. Para Boothroyd, Dewhurst e Knight (2002), a postura tradicional do projetista como responsável apenas pelo design, mas desvinculado da fabricação, é incoerente com as proposições do DFMA, uma vez que reforça a ideia de solução dos problemas de produção e montagem após a concepção inicial do objeto. Dessa forma, é necessário que o projetista, engenheiros e demais profissionais envolvidos no desenvolvimento de um produto trabalhem em conjunto desde o início, o que pode evitar problemas em momentos tardios, permitindo encontrar soluções mais rapidamente e de forma mais eficiente.

Por outro, é importante compreender que o desenvolvimento de determinados produtos demanda uma relação intrínseca entre o processo de projeto e o de produção. Conforme Boothroyd, Dewhurst e Knight (2002), diversos detalhes de um componente só podem ser definidos ao considerar a forma de fabricação, exigindo a compreensão das limitações, vantagens e propriedades das técnicas, dos materiais e dos equipamentos que serão utilizados. Esse conhecimento nos estágios iniciais do processo de projeto leva a avaliações econômicas mais precisas, pois é possível saber o desperdício de materiais e a utilização do equipamento

mais adequado, o que também serve como justificativa para a viabilização ou não de determinado produto.

Conforme Deplazes (2005), a construção deve ser entendida não apenas como uma questão puramente técnica ou tecnológica, mas como uma *tekne*, isto é, uma necessidade humana de criação e forma de expressão. O detalhe arquitetônico é incorporado como propriedades do material, especificidades de um sistema estrutural ou complexidades de uma edificação. Essa abordagem coloca em evidência um novo vínculo entre o detalhe e as etapas iniciais do processo de projeto. Para exemplificar, é possível considerar uma das propriedades físicas e químicas de determinada espécie de madeira, como a dilatação térmica. Ela interfere nos encaixes entre os elementos construtivos, exigindo uma solução específica para a interface entre os componentes. Não só a dilatação térmica como a solução da interface deve ser considerada como detalhes, mas a própria relação de "causa-efeito" que é gerada a partir dessa interação.

3.2. NOVAS FRONTEIRAS

De acordo com Celani (2014), a inserção da prototipagem rápida e da Fabricação Digital no processo de projeto altera a forma de produção do Detalhe Arquitetônico, gerando rupturas com paradigmas existentes, intitulados, nesse caso, como os Sete Mitos do Detalhamento Arquitetônico. Resumidamente, eles são: (1) O detalhamento ocorre somente nas últimas etapas do processo de projeto; (2) O detalhamento é menos importante ou interessante que o projeto como um todo; (3) Sempre há uma solução padrão; (4) Detalhes são representados em seções ortogonais bidimensionais; (5) A autoria do detalhe é do autor da obra; (6) Detalhes são utilizados para esconder imperfeições; (7) Não há necessidade de detalhamento com a Fabricação Digital.

Celani (2014) também afirma que é necessário considerar as formas de fabricação e montagem dos componentes que constituem a obra. Isso pode ser reforçado pelo conceito de DFMA, proposto por Boothroyd, Dewhurst e Knight (2002), já que a forma de produção de determinado elemento pode ser a chave para a viabilização ou não de um projeto. Para que seja obtido sucesso na elaboração de um edifício, é necessário que haja uma relação de sinergia entre o projeto e o detalhamento. Isso significa que nem sempre haverá uma solução pronta, o que fica ainda mais evidente ao considerar a Personalização em Massa.

Uma mudança importante nesse contexto é a forma de representação dos elementos. A Fabricação Digital dispensa modelos tradicionais de representação gráfica, uma vez que o objeto projetado digitalmente é convertido em um arquivo de controle numérico, como um *G-Code*, que é interpretado por um CNC e fabricado. Para isso, arquivo digital deve ser o mais legítimo e próximo possível do elemento físico final (CELANI, 2014).

Além disso, Celani (2014) aponta que é inconcebível acreditar que um único profissional é capaz de desenvolver um bom detalhe e um bom projeto como um todo (sobretudo quando se trata de geometrias complexas). Nesse caso, o novo grupo de profissionais definidos por Oxman e Oxman (2010) exemplifica como o trabalho em conjunto, entre arquitetos e engenheiros, é necessário para o desenvolvimento bem-sucedido de determinado projeto e de todos os elementos que o constituem. Outro aspecto evidenciado nessa relação é o propósito do Detalhe Arquitetônico. Ele não é utilizado para esconder imperfeições, mas, conforme a discussão apresentada por Ford (2011) e os argumentos de Celani (2014), é um elemento que vai além da estética, capaz de comunicar intenções e de viabilizar projetos.

Os argumentos apresentados até o momento são referentes aos seis primeiros mitos. O último deles, traduzido pela afirmação de que "não há necessidade de detalhamento com a Fabricação Digital", pode indicar os próximos passos para o Detalhe Arquitetônico. De acordo com Celani (2014), a produção por tecnologias digitais demanda, na realidade, um elevado nível de detalhamento e de informações, independente da geometria possuir ou não conexões. No caso de geometrias complexas ou superfícies contínuas, os elementos fabricados por um equipamento de controle numérico devem ter alto grau de precisão, por exemplo. Na realidade, a forma de manifestação do Detalhe Arquitetônico nessas situações é muito diferente daquela imposta pelos modelos padronizados.

Mas, qual caminho é possível seguir para evitar os mesmos erros dos modernistas, como mencionados por Deamer (2010)? Conforme Celani (2014), é necessário que os arquitetos tenham entendimento e domínio dos processos, equipamentos e ferramentas de Fabricação Digital, para que o projeto – e os detalhes – sejam próprios para esse modelo de produção, sendo ainda mais enfática a emergência dos profissionais mencionados por Oxman e Oxman (2010).

Um exemplo pode ser visto nas elocubrações feitas por Shepherd, Hudson e Hines (2011) sobre o sucesso do processo paramétrico utilizado no desenvolvimento do Aviva Stadium. Os autores

discutem diversos aspectos do projeto: do processo de concepção da geometria e da estrutura até a documentação usada para a produção de elementos da fachada por equipamentos de Fabricação Digital. Dentre eles, é de particular interesse a forma como os autores apresentam o detalhe referente ao sistema de fixação e rotação dos painéis da fachada. Shepherd, Hudson e Hines (2011) deixam evidente que a elaboração do sistema de fixação e rotação foi essencial para a execução do edifício. Contudo, não há nenhuma indicação de como esse sistema específico foi imaginado, projetado e definido – mesmo que isso, provavelmente, tenha acontecido em algum momento.

Outro exemplo que pode ser observado, como tentativa de compreender a importância do detalhamento na produção contemporânea, é o edifício 30 St Mary Axe (anteriormente conhecido como Swiss Re Building e, popularmente, como Gherkin), projetado pelo escritório Foster + Partners. Um dos principais desafios do projeto estava na mudança dos diâmetros de cada um dos andares, o que interferia nas dimensões das fachadas e implicava na produção de detalhes específicos para cada um dos nós estruturais. Duas perspectivas bastante distintas podem ser encontradas na literatura sobre esse mesmo tópico.

Por um lado, Munro (2004) apresenta uma explicação bastante detalhada sobre diversos aspectos do projeto. Com relação aos nós (Figura 10), o foco é dado na importância do alto nível de precisão dos processos de fabricação e a mitigação de ajustes locais para facilitar a montagem da estrutura. Também são apresentados os principais critérios de desempenho estrutural que eram exigidos nesses elementos. Assim como no caso de Shepherd, Hudson e Hines (2011), a compreensão de Munro (2004) é centrada no detalhe como um elemento físico, que deve ser previsto nas etapas de projeto, mas que é fundamental para a viabilização da obra.

Figura 10: Detalhe da conexão entre os andares do edifício Swiss Re, em Londres.

Fonte: Disponível em: <https://i.pinimg.com/474x/9b/e5/19/9be519c0986dfbe8078ca296265345b2--wood-architecture-pipe.jpg> Acesso em: 06 de outubro de 2022.

Por outro, uma perspectiva diferente sobre o mesmo elemento do Swiss Re é apresentada por Menges (2006), por meio das discussões que teve com diversos agentes que participaram do desenvolvimento do projeto. Em especial, com os membros do departamento Specialist Modelling Group, do Foster + Partners. De acordo com Hugh Whitehead (*apud* MENGES, 2006), diretor de projetos do grupo, seria inviável desenhar e especificar cada um dos detalhes, uma vez que eles eram completamente únicos a cada andar. Contudo, as regras que definiam cada um dos elementos eram sempre as mesmas, o que possibilitava o uso de programação para solucionar e automatizar a geração dos nós estruturais, ainda em nível de projeto. Pode-se dizer que os detalhes dos nós estruturais foram compreendidos, primeiro, como um conjunto de regras, comandos e operações para depois serem assumidos como elementos físicos que viabilizaram a construção do edifício.

3.2.1. Materialização

A existência de organizações específicas em que fazem a ponte entre arquitetura, engenharia, produção e montagem são cada vez mais visíveis. É o caso do Specialist Modeling Group, vinculado à Foster & Partners, da Arup, da Bemo, da Metalab e da Zahner. O trabalho desenvolvido por esses grupos pode ser exemplificado pela atuação do Design-to-Production em certas obras, como é o caso do *Nine Bridges Country Club* (Figura 11), de 2009 e do *Centre Pompidou-Metz*, de 2010. As similaridades entre essas duas vão muito além da estética e da autoria de um mesmo arquiteto; (1) ambas tiveram o processo de projeto realizado em um único software CAD, desde a geometria da edificação até o detalhamento dos elementos individuais; (2) ambas tiveram componentes construtivos gerados automaticamente, a partir de um sistema de regras e parâmetros; (3) ambas foram definidas com base em critérios para a solução e otimização de geometrias complexas; (4) a fabricação e construção das duas edificações foram possíveis por conta das ferramentas digitais e dos processos de Fabricação Digital e ; (5) o fator decisivo para a produção dos componentes construtivos foi a qualidade da informação apresentada nos arquivos digitais (SCHEURER, 2010).

Figura 11: Vista da obra Nine Bridges Country Club, projetada por Shigeru Ban. É possível notar similaridades da estrutura com o Centre Pompidou-Metz.

Fonte: Disponível em: < https://www.archdaily.com.br/br/01-189060/nine-bridges-country-club-slash-shigeru-ban-architects/53325861c07a80cb6b0000a2-nine-bridges-country-club-shigeru-ban-architects-photo>. Autor: Hiroyuki Hirai. Acesso em: 08 de agosto de 2019.

A qualidade da informação mencionada por Scheurer (2010) está diretamente relacionada com o nível de detalhamento e o projeto do Detalhe Arquitetônico. Sob essa perspectiva, Walz (2015) explicita que produzir detalhes convencionais a partir de métodos digitais é apenas parte da solução. Os Detalhes Digitais precisam ser adaptáveis a diferentes condições, com a capacidade de reorganização geométrica através de processos de otimização computacional direcionados para a fabricação, podendo reduzir consideravelmente, a quantidade de processos auxiliares para a montagem e construção de estruturas.

Essa ideia de detalhe converge com a observação de Menges (2010) de que, na maioria das vezes, a utilização da computação não é entendida como uma real inovação em termos de métodos de projeto ou de resolução de problemas. Na realidade, essas situações costumam utilizar detalhes convencionais para a resolução de problemas não convencionais. Em parte, isso é resultado da transposição dos métodos analógicos de projeto para o computador, o que implica em métodos computadorizados. A princípio, técnicas utilizadas para representação, modelagem e análise de desempenho foram imitadas pelos softwares, que apesar de terem uma maior precisão, não implicaram na alteração do processo de produção do objeto – e esse é o caso dos detalhes convencionais (MENGES, 2010).

Por isso, a proposta do Detalhe Digital de Walz (2015) é coerente com o conceito de Design Computacional, definido por Menges (2010). Trata-se de uma aproximação alternativa sobre o processo de projeto, que utiliza o potencial computacional para coletar, processar e analisar relações complexas, através de processos algorítmicos generativos. Essa abordagem faz com que o arquiteto se torne uma peça ainda mais relevante para todo o processo construtivo, uma vez que ele se torna responsável pela criação e desenvolvimento de sistemas, implicando em uma revisão sobre a prática arquitetônica (MENGES, 2010).

3.3. SÍNTESE

A edição especial da *Architectural Design* sobre o futuro do Detalhe Arquitetônico também contém um artigo de Edward Ford (2014), intitulado *The Grand Work of Fiction*. Considerar que a natureza, intenção e produção do detalhe são resultantes do discurso e da tecnologia utilizada durante o projeto é a Grande Ficção mencionada pelo autor; na realidade, há uma falha, por parte dos arquitetos, em reconhecer a existência do detalhe e, em geral, é apenas discutida a representação ao invés da construção.

A nova geração de arquitetos, mencionada por Oxman e Oxman (2010) e Garcia (2014), pode ser incumbida de reconhecer o detalhe como elemento essencial nas discussões de arquitetura e, mais do que isso, essa geração pode ser responsável por atribuir ele o papel de elemento capaz de viabilizar obras, solucionar problemas e abrir caminhos para novas possibilidades.

O detalhe também é um poderoso mecanismo de retórica em arquitetura. Arquitetos são capazes de explicitar grandes intenções com a utilização de elementos em pequena escala que podem alterar todo um significado ou reforçar um argumento. Esse é um dos aspectos essenciais do detalhe, mesmo que em parte, isso seja justificado pela influência do contexto. Edward Ford (2014) exemplifica esse aspecto através da comparação do sistema de conexão dos edifícios do *Barnes Foundation* e do *M.H. de Young Memorial Museum*. A princípio, são duas obras que diferem muito entre si em termos de narrativa e sistemas construtivos. Todavia, uma análise mais minuciosa é capaz de provar que as diferenças são ínfimas quando comparadas com as semelhanças, possuindo metodologias de conexões baseadas em encaixes híbridos, relacionando sistemas articulados e contínuos.

Os avanços tecnológicos nas áreas correlatas da construção civil, nas ferramentas de projeto, nos processos de produção ou nos sistemas construtivos, também exercem uma grande influência sobre a produção do Detalhe Arquitetônico. Isso é visível, principalmente, após as grandes Revoluções Industriais. A padronização garantiu uma nova interpretação e posição do detalhe no projeto arquitetônico, mas isso só foi possível por conta do desenvolvimento dos processos industriais de produção, o que é evidente nos livros de Neufert (2013) e Ching (2011). A Terceira Revolução Industrial, a Era da Informação, concedeu algumas novas perspectivas sobre o entendimento do detalhe, inserindo aspectos de materialidade (Deplazes, 2005) e impactos sobre a fabricação e montagem (Boothroyd, Dewhurst e Knight, 2002).

Contudo, os desdobramentos da Quarta Revolução Industrial, do contexto sociocultural contemporâneo, da teoria e retórica em arquitetura sobre o Detalhe Arquitetônico ainda são incertos, como afirma Edward Ford:

> Quanto ao futuro do detalhe, isto é, em suas especificidades técnicas, é um mistério, mas, quanto a se será a colisão de Koolhaas, o ornamento de Scarpa ou simplesmente inexistente, se será contínuo ou fragmentado, preciso ou irregular, sofisticado ou arcaico, orgânico ou mecânico, podemos dizer com a

> certeza de que em vários momentos ele será tudo isso. O futuro do detalhe não é uma questão mais técnica do que o futuro da arquitetura (FORD, 2014, p.35. Traduzido pelo autor).

Ao considerar os avanços tecnológicos da Quarta Revolução Industrial, as mudanças nos processos de projeto e de produção e outras complexidades contemporâneas, qual a forma de atuação do arquiteto? Quais os conhecimentos necessários? Como atender às novas demandas? A produção contemporânea é genuinamente inovadora ou apenas mais um reflexo das possibilidades tecnológicas? Apesar de não ser possível responder a essas perguntas com precisão, há indícios de como isso poderá ser solucionado, sendo uma das discussões apresentadas no desenvolvimento e na **Teoria Emergente** desta pesquisa.

> Fundamentalmente, o futuro do detalhe arquitetônico é, de fato, um campo muito expandido, e não um impulso cego em direção a um futuro inventado às custas do passado? Entusiastas de bits e átomos podem sonhar em viver em cavernas infinitamente reconfiguráveis, enquanto o resto de nós, encarregados da tarefa de construir arquitetura hoje e nas próximas décadas, podemos nos deleitar em uma paleta extraordinariamente expandida de novos materiais e tecnologias, pronta para absorção em nosso repertório existente. [...] A questão de comprometimento, contudo, permanece em aberto, e cada vez mais novos materiais e processos de montagem esotéricos podem alimentar temores ainda mais profundos de ignorância, limitando em vez de ampliando nosso repertório. Talvez essa circunstância só seja relevante se o arquiteto continuar a se esforçar para detalhar o todo. Mesmo assim, se não nos comprometermos com o âmago da questão, ainda seremos realmente arquitetos? (BURRY, 2014, p.141. Traduzido pelo autor).

MOTORE ASINCRONO
TIPO
Volt
kW
COSφ
Hz

4. TECNOLOGIAS DIGITAIS: UM MEIO DE AUTOMAÇÃO

> *A Fabricação digital consiste em muito mais do que impressão 3D. É um pacote de competências em evolução para transformar dados em coisas e coisas em dados. Restam muitos anos de pesquisa para completar essa visão, mas a revolução já está bem encaminhada. O desafio coletivo é de responder à questão central colocada: Como vamos viver, aprender, trabalhar, e brincar quando qualquer ui pode fazer qualquer coisa, em qualquer lugar?*
>
> *GERSHENFELD, Neil*[7].

O início do século XXI é marcado por diversos termos, como Era da Informação, Revolução Digital, Sistemas Ciberfísicos, Internet das Coisas (IOT), Computação em Nuvem e Quarta Revolução Industrial. Nesse contexto, Branko Kolarevic (2003) é responsável por escrever alguns capítulos e editorar o livro *Architecture in the Digital Age*, que pode servir como um ponto de partida para compreender os impactos das ferramentas e dos processos digitais na produção contemporânea de arquitetura.

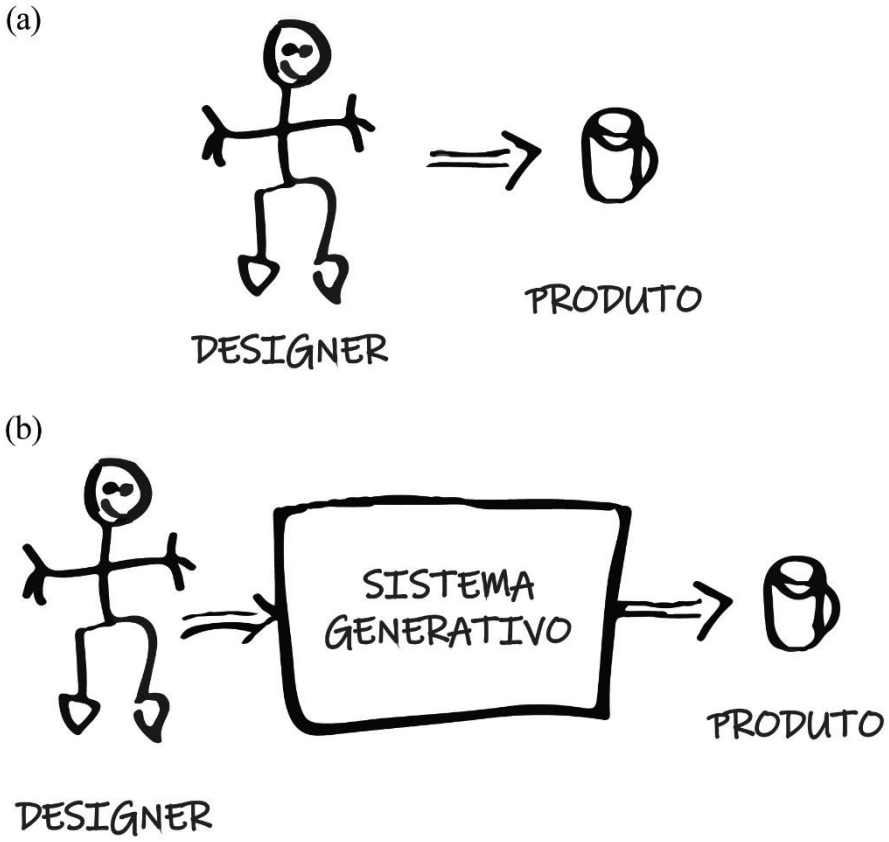
"As tecnologias digitais estão mudando a prática arquitetônica de maneiras que poucos foram capazes de antecipar" (KOLAREVIC, 2003, p. 03. Traduzido pelo autor). Essa é a primeira frase do primeiro capítulo do livro. Ela possibilita a interpretação de dois pontos importantes, ao considerar o estágio atual da produção arquitetônica. Por um lado, a discussão apresentada no livro também tinha o objetivo de antecipar situações que já eram possíveis de se vislumbrar, como os potenciais generativos e criativos das ferramentas em conjunto com os novos métodos de produção. Por outro, alguns dos assuntos abordados, sobretudo com relação às ferramentas de projeto, foram muito além do que os autores vislumbravam naquele momento.

De fato, o uso de sistemas generativos proporciona uma transformação na lógica e no método do processo de projeto de diversas áreas. A lógica dos processos tradicionais (Figura 12a), sejam analógicos ou digitais, é baseada em definições concretas de um problema específico,

[7] GERSHENFELD, Neil. How to make almost anything: the Digital Fabrication Revolution. In: **Foreign Affairs**. New York: Council on Foreign Relations, v. 91, n. 06, 2012. p. 57. Traduzido pelo autor.

com variáveis bem definidas. Nesse caso, o papel do projetista é de gerar um produto que atenda as demandas específicas impostas pelo problema. Por sua vez, os sistemas generativos (Figura 12b) são baseados em definições abstratas, relativas às possíveis variações de um produto ou de suas partes. Com isso, o projetista não se atém a solucionar um problema específico, mas toda uma classe de problemas, uma vez que seu papel é de projetar o sistema que gera as soluções possíveis (FISCHER e HERR, 2001).

Figura 12: Diagrama de Fischer e Herr (2001) sobre as abordagens de desenvolvimento de um produto. (a) é a abordagem tradicional e (b) é a abordagem generativa.



Fonte: FISCHER e HERR, 2001, p. 3. Adaptado e traduzido pelo autor.

A previsão sobre os requerimentos necessários para a utilização das ferramentas CAD e CAM nos processos de projeto, fabricação e construção são expostos no capítulo escrito por William Mitchell (2003) como três investimentos intelectuais. O primeiro seria no desenvolvimento ou obtenção de um código que estabeleça os meios de exploração. O segundo é a derivação dos modelos gerados, independente da complexidade, através do controle de parâmetros. O terceiro é a conversão do modelo para determinado equipamento de fabricação que utilize as instruções

a partir de sistema CAM. Para o autor, as tecnologias CAD/CAM podem contribuir para que o arquiteto explore e encontre caminhos para mundos ainda não acessíveis. De fato, uma parcela da produção contemporânea reflete as ideias mencionadas por Mitchell (2003). Além de arquitetos e escritórios já citados, como Achim Menges, Shigeru Ban, Frank Gehry ou Design-to-Production, é possível adicionar a produção de diversos outros profissionais, como Zaha Hadid, Daniel Libeskind, Greg Lynn, Norman Foster, ou escritórios, como MVRDV, SHoP, UN Studio e BIG.

Simultaneamente, os princípios de racionalização, repetição, modularização e simplificação, estipulados pelas formas de produção em massa tradicionais não são mais essenciais para a viabilização da produção em série. A Era Digital é caracterizada pela fabricação através de equipamentos digitais, sobretudo os de controle numérico, que permitem complexidade, variedade e unicidade, sem comprometer a eficiência dos processos e com um impacto econômico relativamente baixo para a produção. (KOLAREVIC, 2003)

As ideias apresentadas por Nick Dunn (2012), em seu livro *Digital Fabrication in Architecture*, reforçam as afirmações de Mitchell (2003) e Kolarevic (2003). Enquanto as primeiras experimentações com computadores, como ferramentas para o desenvolvimento de projetos arquitetônicos, ocorreram no início da década de 1990, sendo interpretadas como distrações, atualmente, é quase inconcebível a realização de projetos sem a utilização de métodos digitais.

O fato é que a Fabricação Digital se tornou também um mecanismo capaz de garantir maior fluidez entre concepção, desenvolvimento e produção do projeto. As transformações providas a partir dos novos processos de produção permitiram o desenvolvimento e inovação em todos os aspectos da produção do elemento arquitetônico e, consequentemente, permitiram um avanço teórico, conceitual e prático sobre o discurso e proposição da arquitetura (DUNN, 2012).

Além disso, os processos computacionais de projeto permitem maior integração entre diversos profissionais, possibilitando o trabalho simultâneo de arquitetos e engenheiros. Essa mesma lógica deve ser aplicada entre as equipes de projeto e fabricantes de componentes construtivos. Todavia, ao contrário do que ocorre, por exemplo, no setor automotivo, a construção civil e a arquitetura mantêm um fluxo invertido sobre a produção. A indústria é, em geral, uma das últimas participantes do processo, apenas com o papel de executar um projeto desenvolvido por uma equipe multidisciplinar. Esse formato de trabalho pode levar a inconsistências e à

inviabilização da materialização de determinado componente ou obra, pois, em grande parte dos casos, não são consideradas as restrições impostas por equipamentos, técnicas ou procedimentos de fabricação. É necessário repensar o fluxo de projeto, com o objetivo de incorporar as possibilidades e restrições dadas pelos fabricantes desde os estágios iniciais do processo de projeto (KRIEG, 2017).

Huang (2012) indica que os novos processos de produção são vistos como oportunidades para novas propostas arquitetônicas. Porém, também é importante considerar as interferências de montagem como delineadores geométricos. Enquanto a Fabricação Digital e os processos computacionais permitem, ao menos em teoria, a produção quase infinita de variações, a realidade construtiva impõe limitações, com possibilidades finitas. Por exemplo, as relações entre os componentes devem considerar a quantidade e complexidade de conexões que envolvem toda a obra.

4.1. INTELIGÊNCIA DE PROJETO

Em 2002, Michael Speaks (2010) publica seu texto sobre *Design Intelligence* (Inteligência de Projeto, traduzido pelo autor) na revista A+U. Com pouco mais de um ano do atentado de 11 de setembro ao *World Trade Center*, a discussão apresentada gira ao redor das propostas para o novo projeto arquitetônico e urbanístico para o local do incidente. Entretanto, o foco não é relacionado com as possibilidades ou qualidade das propostas, mas sim, sobre um período caracterizado por dinâmicas complexas e aceleradas, que demanda inteligência para solucionar problemas e controlar organizações. O autor discute sobre a inteligência gerada pela e para a competitividade crescente de produtos, mercados e governos.

De acordo com Speaks (2010), uma mudança iniciada pós Segunda Guerra Mundial se tornou muito evidente no início do século XXI, em que o conhecimento deixou de ser aplicado somente sobre ferramentas e produtos, mas também sobre ele próprio. No caso da arquitetura, essa transformação fica evidente nas diferenças das propostas realizadas pelas vanguardas do século XX e as pós-vanguardas do XXI. O período que antecede o fim das Grandes Guerras é marcado pela filosofia como pilar intelectual, enquanto o pós-guerra é caracterizado pela teoria. Como consequência, essas vanguardas estavam embasadas em ideias e conceitos. Por sua vez, as práticas da pós-vanguarda almejam novas oportunidades e a inovação de produtos e processos. O autor ainda explicita que a diferença está, precisamente, no desenvolvimento da Inteligência

de Projeto – a capacidade de aprender e adaptar sistemas às complexidades e instabilidades do século XXI.

Os ideais heroicos e visionários de diversos períodos da arquitetura, com certeza, não pertencem à produção contemporânea. A necessidade pelo desenvolvimento de soluções tangíveis para problemas e pela inovação devem ser as orientações para a arquitetura. E é por isso que a Inteligência de Projeto é tão importante. Apenas solucionar um problema não resulta em algo necessariamente novo e, consequentemente, não é um ato pertencente ao mundo globalizado e competitivo (SPEAKS, 2010). Nesse sentido, o uso de ferramentas e processos digitais podem garantir ao arquiteto o papel de desenvolver novos mecanismos de produção, uma vez que este profissional poderá controlar tod oo processo de projeto, desde a concepção até fabricação e montagem (COKCAN et al, 2016).

Escritórios como o FORM de Greg Lynn e o Objectile de Bernard Cache são utilizados por Speaks (2010) como exemplos para apresentar alguns elementos essenciais para o desenvolvimento de Inteligência de Projeto. Um dos mais destacados é o uso de protótipos como ferramentas de projeto, capazes de retroalimentar o processo e, através de simulações, experimentações e otimizações, em conjunto com a possibilidade de realizar a produção em massa de elementos únicos (Personalização em Massa), é possível gerar Inteligência.

4.1.1. Personalização em Massa

Uma das ideias que relacionam a Fabricação Digital com o desenvolvimento de sistemas inteligentes para a resolução de projetos é a Personalização em Massa, apresentada por Stanley Davis (1989), no artigo *From 'future perfect': Mass customizing*. O termo é referido como um mecanismo capaz de prover produtos e serviços únicos, através de processos rápidos, flexíveis e integrados. Todavia, o autor infere que a utilização da Personalização em Massa demanda uma mudança cultural por parte de todos os envolvidos na cadeia produtiva - desde os projetistas, fabricantes e distribuidores até os consumidores do produto final.

Diversos autores se embasaram no texto de Davis (1989) para discutir a construção de novos paradigmas e a aplicação da personalização em série em áreas específicas. Esse é o caso de Joseph Pine (1993), considerado como um dos grandes responsáveis pela divulgação e disseminação da Personalização em Massa. Em seu livro, *Mass Customization: the new frontier*

in business competition, são destacadas algumas das principais diferenças entre os sistemas tradicionais de produção em série e os sistemas de Personalização em Massa, em que o foco, os objetivos e as características são quase que opostos. Por exemplo, nos sistemas em série, a produção é embasada em demandas estáveis, mercados homogêneos e na eficiência dos processos através da estabilidade e do controle. Por sua vez, os sistemas personalizados visam à produção por demandas fragmentadas, mercados heterogêneos e na variedade dos produtos através de flexibilidade e velocidade.

No artigo de revisão sistemática acerca da Personalização em Massa, Silveira, Borenstein e Fogliatto (2001), apontam diversos autores que possuem visões mais ou menos generalistas sobre o termo. É possível convencionar a definição da Personalização em Massa como uma ideia que envolve todo o processo produtivo, desde a obtenção de matéria-prima até a venda de produtos personalizados para os clientes. A justificativa de sua aplicação, resumida pelos autores, é baseada em três ideias: (1) flexibilidade garantida pelas novas tecnologias de fabricação e construção; (2) aumento da demanda por personalização e; (3) aumento da competitividade de mercado em conjunto com a diminuição do ciclo de vida de produtos.

Kolarevic (2003) sugere que quase todos os segmentos da indústria e da economia foram afetados por essa ideia, de maneiras mais ou menos intensas. No caso da construção civil, a produção de componentes construtivos poderia se embasar na Personalização em Massa para obtenção de soluções otimizadas em termos estruturais, energéticos ou, até mesmo, estéticos. Isso é exemplificado pelo autor através de elementos estruturais que possuem demanda de cargas diferentes e, com a Personalização em Massa, seria possível criar elementos específicos para cada região, sem um grande aumento no custo de produção e diminuição no desperdício de materiais.

Mais especificamente no campo da arquitetura, Efe Gözen (2011) entende que a Personalização em Massa ocorre em dois momentos distintos. Um é marcado pelo resultado do processo de projeto, como um arquivo que contém as informações necessárias para a fabricação de componentes ou da edificação. Outro com relação aos efeitos dos novos processos de produção, que só podem ser verificados ao observar as ferramentas utilizadas pelos profissionais. Entretanto, as ferramentas tradicionais CAD são incompatíveis com os processos e métodos relacionados a esse tipo de produção. Ao mesmo tempo, o nível de Personalização em Massa é indicado pelo nível de interação entre arquitetura e as ferramentas e métodos digitais de projeto.

Somente com o aumento na utilização da potência de processamento computacional, a utilização de sistemas baseados em regras através de algoritmos, aplicação de sistemas generativos e a integração entre as etapas, simulações e avaliações de projeto, é possível alcançar a produção de edificações e componentes construtivos personalizados (GÖZEN, 2011).

Contudo, a Personalização em Massa ainda enfrenta diversos desafios. Mesmo após quinze anos da publicação de 2003, Kolarevic (2018) indica que, apesar do projeto paramétrico permitir inúmeras variações, é fundamental que o arquiteto defina parâmetros com limites claros, a fim de evitar a geração de projetos ruins. Além disso, manipulação de parâmetros geométricos de um projeto devem interagir, em tempo real, com o desempenho e a construtibilidade de um projeto. Outro obstáculo é a avaliação e mensuração de aspectos qualitativos e subjetivos da arquitetura (KOLAREVIC, 2018).

4.1.2. Flexibilidade de Produção

As tecnologias digitais para projeto e fabricação potencializaram a variabilidade de um mesmo produto quase que de forma ilimitada. Em termos mais práticos, o aprimoramento contínuo e a automação dos processos de fabricação, a tendência de diminuição do ciclo de vida dos produtos e o aumento no nível de competitividade e de exigência do mercado global são alguns dos fatores que indicam a importância de se implementar processos de produção e a criação de produtos mais flexíveis. Isso é ainda mais importante em cadeias complexas de produção (como a da Indústria da Construção Civil), para garantir a sustentabilidade econômica a longo prazo (GUSTAVSSON, 1995; TERKAJ, TOLIO e VALENTE, 2009).

Nesse sentido, um conceito discutido desde meados da década de 1980, em especial na área de Engenharia de Produção, é a Flexibilidade de Produção (DE TONI e TONCHIA, 1998). De acordo com Gustavsson (1995), esse conceito deve ser encarado em três instâncias distintas: (a) flexibilidade dos produtos, principalmente alcançada pelo aprimoramento ou disponibilidade de novos componentes; (b) flexibilidade dos sistemas de produção, ocasionada pela introdução de novos equipamentos, tecnologias ou métodos de fabricação, e novo corpo de trabalhadores e; (c) flexibilidade das demandas, que é mais subjetiva e pode estar relacionada com inseguranças do período histórico, flutuações do mercado e alterações nos padrões estéticos do público alvo. O autor ainda indica que a compreensão desses três aspectos, por parte da

indústria, é fundamental para determinar o desafio enfrentado, bem com o intervalo de tempo necessário para solucioná-lo (GUSTAVSSON, 1995).

Por um lado, a Flexibilidade de Produção procura responder às demandas por soluções personalizadas e únicas, utilizando os *Flexible Manufacturing Systems* (FMS ou Sistemas de Fabricação Flexível), que engloba os equipamentos de Fabricação Digital, principalmente diferentes tipos de CNCs. Por outro, a introdução da Flexibilidade de Produção pode implicar em sobrecarga dos recursos financeiros (principalmente por conta do investimento inicial elevado), aumento na complexidade de gerenciamento das operações e, por vezes, a flexibilidade é superdimensionada ou subutilizada (CANTAMESSA e CAPELLO, 2009). Isso é um indicativo de um problema mais profundo, reconhecido por quase todos os autores da área, que considera que quanto maior o nível de Flexibilidade, menor é a Produtividade. E a diminuição da Produtividade, a longo prazo, tende a diminuir a competitividade e aumento de custos (DE TONI e TONCHIA, 1998; TERKAJ, TOLIO e VALENTE, 2009; CANTAMESSA e CAPELLO, 2009).

Logo, é fundamental encontrar um equilíbrio entre Flexibilidade e Produtividade. Nesse sentido, diversas alternativas foram estudadas e implementadas em indústrias ao longo dos anos. Uma das estratégias mais recentes é a adoção dos *Focused Flexibility Manufacturing Systems* (FFMS ou Sistemas de Fabricação Flexível Focada), que se propõe a atender, de maneira mais precisa e pontual, os requerimentos de personalização de produtos ou de processos. Como consequência, há a diminuição da demanda por sistemas altamente flexíveis (e custosos) e ainda garante soluções melhores do que as providas por sistemas convencionais (GUSTAVSSON, 1995; TOLIO e VALENTE, 2007; CANTAMESSA e CAPELLO, 2009).

Mais do que isso, o trabalho conduzido por Cantamessa e Capello (2009) explicita como, na prática, é fundamental compreender esse equilíbrio para a obtenção de resultados positivos em determinado mercado. Os autores reforçam que há um movimento favorável, de indústrias de diversos setores, para a adoção dos FFMS, que são mais viáveis do ponto de vista econômico e permitem um melhor gerenciamento de recursos. Ao comparar essa tendência com os princípios da Personalização em Massa (PINE, 1993), fica implícito que as limitações discutidas por Kolarevic (2018) não se restringem ao universo do projeto de arquitetura, mas são muito mais definidos pelas dinâmicas de mercado e de produção das indústrias. Nesse cenário, talvez sejam alternativas mais viáveis a produção de pequenas séries de um mesmo elemento, uma

quantidade pré-determinada de variações e/ou a produção combinada entre sistemas convencionais rígidos com a flexibilidade provida por tecnologias digitais, em especial relacionado com os equipamentos de Fabricação Digital.

4.1.3. Tolerância Zero?

Em 2014, a *Architectural Design* teve uma edição especial, organizada por Bob Sheil, com o tema *High Definition – Zero Tolerance*, com o objetivo de mostrar como novas práticas arquitetônicas eram possíveis, em decorrência da alta precisão - uma das principais características de diversos equipamentos de Fabricação Digital, com destaque para as CNCs e Braços Robóticos. Para compreender a possibilidade de se produzir elementos com equipamentos de elevada precisão, Nolte e Witt (2014) mencionam que é fundamental a existência de um modelo digital como repositório de informações sobre geometria, materiais, conceitos, regras, processos, fabricação e montagem. Esse acervo, existente em um único documento digital, pode ser testado, simulado e, posteriormente, utilizado para a fabricação através de equipamentos de controle numérico.

A noção de Tolerância Zero pode ser interpretada de formas variadas. É possível associar esse termo com a precisão dos equipamentos, que apresentam erros em frações de milímetros. A elevada precisão demanda arquivos digitais que contenham alto nível de detalhamento e especificação, principalmente em questões geométricas e de materiais (NOLTE e WITT, 2014). Todavia, o contraponto apresentado por Kolarevic (2014) indica que os equipamentos de alta precisão não implicam, necessariamente, em uma arquitetura de Tolerância Zero ou de precisão absoluta. Para o autor, a precisão é importante para a arquitetura, porém, a busca por medidas absolutas não é produtiva nem efetiva, de méritos questionáveis e desnecessários. A escala de trabalho do arquiteto é maior e mais complexa do que a de grande parte de outras indústrias. Os diferentes componentes construtivos, por exemplo, reagem de forma diferente sob condições ambientais e estruturais específicas, o que implica em tolerar variações, imperfeições, deformações e, consequentemente, a precisão dos elementos.

> Imperfeições e inerente variabilidade - os "erros" - são um fato da vida no confuso mundo da construção. Elas nunca irão desaparecer do ato de projetar e produzir arquitetura. No entanto, “o princípio da Tolerância Zero”, conforme observado por Gaynor e Singleton, é “implacável ao erro”. Eles estão

> absolutamente certos sobre isso: a tolerância zero não pertence ao vocabulário da arquitetura (KOLAREVIC, 2014, p. 132. Traduzido pelo autor).

Tendo como horizonte a aplicação por ferramentas digitais de projeto e fabricação, nota-se que, ao menos em um ambiente virtual, a Tolerância Zero expressa um potencial para eliminar todo tipo de imperfeição e para incorporar a precisão absoluta. Contudo, essa compreensão parece se limitar, justamente, ao mundo virtual. No universo da materialidade, do esforço físico, das condições climáticas variadas e da escala da construção civil, pequenos ajustes, folgas e espaços podem ser bem-vindos e, muitas vezes, são essenciais. Mais do que isso, a própria relação entre a Tolerância Zero e a ideia de Fabricação Digital parece ser incoerente. Por maior que seja a precisão dos equipamentos, ela não é absoluta e materiais não são perfeitos. De tempos em tempos, é necessário recalibrar, recalcular e replanejar o processo de produção. Nesse sentido, a ideia de uma "Tolerância Quase-Zero" parece ser mais interessante, entendendo esse conceito como uma forma de incorporar as pequenas variações, os ajustes e os erros como variáveis em todos os processos da construção civil, desde o projeto até a finalização e uso da obra.

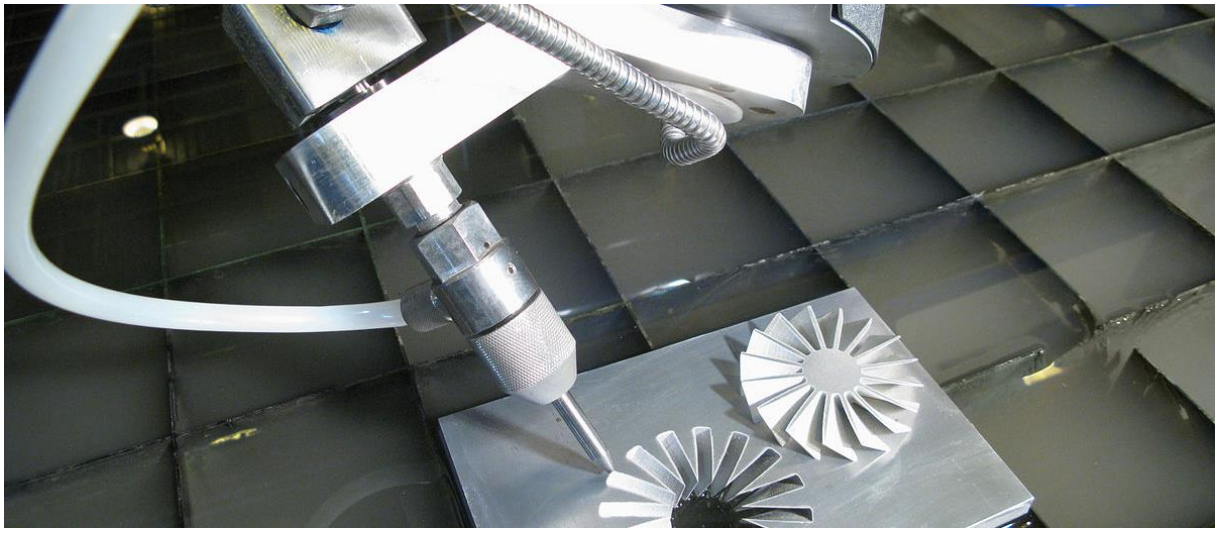
4.2. TECNOLOGIAS CAD/CAM

As tecnologias de *Computer-Aided Design* (CAD) e *Computer-Aided Manufacturing* (CAM) foram e ainda são elementos importantes para o desenvolvimento dos novos processos que permeiam a arquitetura. No livro *Digital Fabrications*, Lisa Iwamoto (2009) aponta que as tecnologias CAD e CAM estão presentes nas indústrias automotivas e aeroespaciais há quase meio século. No caso da arquitetura, é possível considerar que a obra de 1989, do *Disney Concert Hall,* projetado por Frank Gehry é o primeiro marco de aplicação das tecnologias digitais para a produção de um edifício.

De modo geral, a tecnologia CAD possibilita trabalhar com informações bidimensionais e tridimensionais, virtualmente (modelos digitais), durante o processo de projeto. Trata-se de um conjunto de ferramentas e técnicas computacionais que têm como objetivo a representação de objetos, imbuída de capacidades como modelar formas complexas, realizar análises formais, estruturais, ou de interferências entre os componentes de projeto, aplicação de sistemas de regras ou utilização de parâmetros para definição de elementos. Já a tecnologia CAM tem a capacidade de interpretar tais informações, transformando-as em códigos que são interpretados por equipamentos específicos, com a função de materializar, fisicamente, o elemento. São

considerados os equipamentos de controle numérico, capazes de realizar diversas operações para a conformação do material (como o fresamento e o torneamento) e que possuem variabilidade, entre 2,5 e 9 eixos de movimentação (Figura 13). Duas das principais características destes equipamentos são a elevada precisão e a possibilidade de variação durante a produção (SOUZA e COELHO, 2003). Mais recentemente, algumas experiências utilizam braços robóticos para auxiliar na montagem das obras, aumentando consideravelmente a precisão da geometria final e a velocidade, sendo está a última etapa de automação do ciclo da construção (GRAMAZIO, KOHLER e OESTERLE, 2010; KOHLHAMMER et al, 2017; VOLKER et al, 2017).

Figura 13: Equipamento de corte por jato de água, exemplo de um CNC de cinco eixos.



Fonte: Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:5-Axis-Waterjet-Cutting-Head.jpg>. Autor: WARDJet. Licença: CC 3.0. Acesso em: 13 de maio de 2021.

De acordo com Neto (2013), as ferramentas CAD possibilitam a criação e desenvolvimento das informações gráficas do projeto em modelos virtuais bi ou tridimensionais, enquanto as CAM viabilizam as novas formas de fabricação e montagem de elementos ou edificações, através da interpretação dos projetos gerados em mídias digitais.

Os sistemas CAD foram desenvolvidos, inicialmente, como uma forma de computadorizar processos analógicos, transferindo a base de trabalho da prancheta para uma interface digital. Todavia, a evolução dessa tecnologia gerou novas ferramentas que estão diretamente associadas com a ideia do Design Computacional (MENGES, 2010), principalmente pelas características

de modelagem utilizando informação e parametrização. O termo CAD abrange um leque muito grande de softwares que, apesar de apresentarem características semelhantes, diferem muito em aplicações e especificações. Por isso, é importante considerar subdivisões do termo, explicitando sua forma de aplicação: modelagem tridimensional, paramétrico, generativo ou algorítmico (DUNN, 2012).

Conforme o capítulo de Burry (2003), ainda no livro *Architecture in the Digital Age*, o projeto elaborado a partir de parâmetros possui a capacidade de adaptação e aprimoramento de diversos aspectos, considerando restrições e constrições, da arquitetura. Além disso, o desenvolvimento de sistemas paramétricos para o projeto possibilita que o arquiteto atinja resultados mais refinados e comprometidos com o propósito de seu trabalho. Um dos principais argumentos para a utilização de ferramentas CAD com a função de desenvolver sistemas, algorítmicos, paramétricos e/ou generativos é o fato de permitirem que o arquiteto possa rever, reordenar e retrabalhar as decisões tomadas. Uma das definições mais recentes que também distingue o projeto paramétrico da modelagem algorítmica é feita por Leach (2014):

> Contudo, no campo específico do projeto de arquitetura contemporâneo, em geral refere-se à utilização de software de modelagem paramétrica. Em contraste com os pacotes de software padrão, baseados em dados geométricos de objetos, o software paramétrico vincula dimensões e parâmetros à geometria, permitindo assim o ajuste incremental de uma parte que afeta toda a montagem. [...] Entretanto, no campo do projeto digital, refere-se especificamente ao uso de linguagens de programação que permitem que o projetista vá além das limitações da interface do usuário, e projete por meio da manipulação direta não da forma, mas do código (LEACH, 2014, p. 2 – 3. Traduzido pelo autor).

A utilização de sistemas algorítmicos para o desenvolvimento de projetos permite que o arquiteto encontre soluções estratégicas para problemas definidos em termos lógicos. Também permitem a exploração de soluções que seriam inconcebíveis em um primeiro momento, através de simulações e processos evolutivos. Ao comparar métodos tradicionais de projeto com o desenvolvimento de projetos através de sistemas paramétricos, Dunn (2012) afirma que há um investimento inicial de tempo muito maior nos novos processos, dada a necessidade de englobar todas as relações desejadas entre os elementos do projeto. Porém, ao revisitar e explorar as

soluções possíveis, em estágios posteriores do processo de projeto, há uma economia considerável de tempo.

Em outras palavras, uma das principais formas de perceber as novas possibilidades é através da diferenciação entre os processos Computadorizados e os Computacionais. Um se refere à transposição direta de processos analógicos para os meios digitais, alterando a plataforma de trabalho, mas sem grandes modificações sobre os métodos de projeto, podendo ser exemplificado pela utilização de sistemas CAD como "pranchetas" digitais. Outro é referente à utilização do poder de processamento dos computadores para o desenvolvimento do projeto arquitetônico. Os processos Computacionais utilizam algoritmos, parametrizações, simulações e prototipagem para conceber possibilidades e encontrar soluções que seriam praticamente inviáveis de outra forma (MENGES, 2010).

Por sua vez, Yessios (2003) afirma que técnicas computacionais (e não computadorizadas) permitem que os arquitetos explorem formas e possibilidades que vão muito além ou até mesmo que seriam impossíveis de serem alcançadas através de meios analógicos ou computadorizados. Na realidade, a utilização de sistemas algorítmicos, paramétricos, generativos pode impulsionar certo tipo de criatividade, definida pelo autor como Criatividade Artificial. Nesse sentido, a tecnologia CAM tem um papel fundamental no desenvolvimento de novas soluções de projeto, pois permite a produção de formas complexas e de protótipos físicos, a partir de modelos digitais associados a equipamentos controlados por computador, de maneira muito mais rápida e precisa do que através de métodos tradicionais. A manufatura através de equipamentos digitais foi muito além das expectativas iniciais, porém, é também uma área que ainda pode alcançar resultados ainda mais impressionantes e em escala cada vez maior (YESSIOS, 2003).

De modo geral, os métodos de Fabricação Digital podem ser divididos em dois grandes grupos com utilizações e definições específicas. Entretanto, ambos apresentam uma característica semelhante que influência toda a produção: após o início do processo de fabricação, o projetista tem pouco ou nenhum controle sobre a ferramenta. Isso significa que todo o projeto de usinagem deve ser bem definido nos softwares CAM, que fazem a interface entre modelo digital e equipamento (SEELY, 2004).

O primeiro grupo é referente aos processos aditivos que funcionam através da deposição de materiais, camada a camada, até formar um elemento tridimensional. De acordo com Hauschild

e Karzel (2011), existem diversas técnicas que utilizam esse tipo de procedimento, sendo os procedimentos mais conhecidos: *CNC precast concrete parts*, *Multi-jet modelling* (MJM), *3D Printing*, *Fused Deposition Modelling* (FDM), *Selective Laser Sintering* (SLS), *Stereolitography* (STL), *Countor Crafting* (CC), *Robot-Based Layering*.

O segundo grupo é referente aos processos subtrativos e que apresentam uma série de subdivisões de tipos de procedimentos, como remoção, clivagem, fresagem e usinagem, e que dependem, em geral, das ferramentas associadas aos equipamentos (como fresas, serras ou laser). Ainda conforme Hauschild e Karzel (2011), alguns tipos de equipamentos são mais eficientes para determinado procedimento do que outros, sendo responsabilidade do projetista atentar ao custo-benefício de cada situação. O funcionamento dos equipamentos de controle numérico é explicado por Dunn (2012) como uma série de processos capazes de interpretar a informação digital através de um código. Este contém instruções e coordenadas sobre as etapas de produção de determinado elemento, planejadas em sistema CAM. De modo geral, os procedimentos mais utilizados nesse tipo de processo são: *CNC Punching, Lasering, Water Jet* (puro ou abrasivo), *Nibbling*, *Plasma Cutting*, *Milling* (de dois a cinco eixos)*, Robotic Lasering* (multi-axial, no mínimo com sete eixos).

Para a produção de elementos tridimensionais, é utilizado um arquivo 3D, em geral em formato STL. O sistema CAM é capaz de controlar os parâmetros da ferramenta e do equipamento que será utilizado, como a velocidade de rotação e de caminho, ângulo de entrada no material (dependendo do número de eixos) e profundidade de perfuração por passo. Além dos ajustes feitos em software, o correto posicionamento do material na mesa de fresagem é fundamental para garantir elevada precisão. No caso específico de construções e componentes de madeira, os equipamentos CNC de cinco eixos são reconhecidos como os que permitem maior variação, pelo menos dentre os processos subtrativos (HAUSCHILD e KARZEL, 2011).

Há outras duas categorias que podem ser associadas à Fabricação Digital. Uma é relacionada aos procedimentos transformativos que têm o enfoque na otimização das condições iniciais do material. Por exemplo, os processos de conformação, como a calandragem realizada por CNC nas peças que compõem a fachada do *Guggenheim* de Bilbao. A outra é referente aos processos de junção de componentes da edificação. Contudo, o nível de automação para montagem na arquitetura não é grande o suficiente para a execução, de forma economicamente viável para a aplicação desse tipo de processo (HAUSCHILD e KARZEL, 2011).

4.2.1. Materialidade como parâmetro para fabricação

As propriedades e tecnologias dos materiais também são de grande importância para a viabilização da Fabricação Digital como método de produção industrial, como pode ser observado no livro *Material Strategies in Digital Fabrication*, de Christopher Beorkrem (2013). De acordo com o autor, o processo de projeto com enfoque nas restrições e especificidades dos materiais teria o potencial de garantir a conectividade entre sustentabilidade ambiental, modelagem paramétrica e fabricação por equipamentos de controle numérico. Em outras palavras, as características dos materiais podem ser utilizadas como parâmetros de desempenho ambiental e estrutural, sendo uma fonte primária de constrições fundamentais para o processo de projeto paramétrico ou algorítmico. A preocupação com as propriedades dos materiais pode ser aliada a aspectos formais e estéticos, permitindo a exploração de novas relações geométricas.

> A seleção de materiais pode ser baseada em uma variedade de escolhas. Frequentemente, os arquitetos selecionam materiais de acordo com sua vida útil, qualidades fenomenológicas ou pela flexibilidade de seus detalhes ou conexões. Todavia, o detalhe da conexão é o mais crucial para a flexibilidade de um sistema e para a estética de formas arquitetônicas complexas. De um simples prego a um encaixe personalizado, o detalhe da conexão contém as informações para delimitar a articulação e o desempenho de um sistema (BEORKREM, 2013, p. 09. Traduzido pelo autor).

No livro *Fabricating the Future*, Philip Yuan e Neil Leach (2012) discutem como a mudança nos métodos produtivos impactou no desenvolvimento de novos materiais, gerando um paradigma de materiais (multidimensionais e/ou compostos) que só podem ser trabalhados a partir de equipamentos de Fabricação Digital. Isso começou a abrir caminho para a atuação de novos profissionais, considerados como "*CNC Craftsmen*" – muito semelhantes aos descritos por Oxman e Oxman (2010).

O conhecimento sobre as ferramentas digitais e as propriedades dos materiais é fundamentalmente diferente, principalmente no âmbito das interações entre equipamento e material. Nesse sentido, a interpretação das características restritivas dos materiais como parâmetros geométricos ou variáveis numéricas é uma das formas de suprir lacunas nos novos métodos de produção. De modo geral, existem quatro softwares mais conhecidos, que são

capazes de realizar o mapeamento paramétrico dessas informações: *Digital Project*, da Gehry Technologies; *Rhinoceros* em conjunto com *Grasshopper*, desenvolvido pela Robert McNeel and Associates'; *Generative Components*, elaborado pela Bentley Systems, Inc.; e mais recentemente o *Dynamo* aliado ao *Revit*, da Autodesk (BEORKREM, 2013).

Conforme Yuan e Leach (2012), diversas abordagens contemporâneas sobre o uso de ferramentas, métodos e processos digitais em arquitetura podem ser entendidas como poéticas, uma vez que o foco é a criação de geometrias complexas e obras icônicas. Todavia, países em desenvolvimento, como a China e o Brasil, podem utilizar essas tecnologias para a resolução de problemas relativos à construção e à realidade econômica do país. O produto gerado por sistemas paramétricos e algorítmicos é um aglomerado de informações bem definidas, que impacta não apenas na forma de atuação dos profissionais da construção civil, mas também altera os processos produtivos e as formas tradicionais de técnicas e de aplicação de materiais.

4.2.2. Prototipagem rápida e desenvolvimento de produtos

As abordagens sobre o processo de inovação, de modo semelhante ao contido na Inteligência de Projeto, são discutidas por diversos autores, com variações de termos ou nomenclaturas. No primeiro capítulo do livro Prototipagem Rápida, Neri Volpato e Jonas de Carvalho (2007) tratam desse tema a partir do Processo de Desenvolvimento de Produto (PDP) e a importância da prototipagem rápida como mecanismo de auxílio para a inovação. Os autores afirmam que a utilização de protótipos físicos é imprescindível para melhorar a comunicação e a qualidade do produto, ao mesmo tempo em que reduzem a possibilidade de falhas e o tempo total de desenvolvimento. A aplicação de protótipos como ferramentas de desenvolvimento permite análises físicas sobre forma e funcionalidade através da Fabricação Digital

Para isso, a utilização de ferramentas computacionais CAD e CAM são essenciais para auxiliar o desenvolvimento. Volpato, Ferreira e Vasconcelos (2007) apontam que para um produto ser bem-sucedido, é necessário que as empresas consigam identificar as necessidades dos clientes e sejam capazes de desenvolver, rapidamente, uma solução a um custo competitivo. De modo geral, o PDP é formado por uma coletânea de estágios que demandam maneiras variadas da representação física do produto.

Nas fases iniciais do PDP, as principais formas de representação tridimensional sugeridas por Volpato, Ferreira e Vasconcelos (2007) são através da produção de 1) Maquetes Experimentais, Analógicas ou Didáticas; 2) Modelos Volumétricos; 3) Mock-ups e; 4) Modelos de Apresentação ou Demonstração. As fases mais avançadas do PDP, considerando o detalhamento do produto, utiliza 5) Protótipos Físicos ou Visuais – Prova de conceito; 6) Protótipo Analítico ou Virtual; 7) Protótipo Parcial e; 8) Protótipo Completo ou Funcional.

É possível afirmar que os quatro primeiros métodos podem ser considerados como mais ágeis e com o objetivo de delimitar os principais problemas, as limitações e as formas de abordagem do problema e de possíveis ideias iniciais. Os quatro últimos são referentes ao processo de aprimoramento e refinamento no grau de desenvolvimento e complexidade do produto. A utilização de protótipos permite a obtenção de resultados mais condizentes com a realidade através de simulações físicas ou digitais (VOLPATO, FERREIRA e VASCONCELOS, 2007).

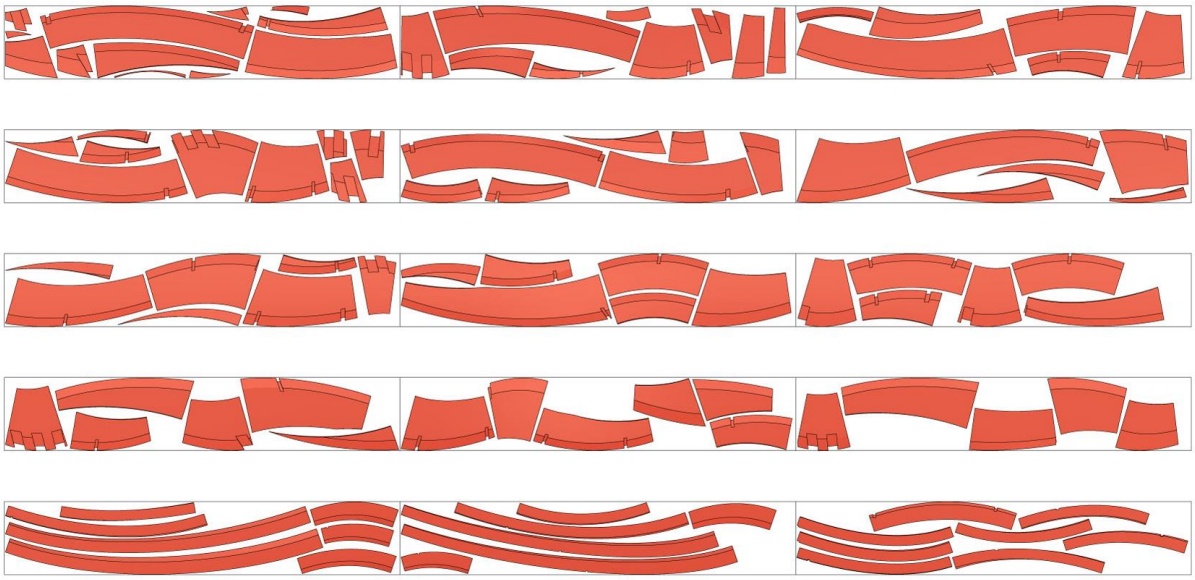
Dos principais ganhos notados por Volpato, Ferreira e Vasconcelos (2007), as representações do PDP garantem: aprimoramento no processo de aprendizagem; melhoria na comunicação e compartilhamento de ideias; maior integração entre os envolvidos com o desenvolvimento do produto, uma vez que utilizam o mesmo objeto como referência; maior facilidade para a identificação de erros; atuam como marcos ou conquistas do projeto; retroalimentação e formas de comparação através do *redesign*; auxílio na publicidade, vendas e pesquisas de mercado; redução do tempo e de custos; redução dos riscos de inovação e; diminuição do retrabalho.

4.3. SÍNTESE

A compreensão e o domínio de ferramentas de projeto e construção, por parte dos arquitetos, pode ser considerada como uma obrigação profissional histórica. Isso é perceptível na discussão sobre a forma do Detalhe Arquitetônico, uma vez que há uma relação intrínseca entre sua produção e a disponibilidade de tecnologias. Para Neufert (2013), por exemplo, é necessário que o arquiteto saiba as dimensões das folhas, enquanto Ching (2011) menciona a importância das diferenças espessuras de grafite. Esse profundo conhecimento sobre a tecnologia deve ser transposto para a produção contemporânea. As tecnologias digitais exigem do arquiteto o domínio não mais só sobre arquitetura, mas também programação, desempenho estrutural (DIMČIĆ, 2011), conforto ambiental e sustentabilidade. Os equipamentos de Fabricação Digital requerem outro tipo de desenho (Figura 14): um que não é apenas de representação, mas

sim de produção, que deve contemplar as restrições e as estratégias mais econômicas para a fabricação e montagem. A folha A1 se torna uma chapa, de determinado material que será usinada, enquanto o grafite pode ser entendido como o tipo de fresa utilizado para a fabricação.

Figura 14: Desenhos para fabricação de elementos do Paneum – Wunderkammer des Brotes, feito pelo escritório Design-to-Production.



Fonte: Disponível em: <https://www.designtoproduction.com/en/>. Autor: Design-to-Production. Acesso em: 13 de maio de 2021.

Além disso, as prototipagens digital e física se tornaram importantes facilitadores do processo de projeto. Desde o início do século XXI, processos algorítmicos e paramétricos de projeto estão vinculados a obtenção de soluções inovadoras de projeto (KILIAN, 2006). É possível afirmar que as tecnologias digitais romperam com a lógica da produção estandardizada. Ao invés da produção em massa de artefatos padronizados, deve-se considerar a fabricação através da Personalização em Massa, gerando elementos altamente variáveis ou únicos, com a possibilidade de visar a otimização energética e estrutural, juntamente com decisões estéticas e de projeto. Os novos processos de produção dependem de inteligência baseada em regras, de simulações e estruturas mentais para o desenvolvimento de novos sistemas que solucionem, da maneira mais eficiente, problemas específicos (DUNN, 2012).

Em 1966, durante uma palestra, Cedric Price (1934 – 2003) profere sua célebre frase, "*Technology is the answer. But what is the question?*" ("Tecnologia é a resposta. Mas, qual é a

pergunta?". Traduzido pelo autor). No cerne desta questão, havia uma preocupação sobre a importância de se repensar o uso da tecnologia – um convite para fazer seu uso de forma consciente. Nas décadas seguintes, a indagação de Price é reforçada por diversos autores e passa a ser manifestada de formas distintas. Oxman e Oxman (2010) demonstram uma preocupação muito similar no Novo Estruturalismo, Speaks (2010) discute a função da tecnologia dentro do seu conceito de Inteligência de Projeto e Menges (2010) incorpora o poder tecnológico na noção de Design Computacional. Apesar dos focos diferentes, esses e tantos outros autores compreenderam que a tecnologia deve ser usada como um meio para se obter soluções mais inteligentes e sustentáveis, e não um fim. O arquiteto não deve ser refém da tecnologia, mas deve ser aquele que a domina, tanto para lidar com complexidades geométricas, estruturais, formais, sociais e ambientais, como para solucionar problemas que, até então, pareciam ser indecifráveis. E é dessa forma que a tecnologia é encarada nesta pesquisa.

5. ESTRUTURAS RECÍPROCAS: CLASSE DE PROBLEMAS

> *Embora a estrutura seja apenas um dentre a multidão de fatores que, por vezes de formas opostas, influenciam o projeto de uma construção, há instâncias em que a estrutura se torna parte da narrativa geral, da forma e da expressão arquitetônica. Mais importante, quando conforma e faz parte da composição harmoniosa que classificamos como arquitetura, ela é um fator influente que, em menor ou maior grau, determina o nível de sucesso de um projeto.*
>
> *LARSEN, Olga Popovic*[8].

Conforme já mencionado, o desenvolvimento desta pesquisa é relacionado com temas multidisciplinares que são englobados pelas ER. Alguns exemplos são os projetos *Sukiya Yu House* de Kazuhiro Ishii; *Torikabuto – the Life Science Laboratory* de Yoichi Kan e *Stonemason Museum* de Yasufumi Kijima. Para embasar importância desta pesquisa e propor contribuições científicas significativas, é essencial que se apresente o cenário em que a classe de problemas desta tese se insere. Isto é, apresentar uma visão global e detalhada sobre o estado da arte das ERs. Com esse objetivo, foi feita uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), tendo um artigo publicado no periódico Ambiente Construído[9].

Além da RSL, foi feita uma busca nos seguintes sites que disponibilizam plug-ins para auxiliar o processo de projeto em arquitetura e engenharia civil: *grasshopper3d.com; github.com* e; *food4rhino.com*. Foram encontrados dois plug-ins para Grasshopper que contém componentes para a geração de ERs.

---

[8] LARSEN, Olga Popovic. Postscript. In: **Reciprocal Frame Architecture**. New York: Architectural Press, 2008, p. 185. Traduzido pelo autor.

[9] Originalmente foram analisados artigos publicados até o ano de 2018. Dessa forma, publicações feitas entre o início de 2019 até maio de 2021 foram acrescentadas somente na tese. Também foram acrescentadas informações históricas. O artigo está devidamente referenciado e a permissão de reprodução é encontrada no Apêndice III.

a) Kangaroo Physics v. 0.099 (PIKER, 2014): trata-se de uma versão mais antiga do plug-in conhecido apenas como Kangaroo, que atualmente é integrado ao Rhino 6 e 7 e é definido como uma *engine* (motor) de física em tempo real usado para simulações estruturais e *form-finding* funicular. Contudo, a versão 0.099 de 2014 foi a última que continha algum tipo de solução para ERs. Nesta, havia o componente *Reciprocal Structure*, que gerava padrões pela rotação das linhas de uma malha, mas os resultados eram bastante limitados e muitas vezes eram inconsistentes ou incoerentes.

b) NGon v. 2.4.5 (VESTARTAS e RAD, 2021): Esta versão do plug-in é de fevereiro de 2021, porém, as primeiras versões encontradas eram do final de 2018. Trata-se de uma ferramenta para processamento de malhas e projeto de estruturas com encaixes de madeira. Na versão mais recente, alguns componentes para a geração de ERs com encaixes e por sobreposição em diversos padrões foram implementadas, mas que ainda demandam diversas adaptações para a utilização na pesquisa. Tanto esse plug-in como as ferramentas que serão mencionadas na RSL sugerem que diversas novas propostas para a implementação paramétrica de ERs devem surgir nos próximos anos.

5.1. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA E IDENTIFICAÇÃO DE PONTOS CRÍTICOS PARA PROJETO E PRODUÇÃO

CASTRIOTTO, C. M.; CELANI, G.; SILVA, F. T. Estruturas recíprocas: revisão sistemática da literatura e identificação de pontos críticos para projeto e produção. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p 375 – 393, out./dez. 2020.

Alguns sistemas construtivos muito antigos tinham o propósito de solucionar as limitações técnicas dos materiais e das tecnologias disponíveis. As *Reciprocal Frames* (Estruturas Recíprocas – ERs. Traduzido pelos autores), por exemplo, possibilitavam a construção rápida de abrigos e de coberturas com grandes vãos, com alguma complexidade geométrica. Historicamente, uma das vantagens da utilização desse sistema é o emprego de elementos lineares de pequena dimensão, originalmente em madeira, gerando uma composição estrutural em que cada elemento individual sustenta e é sustentado por outros elementos.

As primeiras ERs são datadas do período Neolítico, em cabanas primitivas (LARSEN, 2008), sendo observadas ao longo da história em diferentes momentos, como em uma ponte sobre o

Rio Reno feita durante o Império Romano (LARSEN, 2014; PUGNALE e SASSONE, 2014). No século XII elas foram encontradas na arquitetura oriental, em coberturas conhecidas como *mandala roofs* e no século XIII surgiram as primeiras ERs na Europa, projetadas por Villard de Honnecourt. No final do século XV Leonardo da Vinci desenvolveu esquemas para construções de pontes (Figura 15) com esse sistema estrutural, enquanto Sebastiano Serlio explicitou a possibilidade de se obter vãos maiores com a utilização de ERs (KOHLHAMMER e KOTNIK, 2011; PUGNALE e SASSONE, 2014). A origem do termo ER não é bem definida, alguns autores atribuem ao monge budista Chogen, porém, sua definição mais contemporânea foi feita por Graham Brown (LARSEN, 2008).

Figura 15: Sistema estrutural conhecido como ponte de Da Vinci, baseado nos princípios das ERs e concebido por Leonardo da Vinci, no século XV.

Fonte: Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Da_vinci_bridge.jpg>. Autor: Flominator. Licença: CC 3. Acesso em: 21 de janeiro de 2020.

Entre os séculos XVII e XVIII foram obtidos avanços significativos sobre os métodos de cálculo estrutural (como desdobramento do surgimento do cálculo diferencial). A partir da Revolução Industrial, no século XIX, foram desenvolvidos novos materiais estruturais, tais como o aço e o cimento Portland. Nesse mesmo período os produtos de madeira passaram por um processo de estandardização e produção em massa. Com isso, surge também um novo interesse pelas ERs. Com a premissa de economizar madeira, surge a ideia da cobertura *Zollbau-Lamella*, que foi amplamente utilizada entre 1920 e 1940, tanto na Europa como na América. Um dos principais expoentes desse período foi Friedrich Zollinger, responsável pela criação das ERs do tipo Zollinger (Figura 16) (WINTER e RUG, 1992).

Figura 16: ER Zollinger utilizada na cobertura da estação de transferência entre metrô e trem de Nørrebro, na Dinamarca.

Fonte: Acervo pessoal, 2020.

Uma das primeiras experiências na aplicação desse sistema ocorreu em 1904, através da reinterpretação do sistema de elementos compostos, utilizado por Philibert De l'Orme durante o século XV. Foi desenvolvida uma geometria tridimensional, constituída por uma rede em losango aplicada sobre uma superfície curva. Todavia, essa tentativa de aplicação não foi bem sucedida, uma vez que as conexões não eram resistentes aos momentos, ocasionando grandes deformações na estrutura. Até conseguir a patente de seu sistema, Friedrich Zollinger continuou aprimorando a geometria e as conexões, e seu sistema foi amplamente utilizado na Alemanha, na primeira metade do século XX (TOUSSAINT, 2007). Do ponto de vista econômico, o Sistema Zollinger apresentou qualidades expressivas, sobretudo quando comparado aos sistemas tradicionais de cobertura. Os elementos eram fáceis de ser fabricados, com uma redução de 50% sobre o consumo de material e a construção era 40% mais rápida do que a de telhados tradicionais (WINTER e RUG, 1992).

A criação do Sistema Zollinger abriu novas formas de explorar a composição de Estruturas Recíprocas. Engenheiros e arquitetos investiram nesse tipo de sistema como uma possível solução para a economia de materiais e com o intuito de propor formas inovadoras, além da

contínua tentativa de resolver os problemas de estabilidade nas regiões de encontro. Em 1925, por exemplo, Otto Bartning utiliza o sistema desenvolvido por Zollinger como base para a construção da cúpula do Pavilhão de Exibições em Milão. Todavia, Bartning substituiu a madeira pelo aço, obtendo conexões mais rígidas e com melhor desempenho estrutural.

Ainda na década de 1920, Emil Mauritz Hünnebeck explorava formas de aprimorar o sistema Zollinger quando propôs, em 1927, uma solução em aço, que ficou conhecida como sistema Hünnebeck (Figura 17) (WELLER, TASCHE e BAATZ, 2009). Por sua vez, Hugo Junkers submete a patente de seu próprio sistema em 1925, que apesar de ser muito semelhante ao Zollinger, apresenta duas grandes diferenças: visa especificamente a construção em aço e possui conexões rígidas em todas as direções (WELLER, TASCHE e BAATZ, 2009). Outros exemplos de aplicação de ER em aço, durante a primeira metade do século XX, são os hangares em Orvieto, projetados por Pier Luigi Nervi e destruídos durante a Segunda Guerra Mundial e a Copenhagen School of Architecture (LARSEN, 2014).

Figura 17: ER Hünnebeck utilizada na cobertura da cantina da KADK, na Dinamarca.

Fonte: Disponível em: < https://www.vla.dk/wp-content/uploads/2017/08/T6A7707-1-Edit-Edit.jpg>. Autor: Vilhelm Lauritzen. Architects Acesso em: 21 de dezembro de 2020.

Mais especificamente no caso do Brasil, Cesar (1991) e Calil Junior e Brito (2017), indicam que os primeiros registros de ERs (sob a perspectiva da *Zollbau-Lamella*), são observados em algumas das estruturas construídas pela empresa HAUFF (fundada por Erwin Hauff), entre as décadas de 1920 e 1960. Para esses autores, uma das principais características das ERs feitas pela HAUFF era uma elevada eficiência do ponto de vista do desempenho estrutural, garantida

pela construção com elementos lamelares. Inclusive, essas aplicações popularizaram o nome estruturas lamelares como sinônimo de ERs no Brasil. Observa-se um elevado grau de semelhança entre as estruturas construídas pela empresa HAUFF e o sistema desenvolvido por Zollinger.

A partir da segunda metade do século XX até o início do século XXI, diversas experiências retomaram os sistemas em estruturas recíprocas, principalmente como reflexo das possibilidades geradas pelas tecnologias e pelos processos digitais. Tal fato pode ser ilustrado pela criação de mais de 22 patentes, entre os anos de 1965 e 2012, que sugerem alguma solução para esse tipo de estrutura (PUGNALE e SASSONE, 2014). Simultaneamente, o desenvolvimento científico acerca dessas estruturas permitiu abordagens mais sistemáticas e profundas, inclusive com a criação do termo Nexorade (BAVEREL *et al,* 2000).

Isso resultou em inovações sobre os aspectos geométricos, os elementos compositivos, as condições estruturais e a forma de emprego dos materiais. Nesse período surgem os primeiros protótipos compostos por elementos bidimensionais, com maior domínio sobre as condições estruturais e o aprimoramento nos sistemas de conexão entre as partes. Isso é exemplificado por protótipos desenvolvidos por Nabaei e Weinand (2011), Kohlhammer et al, (2014) e Araullo e Haeusler (2017). Ao mesmo tempo, projetos como o hall de exibições do Bunraku Theatre Complex, projetado por Kazuhiro Ishii; o Forest Park Pavilion e o Bamboo Pavilion, projetados por Shigeru Ban; o abrigo arqueológico de Bibracte, de Paul Andreu, Bernard Vaudeville e Simon Aubry; e o Mount Rokko-Shidare Observatory, elaborado por Hiroshi Sambuichi e Ove Arup and Partners, são alguns dos exemplos que ilustram a produção contemporânea (GELEZ, AUBRY e VAUDEVILLE, 2011a; KOHLHAMMER e KOTNKI, 2011; LARSEN, 2014).

Diante da possibilidade de uso de ferramentas computacionais (paramétricas e algorítmicas) e equipamentos de controle numérico, surge novamente o interesse em explorar essas estruturas. Alguns autores têm demonstrado como é possível produzi-las com geometrias complexas em projetos personalizados. Essas inovações estão muitas vezes ligadas à possibilidade de solucionar problemas antigos graças aos avanços tecnológicos e científicos. Paralelamente, duas das principais características da arquitetura contemporânea são a sustentabilidade e a complexidade formal. Nesse contexto, as ERs em madeira ganham destaque, uma vez que além do potencial estético faz uso de um material de origem renovável, de baixo impacto ambiental e que pode ser beneficiado pelo uso de tecnologias digitais de projeto, fabricação e montagem.

Em suma, existem diversas possibilidades ainda inexploradas de aplicação das estruturas recíprocas. Por isso, faz-se necessária uma revisão sobre o tema. Com esse objetivo, este artigo apresenta uma revisão sistemática da literatura sobre estruturas recíprocas em madeira. Como resultado, espera-se identificar lacunas que permanecem e que podem, potencialmente, ser solucionadas com o uso de recursos digitais.

5.2. PROCEDIMENTOS

A utilização da revisão sistemática da literatura (RSL) é uma forma de identificar, avaliar, analisar e interpretar publicações de pesquisas relevantes que estejam relacionadas com determinado tópico, questão, fenômeno ou nicho. Os resultados encontrados permitem uma visão ampla e fundamentada sobre a área de análise, sendo um mecanismo de problematização e argumentação de pesquisa (DRESCH, LACERDA e ANTUNES JÚNIOR, 2015). Para a realização desta RSL, foram adotadas as seguintes etapas, sugeridas por Kitchenham (2004) e utilizadas por Machado e Ruschel (2018):

a) planejamento: definição dos mecanismos e encadeamentos de busca;
b) condução: aplicação de critérios de filtragem da busca;
c) comunicação: quantificação e sintetização dos resultados obtidos.

5.2.1. Planejamento

O planejamento para a realização da RSL foi construído a partir de um encadeamento das seguintes questões (KITCHENHAM, 2004; MACHADO e RUSCHEL, 2018):

a) Qual a relevância do tema?
b) Quais são as questões de pesquisa?
c) Qual o objetivo da RSL?
d) Quais as estratégias de busca?
e) Quais bases de dados seriam utilizadas?
f) Quais os critérios de inclusão ou exclusão?
g) Quais as estratégias para a extração de dados?

Pode-se dizer que a relevância do tema desta tese é encontrada na possibilidade de uso de tecnologias digitais de projeto, de fabricação e de montagem, dado o elevado grau de precisão e de personalização obtidos, sem precedentes na história. As estruturas recíprocas aparecem como solução construtiva em obras de distintos períodos da história, com características interessantes para a economia de material e a conformação de geometrias complexas. Porém, os avanços sobre esse tipo de sistema construtivo sempre foram difíceis e lentos, principalmente pela dificuldade de cálculos e do controle de qualidade dos materiais – algo que pode ser resolvido com maior precisão mais recentemente.

As ERs são um sistema com características únicas, com a possibilidade de criar uma extensa variedade de geometrias e com inúmeras maneiras de aplicação, mas que têm sido utilizadas apenas em ocasiões muito pontuais (LARSEN, 2008). Além disso, trata-se de um sistema adequado para o uso da madeira, que vem sendo reconhecida cada vez mais como um material sustentável por excelência, por se tratar de um recurso renovável e de baixo impacto ambiental (GAUZIN-MÜLLER, 2005). Ao mesmo tempo, as tecnologias recentemente desenvolvidas para o tratamento da madeira contra agentes biológicos e para a criação de produtos engenheirados, como a CLT.

O objetivo da RSL foi identificar possíveis lacunas para o desenvolvimento de estruturas recíprocas, realizando a compilação e classificação de pesquisas e experiências recentes sobre o tema. Os objetivos específicos da RSL foram:

a) definir e identificar as origens, tipos e características das estruturas recíprocas; e
b) identificar o potencial de utilização de recursos digitais para solucionar uma determinada classe de problemas.

Com o intuito de aprofundar as discussões e promover uma visão mais global sobre o assunto, as estratégias de busca restringiram os resultados a artigos publicados em periódicos ou congressos científicos, disponíveis integralmente em meio eletrônico e que apresentassem relação entre ER e madeira ou ER e fabricação digital. Além disso, um levantamento inicial mostrou que o termo "*reciprocal structure*" é uma nomenclatura utilizada, predominantemente, na área da saúde e biologia, e que nas áreas de arquitetura e construção civil as ERs possuem diferentes nomes, como "*nexorade*", "*lamella structure*" e "Zollinger". Desse modo, os termos ou *strings* de busca utilizados foram:

a) *"Nexorade";*
b) *"Reciprocal Frame";*
c) *"Reciprocal Frame" AND "Wood";*
d) *"Reciprocal Frame" AND "Timber";*
e) *"Reciprocal Frame" AND "Digital Fabrication";*
f) *"Reciprocal Frame" AND "Lamella";*
g) *"Reciprocal Frame" AND "Zollinger".*

Foram utilizadas as seguintes bases de dados para a busca[10]:

a) Periódicos CAPES;
b) Sage Journals;
c) CumInCAD;
d) Ingenta Connect;
e) Compendex;
f) SCOPUS;
g) Web of Science.

Para refinar os resultados obtidos, foram definidos critérios de inclusão e exclusão de artigos. Foram incluídos todos os trabalhos que descrevem uma experiência prática de concepção, fabricação e montagem de uma ER e/ou que discutem do ponto de vista teórico os avanços necessários para o desenvolvimento desse sistema, e que apresentaram um dos termos de busca no título, no resumo ou nas palavras-chave. Foram excluídos resultados que repetem um mesmo caso de aplicação, que apresentam altos níveis de semelhança, e/ou em que o objetivo não esteja diretamente relacionado com o tema de estruturas recíprocas na construção civil, deixando apenas uma amostra de cada um desses resultados.

Um dos desdobramentos deste processo é a potencial exclusão de artigos amplamente reconhecidos pela comunidade acadêmica ou a ausência de artigos analisados em determinados

[10] Um possível questionamento é a ausência do Google Scholar como uma das plataformas de busca. Existem quatro explicações principais para isso. (1) Nesta tese, a RSL foca apenas em artigos científicos publicados e indexados. Os resultados obtidos pelo Google Scholar são bem mais abrangentes, incluindo livros, documentos diversos e manuscritos de artigos que não foram oficialmente publicados. (2) Há uma enorme repetição da literatura, com um mesmo artigo ou livro aparecendo diversas vezes. (3) É possível encontrar artigos de áreas completamente distintas pela aplicação dos termos mencionados. (4) Parte dos resultados inclui literatura cinzenta.

períodos ou anos. Por isso, reforça-se o fato de que esta RSL não tem como objetivo desenhar e classificar o universo completo de artigos publicados sobre ERs e temas correlatos. Conforme já mencionado, a proposta é de estabelecer algumas das principais lacunas de desenvolvimento dessas estruturas que possivelmente podem ser superadas com a aplicação de tecnologias digitais.

Como estratégias de extração de dados foram estipuladas categorias para agrupamento das publicações, a partir do conteúdo presente nos resumos, introduções e conclusões dos trabalhos. A forma de classificação das publicações e a relevância dos dados coletados são apresentadas no item “Resultados”.

5.2.2. Condução

A Tabela 1 sintetiza o processo de obtenção e de refinamento dos resultados obtidos pela pesquisa, com um total de 63 publicações para comunicação e análise.

Tabela 1: Condução da RSL – Síntese dos procedimentos, definição da amostra e quantidade de artigos selecionados para a extração de dados. Os números adicionados são referentes à atualização dos dados.

Parâmetro de busca	**Aplicações de busca**						
Formas de publicação	Periódicos	Congressos	Periódicos ou congressos				
Bases de dados	Periódicos CAPES	CumInCAD	Sage Journals	Ingenta Connect	Compendex	SCOPUS	Web of Science
Total por base	30 + 7	8 + 4	25 + 0	12 + 7	29 + 12	53 + 16	23 + 12
Total de publicações	180 + 58						
Eliminação por repetição	80 + 31						
Eliminação por critérios de exclusão	51 + 17						
Publicações para extração de dados	49 + 14						

Fonte: CASTRIOTTO, CELANI e SILVA, 2020, p. 379. Atualizado com dados até maio de 2021.

Durante a condução, o termo "*reciprocal frame*" desvinculado de outros termos de busca foi satisfatório em quase todas as bases. Entretanto, quando aplicado no Periódicos CAPES, retornou um número muito elevado de resultados. Por isso, somente nessa base foi necessário utilizar os termos compostos para filtrar os trabalhos.

5.3. ARTIGOS IDENTIFICADOS

Após a definição dos trabalhos para análise e extração de dados, as publicações foram divididas em dois grupos, definidos pela presença ou não do desenvolvimento de produtos físicos nos trabalhos. Para cada um desses grupos foram definidas subcategorias que explicitam o assunto geral abordado.

Um grupo foi denominado como **desenvolvimentos teóricos**, constituído pelos subgrupos de:

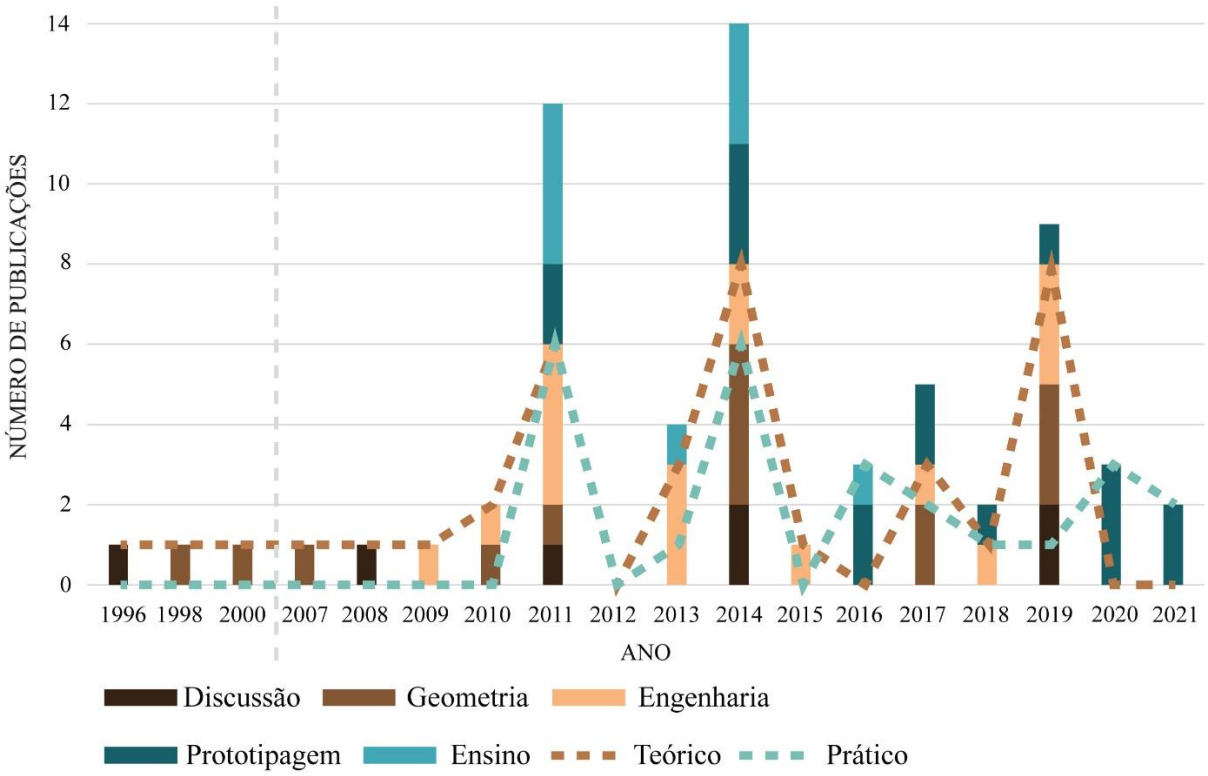
a) **discussão**, com artigos focados em aspectos históricos sobre o uso das estruturas recíprocas ou revisões sobre o tema, com as possibilidades futuras de aplicação;
b) **geometria**, com estudos e pesquisas sobre as diversas possibilidades geométricas das ERs, podendo ou não apresentar a modelagem virtual de estruturas; e
c) **engenharia**, com o foco voltado para a discussão de cálculo estrutural, detalhamento das conexões estruturais e modelos virtuais para simulações de desempenho.

Outro grupo foi chamado de **aplicações práticas** e é composto pelas subcategorias de:

a) **prototipagem**, que contempla os trabalhos que apresentaram a produção de protótipos em escala 1:1 ou instalações físicas, fabricadas digitalmente; e
b) **ensino**, que se refere às experiências de ensino de alunos de graduação ou pós-graduação por meio de workshops, que também teve a produção de modelos físicos, principalmente em escala reduzida.

Após o agrupamento dos artigos por subcategorias, eles foram distribuídos conforme o ano de publicação. Dessa forma, é possível visualizar a evolução dos estudos e identificar as possíveis tendências e correlações entre as pesquisas e os autores (Gráfico 3).

Gráfico 3: Número de artigos publicados por ano, separados por subcategorias. Linhas de evolução no tempo por categorias gerais.



Fonte: CASTRIOTTO, CELANI e SILVA, 2020, p. 379. Dados atualizados até maio de 2021.

Considerando somente os artigos analisados e a partir de 2007, é possível notar a publicação de, no mínimo, um por ano (com exceção de 2012). Estudos que relatam experiências práticas aparecem apenas a partir de 2011. Existem alguns tópicos recorrentes em quase todos os artigos, independentemente da categoria. Um deles é a apresentação de uma definição mais ou menos detalhada do que são estruturas recíprocas, enquanto outro é a apresentação histórica sobre esse tipo de estrutura. Dito isso, apresenta-se a seguir uma síntese dos assuntos abordados em cada uma das categorias e subcategorias, garantindo uma noção mais global dos estudos realizados.

5.3.1. Teoria

5.3.1.1. Discussão sobre ERs

Contempla um total de sete artigos. Dois deles abordam os estudos feitos por Leonardo da Vinci sobre estruturas recíprocas e como podem contribuir para o desenvolvimento contemporâneo delas. Larsen, Chilton e Choo (1996) indicam algumas das possíveis vantagens e qualidades do

uso dessas estruturas para a arquitetura contemporânea, com destaque para a possibilidade de se construir grandes vãos e configurações espaciais complexas, além da agilidade de montagem. Do ponto de vista conceitual, teórico e crítico, um dos trabalhos mais conceituados é o de Larsen (2014). Nele a autora apresenta algumas das experiências e inovações contemporâneas sobre o uso das estruturas recíprocas, ao mesmo tempo em que estabelece relações históricas, sendo as estruturas recíprocas uma forma de demonstrar avanços tecnológicos consideráveis. O artigo de Pugnale e Sassone (2014) é referente a uma revisão crítica sobre a os estudos e aplicações de ERs, com intuito de estabelecer o estado da arte, conectando estudos e descobertas alcançadas até o ano de publicação.

Asefi e Bahremandi-Tolou (2019) propõem uma estrutura de trabalho sistematizada para o projeto de ERs, indicando os pontos mais cruciais e os métodos ideais para solucionar problemas específicos. Nagy, Csóka e Katona (2019) discutem a importância e o papel da simetria geométrica nessas estruturas.

5.3.1.2. Geometria

Foram encontrados 14 artigos, que ilustram os avanços da interpretação formal das estruturas recíprocas. Os artigos publicados no final da década de 1990 contemplam discussões sobre as possibilidades formais das estruturas recíprocas, sendo apresentados quase como um resgate histórico. Existem diversas tentativas de classificação dessas estruturas, inicialmente observadas no trabalho de Saidani, Baverel e Cross-Rudkin (1998), que apresentam o conceito de sistemas multirrecíprocos como alternativa aos sistemas em grelha convencionais. Baverel *et al,* (2000) definem o termo "Nexorade", com o intuito de compreender a composição geométrica e estrutural de todos os nós que conformam as estruturas recíprocas – um desdobramento da ideia dos sistemas multirrecíprocos. Baverel e Nooshi (2007) retomam o termo e sistematizam um método de produção de estruturas baseadas em poliedros regulares. Baverel e Larsen (2011) apresentam o termo *woven structure* (estrutura entrelaçada), como um tipo de estrutura que engloba as estruturas recíprocas (ou nexorades), em malha (ou tricô), em tecido (ou trançado) e em trabalho de cesta (ou canasta). Baverel e Pugnale (2014) procuram classificar essas estruturas de forma similar. Tamke, Riiber e Jungjohann (2010) combinam técnicas tradicionais de carpintaria com processos de fabricação digital. O estudo sobre a ampliação do *Euskalduna Conference Centre and Concert Hall*, feito por Bernabeu Larena e García Ménendez (2014), exemplifica e discute a produção contemporânea de estruturas

recíprocas. Barrallo, González-Quintial e Sánchez-Parandiet (2017) indicam desdobramentos sobre os elementos que compõem as estruturas recíprocas. Gherardini e Leali (2017) sugerem o método de modelagem *bottom-up*, a partir dos elementos singulares até a composição da estrutura completa para alcançar soluções mais flexíveis, otimizadas (dado determinado objetivo), e geometrias ainda mais complexas e interessantes. Os estudos de Parigi *et al,* (2014) apresentam a teoria que sustenta a criação de uma ferramenta digital denominada "Reciprocalizer", apresentada na publicação de Parigi e Kirkegaard (2014ª), que realiza processos iterativos para encontrar as soluções mais adequadas, sob o aspecto formal-estrutural. Resultados dessa pesquisa podem ser vistos nos trabalhos de Parigi e Pugnale (2014) e Parigi e Kirkegaard (2014b) na subcategoria Ensino.

Castriotto, Giantini e Celani (2019) combinaram estratégias da biomimética com as de ERs para desenvolver um modelo digital geométrico, que exemplifica a interação entre estruturas artificiais e naturais. O artigo de Qi *et al,* (2019) estabelece um método geométrico de concepção e construção para ERs com padrões hexagonais-triangulares mantendo as relações de excentricidade entre as barras. Uma ferramenta digital para o desenvolvimento de ERs baseadas em superfícies sinclásticas (com a mesma curvatura em todas as direções) foi desenvolvida por Palumbo, Lancia e Pone (2019), também mantendo as relações de excentricidade entre os elementos.

5.3.1.3. Engenharia

Esta é a subcategoria com o maior número de trabalhos publicados, com um total de 17 artigos. Um dos assuntos recorrentes acerca das estruturas recíprocas é o desenvolvimento e aprimoramento de métodos de cálculo, com o intuito de solucionar a complexidade mecânica dessas estruturas. Douthe e Baverel (2009) exploram as vantagens sobre a aplicação do método de relaxamento dinâmico para o projeto de estruturas recíprocas por *form-finding*[11]. Já o artigo de Brocato (2011) apresenta as principais condições para que uma estrutura recíproca possua indeterminação estática. O estudo de Kohlhammer e Kotnik (2011) contém um método de análise que estabelece, matematicamente, a interação entre as forças atuantes no sistema global

[11] De modo geral, os métodos de *form-finding* estão comumente associados ao uso de análises por elementos finitos e são utilizados com dois objetivos principais: (a) nos casos em que as ERs consideram a sobreposição de barras e uma geração iterativa, como a ferramenta *reciprocalizer* de Parigi e Kirkegaard (2014a) ou (b) para a obtenção de formas funiculares, que geram estruturas mais eficientes aos esforços gravitacionais, como pode ser visto nos trabalhos de Douthe e Baverel (2009) e Nabaei, Bavarel e Weinand (2013).

com todos os subsistemas presentes em uma estrutura recíproca. Para verificar o comportamento estrutural, Gelez, Aubry e Vaudeville (2011b) aplicam dois métodos analíticos das forças atuantes em uma grelha convencional e uma estrutura recíproca em composição similar, bidimensional. Garavaglia *et al,* (2013) utilizam métodos analíticos e numéricos que indicam que o comportamento de colapso das ERs é similar ao de vigas "tradicionais" conectadas entre si, porém com menor robustez. Nabaei, Baverel e Weinand (2013) aplicam o método de relaxamento dinâmico para obter a disposição dos elementos estruturais na geometria global de uma ER composta por *Timber Fabric*. Por sua vez, Mesnil *et al,* (2018) adotaram o *translation method* (método de translação) para o *form-finding* de estruturas recíprocas. Rizzuto e Larsen (2010) apresentam uma síntese dos métodos tradicionais e contemporâneos de conexões utilizadas nessas estruturas. Nabaei e Weinand (2011) exploram o conceito de placas dobradas, substituindo os elementos lineares convencionais, e analisam as deformações na estrutura. Kohlhammer *et al,* (2017) relacionam a geometria e o comportamento estrutural de estruturas recíprocas, explorando o uso de conexões em T coladas, com a montagem auxiliada por robôs. Song *et al,* (2013) desenvolveram uma ferramenta utilizando C++ e OpenGL, capaz de alocar diversos padrões geométricos em diferentes superfícies, com auxílio de novos métodos de *form-finding* desenvolvidos pelos pesquisadores. Algumas das limitações encontradas foram resolvidas por Song *et al,* (2014), como o aprimoramento da interface do usuário, resultados mais precisos e incorporação do processo de fabricação de estruturas recíprocas. A ferramenta digital de *form-finding* desenvolvida por Thonnissen (2014) tem o objetivo de fazer com que as estruturas recíprocas sejam mais acessíveis e fáceis de projetar. Garcia Puyol (2015) sugere um fluxo de projeto que se beneficia da customização em massa, com o uso dos softwares Rhinoceros e Grasshopper, aprimorados pelos plug-ins Kangaroo, Millipede, HAL e componentes customizados em C#.

Kitrick (2019) descreve uma técnica para resolver problemas complexos de otimização relativos a tecelagens esféricas que requerem abordagens não lineares, utilizando ERs como exemplo de aplicação. Ramos-Jaime e Sánchez-Sánchez (2019) apresentam um processo de geração de módulos hiperbólicos usados para a construção de ERs, baseados em um sistema de travamento entre as barras ativado durante a montagem. O artigo de Widyowijatnoko, Irwanuddin e Aditra (2019), sugere a criação e um novo sistema estrutural chamado de *rection*, como uma derivação dos sistemas de ERs.

5.3.2. Prática

5.3.2.1. Ensino

Foram alocados nesta subcategoria nove artigos. Dentre eles, quatro são respectivos a relatos de workshops, publicados no quarto número do International Journal of Space Structures em 2011. Todos indicam que a experimentação prática contribui para a compreensão do comportamento e da lógica das estruturas recíprocas (GELEZ e SABY, 2011; BAVEREL *et al,* 2011; LARSEN, 2011; THONNISSEN e WERENFELS, 2011; LARSEN e LEE, 2013; AVELLANEDA *et al,* 2014; PARIGI e PUGNALE, 2014; PARIGI e KIRKEGAARD, 2014ª, 2014b; GUTIERREZ, FLORES e PRECIADO, 2016). No entanto, é importante lembrar que seria impossível simplesmente extrapolar o comportamento estrutural de um modelo em escala para uma obra no âmbito da construção civil. É necessário readequar o dimensionamento para a nova escala, incorporar as características dos materiais e os processos de fabricação e montagem.

5.3.2.2. Prototipagem

Fazem parte desta subcategoria 16 artigos que apresentam a construção de estruturas recíprocas, como provas de conceito, resultados de pesquisa ou obras reais. O *dodeca-icosahedron* de Sénéchal, Douthe e Baverel (2011) foi a aplicação prática de métodos analíticos de *form-finding* e de transformações geométricas pesquisados pelos autores, montado por duas pessoas em apenas quatro horas. Gelez, Aubry e Vaudeville (2011ª) descrevem a obra vencedora do concurso para o abrigo arqueológico de Bibracte, na França. O artigo de Maxwell *et al,* (2014) descreve o projeto e a construção da estrutura recíproca do pavilhão Utzon/40, que combina dois tipos de materiais, processos de *form-finding* e o fluxo de produção *file-to-factory*. O protótipo feito por Pantazis e Gerber (2014) foi composto por chapas curvas de madeira compensada, concebido pela combinação de técnicas de *form-finding* e *multi 111gente systems* como estratégias generativas *bottom-up*. Sánchez-Sánchez, Escrig Pallarés e Rodríguez-León (2014) se basearam no conceito de reciprocidade para desenvolver uma estrutura recíproca fractal semelhante à de uma árvore para o *Natural Interpretation Centre* de Melilla, no norte da África. A pesquisa promovida por Tong e Zhou (2016) aponta que, apesar da maior complexidade presente nas estruturas recíprocas tridimensionais, sua criação está intrinsecamente relacionada com os dados de entrada que definem as regras de crescimento, as

dimensões dos elementos lineares e a geometria inicial. Já a proposta de Anastas, Rhode-Barbarigos e Adriaenssens (2016) é a de solucionar a geração de estruturas recíprocas adaptáveis a diversas superfícies a partir da subdivisão de *meshes*, com o auxílio de um algoritmo baseado em padrões celulares. O projeto experimental do pavilhão DigDesFab15 de Gheorghe e Vierlinger (2017) resultou na criação de uma estrutura recíproca que utiliza um polímero de concreto para conectar os elementos de madeira. Com o objetivo de investigar a aplicação das estruturas recíprocas como uma tipologia arquitetônica contemporânea, Araullo e Haeusler (2017) desenvolveram um sistema de encaixes duplos assimétricos para efetivar as conexões entre peças planas. Araullo (2018) tenta estabelecer os critérios que devem ser considerados para compor a morfologia tridimensional (UVW) das estruturas recíprocas por meio da construção do protótipo Mobius, baseado em uma parte da fita de Mobius.

O artigo de Godthelp *et al,* (2019), apresenta um novo método de *form-finding* para ERs que incluem dimensionamento e detalhamento dos elementos, incorporando o processo de fabricação e montagem de protótipos. Xian, Hoban e Peters (2020) utilizaram fabricação robótica para cortar os elementos e montar uma parede em ER. O trabalho de Mostafavi *et al,* (2020) também fez proveito da fabricação por robôs, mas dessa vez para a produção e montagem do pavilhão de 100 anos da Bauhaus. Badifu *et al,* (2020) propõem um desdobramento das ERs utilizando um polímero de fibras reforçadas para a conexão dos elementos. Shah (2021) propõem um novo método de montagem de ERs baseadas em módulos montáveis com conexões flexíveis. Por fim, o artigo de Widyowijatnoko, Aditra e Cungwin (2021) apresenta modelos e protótipos, tanto em escala reduzida como 1:1 do sistema *rection*.

5.4. ANÁLISE DOS ARTIGOS

A partir dos dados extraídos, foi possível identificar, em linhas gerais, as principais convergências e divergências entre os autores. O material analisado permitiu, em primeiro lugar, sistematizar as diferentes definições e nomenclaturas dadas às estruturas recíprocas. Também foi possível identificar diferentes tipos de classificação dessas estruturas, segundo critérios variados. A grande maioria dos artigos também forneceu informações históricas. Embora não seja possível, a partir delas, traçar uma trajetória contínua sobre o emprego dessas estruturas, foi possível inferir a relação entre o uso das estruturas recíprocas e os momentos de grande desenvolvimento tecnológico. Finalmente, essa análise permitiu identificar lacunas do

conhecimento a serem preenchidas. Dentre os 63 artigos analisados, 34 afirmam existir espaço para pesquisas e inovações, sugerindo desdobramentos ou estudos futuros.

5.4.1. Definições

O primeiro tópico que deve ser esclarecido para compreender as estruturas recíprocas está na nomenclatura utilizada para se referir a esse tipo de estrutura. O trabalho de Pugnale e Sassone (2014) apresenta um compilado dos termos utilizados de forma científica para se referir a esse tipo de estrutura, sendo eles: "Mandala Roof", "Reciprocal Frame", "Serlio Floor", "Multi-Reciprocal Grid", "Nexorade", "Leverworks", "Multi-Reciprocal Element", "Mutually Supported Element", "Leonardo's Lattice", "Selfsupporting Framework", "Lamella Flock" e "Interlocking Frame". Outros termos como "Reciprocal System" ou "Zollinger System" aparecem em alguns artigos, que não foram analisados pelos autores. Há também algumas pequenas variações, como o uso de "Reciprocal Structure" no lugar de "Reciprocal Frame". Todavia, os principais autores (com maior número de publicação e/ou publicações mais citadas) e os artigos mais recentes têm utilizado "Reciprocal Frame" ou "Nexorade", o que pode indicar uma concordância sobre quais os termos considerados mais adequados ou corretos.

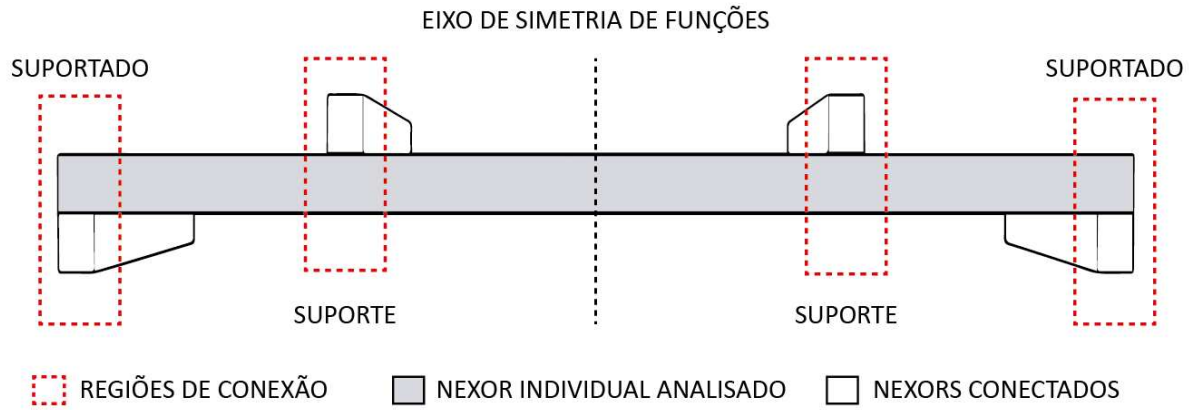
O conceito fundamental dessas estruturas é encontrado na relação entre "suportar e ser suportado". Conforme Pugnale e Sassone (2014), elas possuem duas características inerentes:

a) todos os elementos apresentam as funções de suporte e suportado, simultaneamente e simetricamente; e
b) essas duas funções não são sobrepostas no mesmo ponto do elemento estrutural, e não configuram uma hierarquia estrutural.

Outra propriedade mencionada por Larsen (2014) é o fato de as ERs serem baseadas em componentes relativamente curtos, capazes de configurar sistemas complexos e fechados. Por sua vez, Baverel *et al,* (2000) afirmam que os elementos individuais, ou "nexors", possuem quatro regiões de conexão, estabelecidas entre dois nexors diferentes. Baverel e Pugnale (2014) acrescentam que essas regiões sempre se dão ao longo do elemento e nunca nas extremidades laterais (Figura 18). De acordo com Asefi e Bahremandi-Tolou (2019), os **elementos** ou **nexors** são um dos três parâmetros geométricos fundamentais das ERs, pois interferem no tamanho do vão, altura, peso e tipos de conexão da estrutura. Eles podem ser lineares (com uma dimensão

maior do que todas as outras), geralmente utilizados para coberturas, ou planares (com duas dimensões maiores do que a outra). Neste caso, eles podem ser subdivididos entre (a) típicos, utilizados para melhorar o desempenho estrutural ou a porcentagem de sombreamento; (b) curvos, com o propósito de gerar estruturas em casa e aumentar a área de sombreamento e; (c) otimizados, geralmente possuem perfurações ou geometrias que reduzem o peso dos elementos sem perda de desempenho estrutural (ASEFI e BAHREMANDI-TOLOU, 2019).

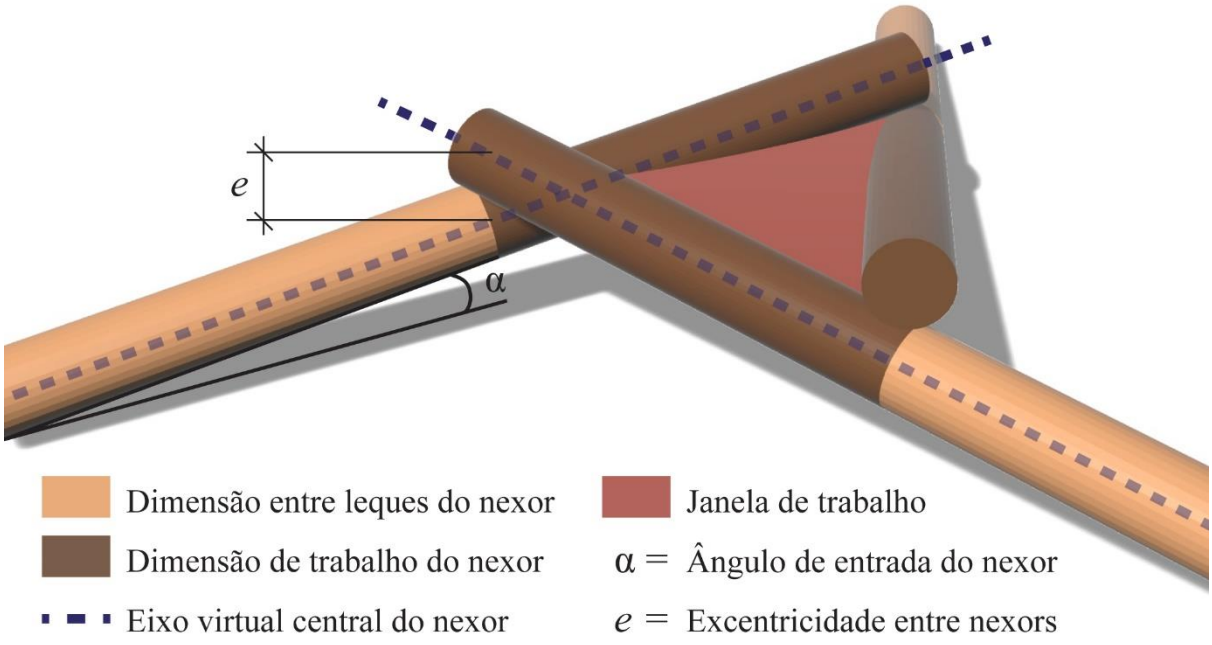
Figura 18: Representação em perspectiva das áreas de conexão de um nexor por sobreposição.



Fonte: CASTRIOTTO, CELANI e SILVA, 2020, p. 383.

A região de encontro, estabelecida por no mínimo três componentes, é considerada como o padrão geométrico elementar, também chamado de leque pela maioria dos autores. Mais recentemente, Araullo (2018) sugere o termo “DNA” como uma analogia biológica, uma vez que as ferramentas digitais permitem a personalização em massa das geometrias que configuram determinada estrutura. Cada nexor apresenta determinado ângulo de entrada e uma dimensão de trabalho. O perímetro gerado entre essas dimensões forma a área chamada de janela de trabalho. Além disso, a configuração espacial gerada pelos leques implica a sobreposição da excentricidade dos nexors, dada como a menor distância entre o eixo de dois elementos conectados (BAVEREL *et al,* 2000; DOUTHE e BAVEREL, 2009; SÉNÉCHAL, DOUTHE e BAVEREL, 2011; THONNISSEN, 2014; MESNIL *et al,* 2018) (Figura 19).

Figura 19: Elementos e propriedades que constituem um leque de uma estrutura recíproca, demonstrados em um leque triangular por sobreposição.



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

Um número considerável de autores concorda que um mecanismo-chave para viabilizar a produção e a montagem de qualquer tipo de estrutura recíproca é a forma de conexão entre os elementos. De fato, Asefi e Bahremandi-Tolou (2019) mencionam que as **conexões** são outro dos três parâmetros geométricos fundamentais das ERs, sendo entendidas como aquelas que conectam (a) os nexors entre si; (b) os nexors com o sistema de cobertura ou revestimento e; (c) os nexors com elementos de suportes periféricos. Rizzuto e Larsen (2010) sugerem que, de modo geral, elas podem ser feitas por atrito e pressão, por encaixes ou auxiliadas por fixadores mecânicos (parafusos) ou químicos (colas).

No estudo sobre o uso de conexões em T, Kohlhammer *et al,* (2017) indicam que a região e a geometria de contato entre os nexors são dois critérios que têm uma grande influência sobre a eficiência da conexão adotada, além de sugerirem que a redução da excentricidade entre os elementos pode melhorar o desempenho estrutural. Araullo e Haeusler (2017) indicam que, nas estruturas compostas tanto por elementos lineares como planares, as especificidades encontradas nas áreas individuais de conexão demandam um projeto completamente novo e

que, em geral, o uso de produtos disponibilizados pelo mercado, de forma padronizada, é insuficiente para suprir as necessidades de todas as conexões.

O último dos três parâmetros geométricos essenciais das ERs, discutidos por Asefi e Bahremandi-Tolou (2019), é o **sistema de revestimento ou vedação**, em decorrência da falta de planos virtuais entre os elementos. Como consequência, as ERs comumente são cobertas por membranas ou placas de PVC ou policarbonato.

Quanto aos aspectos estruturais, é possível afirmar que os principais esforços atuantes sobre as estruturas recíprocas são esforços axiais e esforços de flexão e as principais estratégias adotadas para verificar o comportamento estrutural utilizam análise por elementos finitos. De acordo com Mesnil *et al,* (2018), esse tipo de estrutura apresenta comportamentos muito peculiares, que devem ser tratados de forma não convencional. O estudo de Brocato (2011) sugere que a otimização[12] estrutural em nexorades pode ser obtida pela redução das forças axiais e aumento das de flexão, o que é oposto ao que usualmente é feito em estruturas em cascas ou *gridshell*. Por outro lado, Kohlhammer e Kotnik (2011) sugerem que, ao decompor a estrutura em seus elementos individuais, é possível analisar cada um como vigas tradicionais. O comportamento de colapso desse tipo de estrutura também se aproxima de qualquer estrutura "tradicional" formada por vigas conectadas, submetida aos mesmos tipos de esforços, como mencionado por Garavaglia *et al,* (2013). Asefi e Bahremandi-Tolou (2019) explicam que, além do **tipo de nexor** e dos **tipos de conexão**, outras seis variáveis interferem diretamente no comportamento e desempenho estrutural, no processo de fabricação e de montagem das ERs: **forma**, **curvatura**, **material**, **padrão geométrico**, **ferramentas de corte** e **escala**.

5.4.2. Classificações

Classificar os tipos de estruturas recíprocas pode ser considerada como uma ação desafiadora, sobretudo por causa das suas peculiaridades inerentes. De modo geral, diversos autores

[12]A otimização estrutural de ERs pode ser realizada de diversas formas. Por exemplo, ela estar relacionada com a geometria e o tipo de seção transversal das barras que compõem as ERs ou com a forma global da estrutura. No caso de Brocato (2011), o processo de otimização foi feito pela relação entre a geometria da estrutura e a disposição de nexors apoiados sem o uso de fixadores mecânicos ou químicos.

mencionam que seis itens são analisados para categorizar essas estruturas (BAVEREL e LARSEN, 2011; BAVEREL e PUGNALE, 2014; THONNISSEN, 2014):

a) a geometria dos leques;
b) o número de elementos que se conectam;
c) a dimensão de trabalho;
d) a excentricidade entre as peças;
e) o comprimento total de uma peça e;
f) a configuração topológica da estrutura.

Baverel e Larsen (2011) consideram a existência de um grupo denominado como estruturas entrelaçadas, que engloba quatro subcategorias. Dentre elas, as ERs são aquelas compostas por elementos descontínuos que apresentam resistência elevada ou mediana à flexão. Elas ainda são divididas em quatro subgrupos, conforme o tipo de elemento utilizado, sendo eles:

a) alongadas ou lineares: podem ser caracterizadas de acordo com a geometria dos leques, a disposição final, a dimensão de comprometimento e a excentricidade;
b) anéis: exemplificadas pelos anéis de Borromé e Hopf;
c) planos (placas ou lâminas): diferenciados pela geometria e pela disposição dos elementos utilizados, principalmente se houver algum tipo de dobra ou curvatura e;
d) blocos: caracterizadas por apresentar dimensões semelhantes em três dimensões e é por ser a única situação em que os leques são compostos por apenas dois elementos, sendo reconhecidos como “elementos tridimensionais”.

Entretanto, autores como Pugnale e Sassone (2014) não concordam com a possibilidade de se utilizar esse quarto subgrupo para a conformação de estruturas recíprocas, uma vez que o comportamento estrutural se aproxima mais de um sistema em casca; para existir reciprocidade, é necessário que a relação entre ação e reação de dois elementos seja perfeitamente simétrica. Caso contrário, trata-se apenas de um benefício mútuo entre elementos.

Baverel e Pugnale (2014) apresentam uma tentativa de classificação das estruturas recíprocas compostas por elementos planos. São definidos cinco grupos distintos, sendo eles:

a) elementos planos usados como elementos lineares espessos: estruturas compostas por elementos planos que substituem os elementos lineares, exemplificados pela Serpentine Gallery (Figura 20), de Álvaro Siza, Eduardo Souto de Moura e Cecil Balmond;
b) elementos planos usados como agrupamentos de elementos lineares: estruturas em que os elementos planos substituem os leques formados por elementos lineares;
c) elementos planos que transmitem momento pelas conexões: estruturas que não são baseadas na formação de leques e são estabilizadas pela maximização na transmissão do momento gerado pelos esforços mecânicos;
d) elementos planos que transmitem tração e compressão pelas conexões: estruturas que permitem a transmissão das forças de tração e compressão pelas conexões com características estruturais similares as de uma treliça convencional, e também não se baseiam na formação de leques e;
e) combinação de características apresentadas nas quatro categorias anteriores.

Figura 20: Estrutura do pavilhão Serpentine Gallery de 2005, projetado por Álvaro Siza, Eduardo Souto de Moura e Cecil Balmond. Trata-se de uma estrutura baseada no sistema Zollinger.

Fonte: Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/904239/o-que-acontece-com-os-pavilhoes-da-serpentine-gallery-quando-sao-desmontados>. Autor: Sylvain Deleu. Imagem editada. Acesso em: 18 de novembro de 2019.

Outra forma de diferenciar as ERs é pelo método utilizado para a obtenção da forma. As pesquisas apresentadas demonstram a aplicação de diferentes técnicas de análise por elementos finitos combinadas com *form-finding*, com destaque para o método do relaxamento dinâmico (DOUTHE e BAVEREL, 2009), e o método de translação (MESNIL *et al,* 2018).

As conexões das ERs também podem apresentar classificações específicas. Asefi e Bahremandi-Tolou (2019) sugerem uma divisão por funções: (a) conexões entre um nexor e outro; (b) conexões entre os nexors e o sistema de vedação ou revestimento e; (c) conexões entre os nexors e suportes periféricos. Outra abordagem é feita por Gustafsson (2016), que agrupa de acordo com o processo de produção, montagem/desmontagem, reuso, propriedades estruturais e estética. O autor sugere a seguinte divisão: (a) conexões por sobreposição; (b) conexões por acopladores; (c) conexões com cavilhas e; (d) conexões por entalhes.

Todavia, é possível identificar conexões que não se encaixam em nenhuma dessas categorias, em geral desenvolvidas para casos específicos, como é o caso do leque preenchido na estrutura feita por Gheorghe e Vierlinger (2017) ou conexões que utilizam um único fixador mecânico para a fixação de elementos, como é o caso das estruturas ReciPlyDome (BRANCART *et al,* 2017; LARSEN *et al,* 2018) e do estábulo em Glænø (LARSEN, 2019).

5.4.3. Lacunas identificadas

Com base nos 34 artigos que identificaram explicitamente algum tipo de lacuna do conhecimento sobre as ERs, foi possível agrupar, em cinco tópicos recorrentes, os desafios que demandam aprofundamento em pesquisas e estudos:

a) dificuldades na concepção geométrica/estrutural;
b) necessidade de aprimoramento de ferramentas digitais;
c) dificuldades no projeto, análise, fabricação e montagem;
d) dificuldade de extrapolação de protótipos para aplicações em grande escala e;
e) necessidade de incorporar o processo de montagem e do sistema de cobertura.

As lacunas estão relacionadas com os artigos identificados e seus respectivos autores no Quadro 2. Em seguida, com base nas informações obtidas, é apresentado um encadeamento lógico que relaciona declarações feitas pelos diferentes autores. É importante mencionar que alguns artigos indicam mais de um tipo de lacuna; entretanto, optou-se por focar nos aspectos mais destacados em cada artigo.

Quadro 2: Principais lacunas de conhecimento sobre Estruturas Recíprocas e os artigos em que elas foram encontradas ou estão relacionadas.

Lacunas identificadas	Artigos
Dificuldades na concepção geométrica/estrutural	Baverel e Pugnale (2014); Baverel e Larsen (2011); Tong e Zhou (2016); Kohlhammer *et al,* (2017); Gelez, Aubry e Vaudeville (2011b); Barrallo, González-Quintial e Sánchez-Parandiet (2017) e; Asefi e Bahremandi-Tolou (2019).
Necessidade de aprimoramento de ferramentas digitais	Garcia Puyol (2015); Nabaei, Baverel e Weinand (2013); Mesnil *et al,* (2018); Garavaglia *et al,* (2013); Kohlhammer e Kotnik (2011); Gherardini e Leali (2017); Thonnissen (2014) e; Mostafavi *et al,* (2020)
Dificuldades no projeto, análise, fabricação e montagem	Maxwell *et al,* (2014); Nabaei e Weinand (2011); Parigi *et al,* (2014); Rizzuto e Larsen (2010); Saidani, Baverel e Cross-Rudkin (1998); Castriotto, Giantini e Celani (2019); Widyowijatnoko, Irwanuddin e Aditra (2019) e; Widyowijatnoko, Aditra e Cungwin (2021).
Dificuldade de extrapolação de protótipos para aplicações em grande escala	Gutierrez, Flores e Preciado (2016); Parigi e Pugnale (2014); Gheorghe e Vierlinger (2017); Araullo e Haeusler (2017) e; Xian, Hoban e Peters (2020)
Necessidade de incorporar o processo de montagem e do sistema de cobertura	Araullo (2018); Bernabeu Larena e García Ménendez (2014); Larsen, Chilton e Choo (1996); Larsen e Lee (2013); Song *et al,* (2013) e; Godthelp *et al,* (2019)

Fonte: CASTRIOTTO, CELANI e SILVA, 2020, p. 385. Atualizado com dados até maio de 2021.

5.4.3.1. Dificuldades na concepção geométrica / estrutural (7 artigos)

A investigação e sistematização das abordagens feitas sobre as ERs é importante para a compreensão das diversas variáveis que influenciam sua construção, desde morfológicas até o detalhamento e processo de montagem. Esse tipo de trabalho investigativo também pode demonstrar "[...] a necessidade de aprofundar explorações geométricas, estruturais e construtivas [...]" (BAVEREL e PUGNALE, 2014, p. 188. Traduzido pelos autores). Além disso, a geometria e o tipo dos nexors e dos leques implicam configurações complexas que demandam pesquisas adicionais, com a proposta de encontrar "[...] uma abordagem unificada para descrever claramente os sistemas recíprocos [...]" (BAVEREL e LARSEN, 2011, p. 288. Traduzido pelos autores). Um dos grandes desafios para o desenvolvimento de ERs é controlar todas as variáveis dada a interdependência entre elas, isto é, "[...] pequenas mudanças em

qualquer parâmetro levam a uma mudança em toda a estrutura. [...] todos os parâmetros estão reciprocamente relacionados entre si em diferentes aspectos" (ASEFI e BAHREMANDI-TOLOU, 2019, p.15. Traduzido pelos autores).

Do ponto de vista da composição e modelagem geométrica, mesmo os casos mais complexos, como os de ERs tridimensionais (com crescimento em uvw), podem seguir lógicas de modelagem similares às de uma estrutura paramétrica típica. Entretanto, é necessário que o conjunto de regras geradoras das ERs seja explícito e bem definido. Para ilustrar, "[...] o experimento ainda utiliza regras simples de desenvolvimento. As regras complicadas não foram implementadas. Se for possível utilizar diferentes regras no processo de geração, o resultado pode se tornar mais complexo e interessante [...]" (TONG e ZHOU, 2016, p. 734. Traduzido pelos autores). Pode-se entender que essas regras mais complicadas estão, muitas vezes, associadas a uma relação complexa e singular estabelecida entre a composição geométrica e o desempenho estrutural. Pequenas variações em ângulos ou dimensões nos nexors podem exercer grande influência na estabilidade global dessas estruturas. Nesse sentido, "[...] as configurações ideais dos parâmetros geométricos em relação à capacidade estrutural não são evidentes nem fáceis de derivar. Contudo, esses parâmetros podem ser otimizados com o auxílio de ferramentas computacionais [...]" (KOHLHAMMER *et al,* 2017, p. 214. Traduzido pelos autores). O artigo de Gelez, Aubry e Vaudeville (2014b) não só ilustra como essas relações podem ocorrer em uma aplicação específica de ER como reforça as lacunas existentes ao afirmar que "[...] é necessário o desenvolvimento trabalhos adicionais para entender o efeito de cargas e geometrias mais complexas no comportamento estrutural apresentado [...]" (GELEZ, AUBRY e VAUDEVILLE, 2011b, p. 342. Traduzido pelos autores).

Uma alternativa para solucionar problemas recorrentes das ERs, como a forma de vedação, pode ser feita pela exploração de nexors dobráveis, curvos ou maleáveis. Mesmo sendo um caminho interessante, como é demonstrado em estudos de chapas curvas maleáveis, ele implica a necessidade de "[...] analisar profundamente o comportamento estrutural das chapas curvas não-rígidas nas construções [...]" (BARRALLO, GONZÁLEZ-QUINTIAL e SÁNCHEZ-PARANDIET, 2017, p. 738. Traduzido pelos autores).

Os principais tópicos que sintetizam esta lacuna são:

a) os parâmetros utilizados para a geração de ERs de forma paramétrica são complexos, interdependentes e não bem definidos;
b) não é claro como o desempenho estrutural é influenciado por cada tipo de variação geométrica, seja nos nexors, nos leques ou na forma global; e
c) considerar sistemas acoplados ao sistema estrutural implica problemas não bem definidos, como é o caso da vedação.

5.4.3.2. Necessidade de aprimoramento de ferramentas digitais (8 artigos)

O uso de ferramentas digitais no processo de projeto de ERs é utilizado por quase todos os autores, seja para a modelagem da estrutura, para análises estruturais e/ou para fabricação de componentes personalizados e complexos. Para Garcia Puyol (2015) a principal limitação de seu trabalho é a exigência de muito poder de processamento computacional, o que acarreta um longo tempo gasto para o funcionamento do algoritmo de modelagem geométrica paramétrica. Isso ocorre sem considerar as características específicas da madeira (como a variação dimensional heterotrópica e a direção das fibras) ou uma análise detalhada individual das peças para montagem; a implementação dessas variáveis implicaria um processo ainda mais lento. Paralelamente, Nabaei, Baverel e Weinand (2013) afirmam que as simulações por métodos de elementos finitos também são muito dispendiosas, apesar de terem uma elevada precisão, quando aplicadas a geometrias não lineares. O desenvolvimento de novos métodos de análise por elementos finitos para a geração e otimização da estrutura, aliadas aos princípios de *form-finding*, encontram limitações em atender todas as demandas das ERs. Um exemplo é o desenvolvido por Mesnil *et al,* (2018), que apesar de conseguir solucionar uma categoria específica de problemas, sugere que "[...] o método poderia ser acoplado aos métodos existentes de *form-finding*, como o relaxamento dinâmico, a fim de satisfazer todas as restrições de excentricidades [...]" (MESNIL *et al,* 2018, p. 152. Traduzido pelos autores).

Para Garavaglia *et al,* (2013, p. 545) "[...] o desenvolvimento de pesquisas futuras e adicionais devem se preocupar com a otimização da forma e dos materiais, para uma aplicação confiável das ERs [...]" (tradução nossa). Para que isso ocorra, será necessário incluir variáveis dos materiais para a realização de modelagens e análises estruturais digitais mais precisas. Métodos desenvolvidos para análises estruturais de sistemas complexos também não utilizam, de forma efetiva, as variáveis do material. Isso pode ser observado na afirmação: "O desafio aqui é a indeterminação estática dos subsistemas. As forças de suporte [...] não podem mais ser

determinadas apenas com geometria, [...] são necessárias premissas adicionais, como as de materiais ou de conexões [...]" (KOHLHAMMER e KOTNIK, 2011, p. 86. Traduzido pelos autores). De certo modo, os processos de otimização estrutural geralmente resultam em modelos teóricos que geram soluções com elementos únicos e complexos. Contudo, "[...] na prática, um balanceamento entre a disponibilidade de recursos materiais, as medidas quantitativas de desempenho, os objetivos qualitativos de projeto e as estratégias de fabricação é exigido (MOSTAFAVI *et al,* 2020, p. 420. Traduzido pelos autores).

Outra limitação do uso de sistemas computacionais é encontrada nos níveis de automação, que dificilmente conseguem contemplar todo o processo de geração das ERs. O trabalho feito por Gherardini e Leali (2017) consegue gerar estruturas em inúmeras geometrias, mas exige a intervenção manual do arquiteto para a definição do primeiro leque, além de não alcançar um nível de otimização ideal para os elementos tridimensionais. Paralelamente, alguns métodos são desenvolvidos com o objetivo de otimizar a forma da estrutura pelo seu processo de geração. A ferramenta desenvolvida por Thonnissen (2014) tem o objetivo de facilitar a aplicação de ERs por *form-finding* e sua produção por equipamentos de controle numérico, mas não automatiza todo o processo. Na realidade, ela auxilia o controle do usuário sobre algumas das complexas relações geométricas e estruturais, mas a alteração dos parâmetros não gera um produto acabado, pronto para a fabricação e montagem. Isso porque a "[...] integração de análises e otimizações estruturais (na ferramenta) ainda é um desafio a ser superado [...]" (THONNISSEN, 2014, p. 106. Traduzido pelos autores).

Os principais tópicos que sintetizam esta lacuna são:

a) as estratégias de modelagem e análise demandam um tempo excessivo ou muito poder computacional;
b) há uma dificuldade em implementar variáveis dos materiais como parâmetros para as análises estruturais;
c) ainda não foram encontradas formas efetivas de se integrar processos generativos de projeto e de análise estrutural das ERs; e
d) a automação dos processos digitais ocorre de forma parcial, sem contemplar todo o processo, desde a concepção até a fabricação e montagem.

5.4.3.3. Dificuldades no projeto, análise, fabricação e montagem (8 artigos)

"O projeto de conexão entre vários elementos pode ser desafiador [...], mas não deveria ser um grande problema [...]" (SAIDANI, BAVEREL e CROSS-RUDKIN, 1998, p. 217. Traduzido pelos autores). Todavia, como já foi mencionado, o sistema de conexões das ERs é uma das partes mais importantes para a viabilização dessas estruturas. A forma como os nexors estão relacionados e fixados implica o desempenho estrutural, no processo de fabricação e no de montagem. Alguns edifícios contemporâneos feitos com ERs, principalmente no Japão, servem de exemplo para mostrar a diversidade de tipos de conexão possíveis entre os nexors. Todavia, "[...] investigações experimentais e numéricas devem ser realizadas a fim de fornecer informações complementares sobre o comportamento estrutural das conexões feitas com parafusos ou encaixes em ERs submetidas a uma maior quantidade de esforços [...]" (RIZZUTO e LARSEN, 2010, p. 255. Traduzido pelos autores). Sobre o impacto das conexões das ERs nas análises estruturais, o trabalho de Maxwell et al, (2014) descreve um sistema de conexão complexo que é fabricado digitalmente. Porém, ele ainda demanda a integração de análises estruturais por elementos finitos aplicadas a objetos tridimensionais (a geometria e o tipo de conexão) em tempo real (em vez dos modelos simplificados de linhas) com as ferramentas generativas. Para os autores, somente dessa forma seria possível aprimorar e otimizar as soluções de conexão encontradas.

Outra perspectiva pouco explorada para a geração de ERs é a utilização das conexões como um dos parâmetros iniciais do processo de projeto. Nesse sentido, o trabalho apresentado por Nabaei e Weinand (2011) pode ser mencionado como um exemplo. Trata-se de uma ER derivada da tecnologia de conexões desenvolvida pelos autores, e que pode inspirar uma nova família de estruturas. Porém, ainda é necessário aplicar o conceito desenvolvido em outras geometrias, com nexors curvos, uma vez que a geometria da conexão deve ser determinada com base na geração da estrutura com auxílio de métodos de *form-finding*. O artigo apresentado por Parigi *et al,* (2014) apresenta uma proposta de conexão, sendo uma extensão dos estudos de Pellegrino e Calladine sobre um tipo específico de articulação para a montagem de ERs. Apesar dos resultados iniciais positivos sobre a avaliação do número de articulações internas e externas, ainda é "[...] necessário trabalhos adicionais para completar as especificações de todas as possíveis condições de restrições, como a inclusão de articulações deslizantes [...]" (PARIGI *et al,* 2014, p. 58. Traduzido pelos autores).

Algumas abordagens específicas extrapolam alguns dos desafios presentes no desenvolvimento das ER. Em uma abordagem biomimética, “um dos principais problemas é o sistema de conexão entre todos os nexors. É possível projetar ou até mesmo fabricar elementos usando sistemas de encaixes *dovetail* ou *bridle*, mas o processo de montagem seria difícil ou até impossível” (CASTRIOTTO; GIANTINI e CELANI, 2019, p. 618. Traduzido pelos autores). De acordo com Widyowijatnoko, Aditra e Cungwin (2021), o sistema *rection*, um desdobramento das ERs, apresenta vantagens interessantes quando comparado a outros tipos de ERs, inclusive os Tensegrities. Porém, muitas questões estão em aberto, sobretudo relativos ao comportamento estrutural; “[...] a pesquisa também utilizou o método de relaxamento dinâmico para simular o comportamento estrutural. Um método analítico mais preciso será necessário” (WIDYOWIJATNOKO; IRWANNUDDIN e ADITRA, 2019, p. 477. Traduzido pelos autores).

Os principais tópicos que sintetizam esta lacuna são:

a) dificuldade em prever o comportamento estrutural das conexões e de realizar análises precisas em cada uma; e
b) em geral, as conexões são resolvidas depois do processo de geração das ERs, sem aproveitar a oportunidade de utilizá-las como um dos parâmetros iniciais do projeto.

5.4.3.4. Dificuldade de extrapolação de protótipos para aplicações em grande escala (5 artigos)

Apesar da existência de ERs em grandes escalas, como no abrigo arqueológico de Bibracte, descrito por Gelez, Aubry e Vaudeville (2014a), ou na parte externa do observatório de Mount Rokko-Shidare (Figura 21), muitas das inovações ficam restritas a escalas reduzidas, em consequência de restrições (orçamentárias e de tempo) do ambiente acadêmico. Gutierrez, Flores e Preciado (2016) sugerem que a pesquisa feita por eles poderia ter uma continuação com a incorporação de princípios de *biomimicry* e *biomimetics* para a geração de ERs, e que essas estruturas sejam uma forma de “[...] ensinar estudantes sobre sistemas estruturais recíprocos e alterar paradigmas construtivos nas comunidades estudantis [...]” (GUTIERREZ; FLORES e PRECIADO, 2016, p. 9. Traduzido pelos autores).

Figura 21: Estrutura externa do observatório no monte Rokko-Shidare, no Japão.

Fonte: Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rokko-shidare_%E5%85%AD%E7%94%B2%E6%9E%9D%E5%9E%82%E3%82%8C-Rokko_garden_terrace_B217107.JPG>. Autor: 松岡明芳 (tradução: Matsuoka Akiyoshi). Licença CC 3.0. Acesso em: 21 de janeiro de 2020.

De fato, a construção de pequenos pavilhões utilizando ERs é uma prática relativamente comum e pode ser observada em diversos artigos analisados, mas que ainda são distantes da realidade arquitetônica. Como exemplo, pode-se mencionar a seguinte consideração: “Os sete protótipos [...] foram elaborados em um ambiente baseado em pesquisa, e o escopo pretendido foi de utilizá-los como o ponto de partida para o desenvolvimento de variações do mesmo conceito e de alguma aplicação real no contexto arquitetônico [...]” (PARIGI e PUGNALE, 2014, p. 176. Traduzido pelos autores).

Em outra experiência, o material composto desenvolvido por Gheorghe e Vierlinger (2017) foi também utilizado em uma ER em escala reduzida. Sua aplicação em grande escala demandaria “[...] um aprofundamento sobre avaliações estruturais do material composto desenvolvido e

verificar a durabilidade a longo prazo, com exposição a intempéries (ultravioleta e umidade) [...]" (GHEORGHE e VIERLINGER, 2017, p. 7, art. 18. Traduzido pelos autores). Uma alternativa proposta por alguns autores para a aplicação das estruturas em maiores escalas seria de abordagens *bottom-up*, mas para isso é necessário "[...] incentivar pesquisas adicionais que levem as ERs (planares) dos laboratórios de pesquisa para o uso final como uma tipologia arquitetônica contemporânea de 'bricolagem' [...]" (ARAULLO e HAEUSLER, 2017, p. 548. Traduzido pelos autores). Xian, Hoban e Peters (2020) afirmam que o próximo obstáculo a ser superado em sua pesquisa é o de aumentar a escala de fabricação e dos protótipos, além de aplicações em sistemas autoportantes e com geometrias complexas.

Os principais tópicos que sintetizam esta lacuna são:

a) há uma dificuldade em aproveitar efetivamente o conhecimento acadêmico desenvolvido em projetos na escala da construção civil; e
b) as inovações desenvolvidas pelo conhecimento científico ficam, muitas vezes, restritas ao ambiente acadêmico, sem implementação efetiva na indústria.

5.4.3.5. Necessidade de incorporar o processo de montagem e do sistema de cobertura (6 artigos)

De modo geral, é reconhecido que uma das principais vantagens das ERs é sua facilidade e agilidade de montagem. "A velocidade de construção de ERs em edifícios modulares permanentes é comparável ao de outros sistemas leves industrializados. Por outro lado, construções temporárias de ERs podem ser erguidas em um período relativamente curto [...]" (LARSEN, CHILTON e CHOO, 1999, p. 81. Traduzido pelos autores). Essa frase sugere a aplicação dessas estruturas para a produção de estruturas desmontáveis. Ainda mais interessante é a possibilidade de que essas estruturas podem ser aprimoradas de temporárias para permanentes, conforme é sugerido por Larsen e Lee (2013).

Entretanto, quando a complexidade geométrica aumenta e/ou é almejada para uma estrutura permanente, o processo de montagem se torna mais complexo e pode demandar profissionais mais especializados para sua execução. Isso pode ser exemplificado pelo sistema de montagem apresentado por Araullo (2018), que "[...] exige o uso da fabricação digital e pode ser beneficiado por processos CNC e de robótica avançada [...]" (ARAULLO, 2018, p. 316.

Traduzido pelos autores). Mas é necessário considerar que alguns estudos detalhados sobre o processo de montagem apontam a necessidade de maiores "[...] definições e análises sobre os estágios intermediários da construção de estruturas recíprocas [...]" (BERNABEU LARENA e GARCÍA MÉNENDEZ, 2014, p. 67. Traduzido pelos autores). Esse também é um dos desdobramentos propostos por Song *et al,* (2013), ao mencionar a necessidade de se desenvolver um estudo e planejamento computacional que determine a ordem de montagem das ERs geradas pela ferramenta feita pelos autores. A ferramenta digital desenvolvida por Gothelp *et al,* (2019) é limitada às ERs baseadas em padrões triangulares ou quadrangulares, ao mesmo tempo que utiliza encaixes por entalhes simples e não incorpora o sistema de vedação ou cobertura.

Os principais tópicos que sintetizam esta lacuna são:

a) possibilidade de se converter estruturas temporárias em permanentes não é bem definida ou explorada;
b) o processo de montagem de estruturas permanentes pode ser muito complexo; e
c) os estágios intermediários de montagem são, muitas vezes, desconsiderados.

5.5. SÍNTESE

Estruturas recíprocas em madeira podem ser capazes de responder a demandas de sustentabilidade ambiental e complexidade da arquitetura contemporânea. A RSL analisou 63 artigos dentre 238 resultados encontrados. É importante ressaltar que, apesar do estudo ter identificado muitos artigos, outros podem ter escapado a essa busca por causa de diferentes nomenclaturas ou da não indexação nas bases utilizadas.

A partir de variações conceituais e de classificação, o conceito de ERs adotado nesta pesquisa é relacionado a estruturas tridimensionais não-hierárquicas baseadas em padrões em malha, compostas por elementos mutualmente suportados em um sistema fechado. A região de conexão, estabelecida por no mínimo três nexors diferentes, é conhecido como leque, sendo este o padrão geométrico essencial. Em termos estruturais, ao relacionar o tipo de ER explorado nesta pesquisa com as classificações de Engel (2001), trata-se de um sistema de seção-ativa, uma vez que os esforços predominantes são de flexo-tração e flexo-compressão.

A leitura dos artigos permitiu uma melhor compreensão das origens históricas e da relevância desse tipo de estrutura, bem como das diferentes abordagens e estratégias de produção. As lacunas identificadas indicam linhas de pesquisa que poderiam contribuir para uma maior aplicabilidade das ERs em larga escala. Alguns dos problemas exigem tempo para serem solucionados, como as demandas por processamento computacional e a necessidade de avanços tecnológicos em outras áreas – principalmente computação e robótica. Entretanto, novas implementações computacionais de métodos de análise estrutural e a criação de novos detalhes construtivos, que considerem os mecanismos de conexão e as propriedades do material, podem contribuir com a geração de estruturas mais interessantes e viáveis sob diferentes aspectos.

Além disso, ao correlacionar lacunas identificadas por diferentes autores, vislumbra-se a possibilidade de solucionar aspectos de eficiência estrutural, fabricação e montagem pelo aprofundamento em estudos e pesquisas sobre as conexões, uma vez que elas podem ser responsáveis pelo tipo de transmissão de força entre os elementos, atuando como mecanismo de suporte para os estágios intermediários de montagem. Há também a oportunidade de acumular a complexidade dos sistemas nesses elementos, fazendo com que eles absorvam a transição de geometrias de leques em uma mesma estrutura.

Mais especificamente no caso desta tese, a RSL foi fundamental para identificar alguns dos aspectos das ERs que podem ser potencialmente solucionados com o uso de modelagem computacional. As lacunas identificadas sustentam a importância de encontrar alternativas para o sistema de conexões e para aplicação das ERs em geometrias complexas, considerando seu comportamento estrutural e processos de fabricação digital.

FESTOOL
STOP
KM 1500 SE

6. MATERIAIS E MÉTODOS: A CIÊNCIA DO ARTIFICIAL

> *Como a inteligência está se desacoplando da consciência, e como a inteligência não consciente está se desenvolvendo a uma velocidade vertiginosa, os humanos devem ativamente fazer o upgrade de suas mentes se quiserem permanecer no jogo.*
>
> *HARARI, Yuval Noah*[13].

Durante séculos o campo científico-acadêmico foi dividido em duas grandes esferas, ambas fundamentadas em lógicas dedutivas: uma relativa às ciências do natural, com o propósito de compreender fenômenos complexos, embasada em um conhecimento descritivo e analítico, procurando respostas de como as coisas são e porque são de tal forma. Outra relativa às ciências sociais, com o objetivo de entender, refletir e descrever eventos subjetivos, em geral ocasionados pela ação humana (SIMON, 1996). Em ambas a **pesquisa** teria como propósito a produção de um conhecimento que poderia ser abstraído, generalizado e usado por outros cientistas em situações diversas (STAPPERS e GIACCARDI, 2014).

Contudo, em 1996 uma terceira esfera foi cunhada nos meios acadêmicos por Herbert Simon, reconhecida como as ciências do artificial, apresentada em livro homônimo. Diferentemente das outras duas, esta é baseada em raciocínios abdutivos (STAPPERS e GIACCARDI, 2014) e tem como objetivo projetar e desenvolver sistemas que ainda não existem ou promover mudanças substanciais em situações pré-existentes, com o intuito de alcançar melhores resultados (SIMON, 1996). O conceito chave das ciências do artificial é o *Design Science*, que sugere que o conhecimento não seja produzido apenas por **pesquisa**, mas também por ***design*** **(projeto)**, com o propósito de se desenvolver soluções específicas que podem ser utilizadas imediatamente por outros cientistas, profissionais da área ou por alguma indústria (STAPPERS e GIACCARDI, 2014).

O conceito de *Design Science* não é realmente novo, sendo que Leonardo Da Vinci teria sido o primeiro a reconhecer a importância das ciências que lidam com o artificial como uma forma de resolver problemas que cientistas de outras esferas não conseguiam solucionar. Porém, o

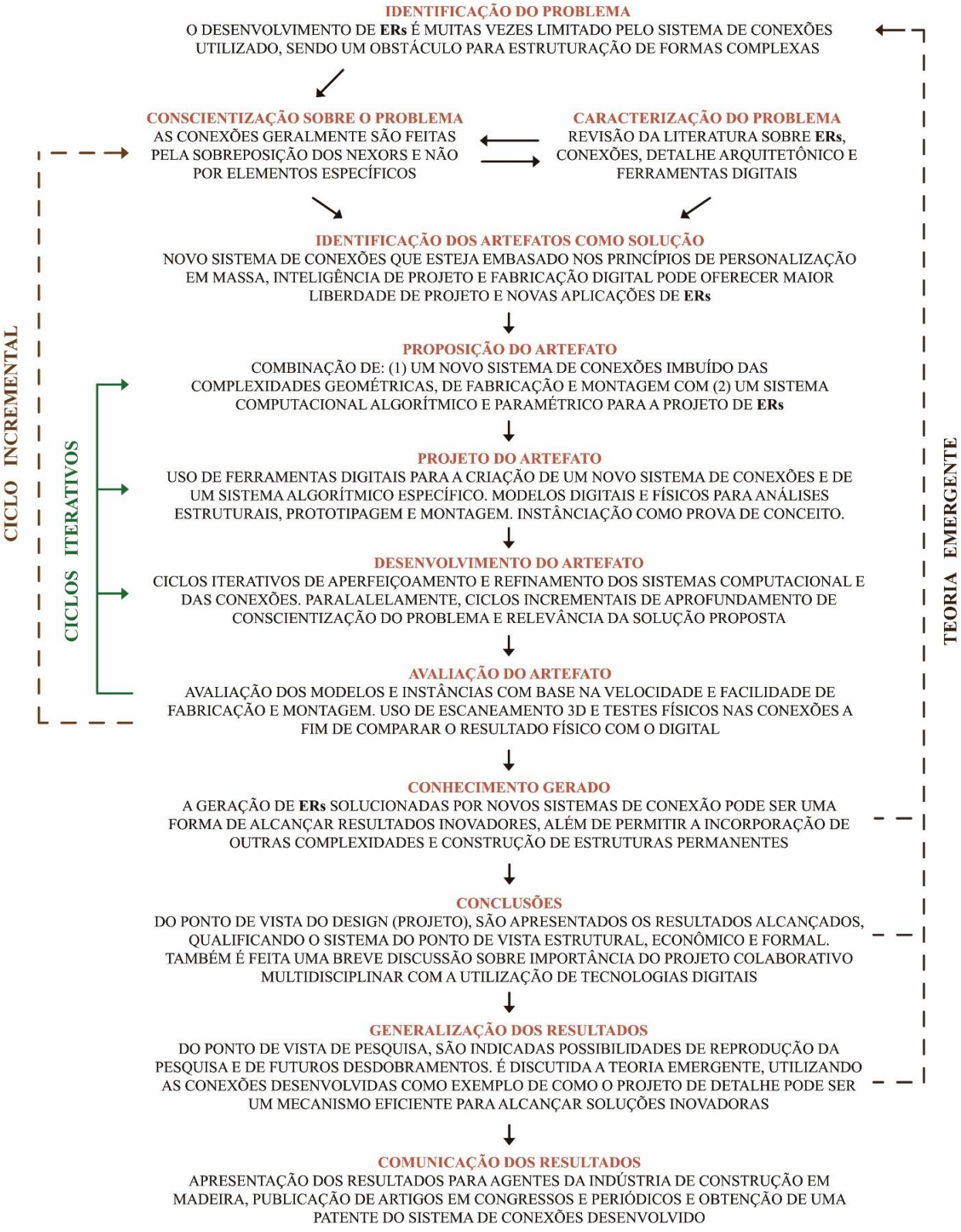
[13] HARARI, Yuval Noah. **Homo Deus**: Uma breve história do amanhã. Tradução de Paulo Geiger. 1 ed. São Paulo: Companhia das Letras, 2016, p. 355.

pioneirismo do trabalho de Simon foi fundamental para o reconhecimento acadêmico de métodos de pesquisa baseados no conceito de *Design Science* (DRESCH, LACERDA e ANTUNES JÚNIOR, 2015). Suas ideias fomentaram o desenvolvimento de diversos métodos científicos, como o *Research Through Design* e o *Design Science Research* (DSR) (VAISHNAVI e KUECHLER, 2015). Além disso, diversas características presentes em métodos baseados no conceito de *Design Science* são consonantes com aquelas atribuídas aos processos de inovação, tais como a não-linearidade, a iteratividade, as analogias e a recombinação de conceitos previamente existentes (KUMAR, 2013).

O método científico DSR tem como proposta a obtenção do conhecimento necessário para a concepção e desenvolvimento de **Artefatos** que solucionem problemas reais, redirecionando o foco das discussões estabelecidas entre teoria e prática. (LACERDA *et al,* 2013; DRESCH, LACERDA e ANTUNES JÚNIOR, 2015). Bax (2013) explicita que o DSR tem como premissa a construção, investigação, validação, aprimoramento e avaliação de **Artefatos** que possam resolver novos problemas práticos, abrangendo processos, práticas e comportamentos intrínsecos à produção. Além disso, Vaishnavi e Kuechler Junior (2015) indicam que o DSR apresenta, ao menos, cinco etapas distintas: Conhecimento sobre o problema; Sugestão de solução; Desenvolvimento; Avaliação e; Conclusão.

Os **Artefatos** desenvolvidos por este método podem ser classificados de diferentes formas, dependendo da interpretação de cada autor. Por isso, nesta pesquisa são considerados cinco produtos ou subprodutos com base nas definições propostas por March e Smith (1995) e Dresch, Lacerda e Antunes Júnior (2015): **Construto**, **Modelo**, **Método**, **Instância** e **Teoria Emergente**. O DSR é utilizado com o intuito de se obter uma solução inovadora para conexões de ERs, com o uso de processos e ferramentas digitais, simulações, desenvolvimento incremental, raciocínio abdutivo e combinação de soluções e propostas. A Figura 22 apresenta um esquema geral relativo ao desenvolvimento desta pesquisa.

Figura 22: Diagrama de desenvolvimento da pesquisa utilizando o DSR.



Fonte: elaborado pelo autor, 2021. Baseado no esquema definido por DRESCH, LACERDA e ANTUNES JÚNIOR, 2015, p. 124.

6.1. ETAPAS RELATIVAS AO PROBLEMA

Os processos de identificação, conscientização e caracterização do problema ocorreram em quatro frentes diferentes, que juntas serviram como a fundamentação teórica-conceitual dos temas centrais da pesquisa e para garantir a relevância do **Artefato** como uma solução inovadora: (a) Revisão geral da literatura sobre Detalhe Arquitetônico, cenário da madeira na construção civil e principais sistemas de conexões, e uso de tecnologias digitais de projeto e fabricação; (b) Revisão Sistemática da Literatura sobre Estruturas Recíprocas e; (c) Atualização da literatura a partir de marcos de desenvolvimento do **Artefato**.

Como parte do processo de identificação do problema e de aproximação com os temas centrais, foi estabelecido contato com agentes da Indústria da construção civil em madeira do estado de São Paulo, sendo um passo importante para compreender se e quais limitações existem para a produção do **Artefato** em nível industrial. Por este motivo, foram feitas visitas técnicas a duas indústrias e foram elaborados relatórios (Apêndice I) referente a cada uma delas, destacando as principais informações obtidas.

6.1.1. Revisão geral da literatura

Foi realizada uma Revisão Geral da Literatura sobre os temas (i) Detalhe Arquitetônico, (ii) cenário da construção em madeira, (iii) principais tipos de conexão em estruturas de madeira (iv) e uso de tecnologias digitais para projeto e fabricação. Essa etapa foi conduzida tendo como base um arcabouço de conhecimento prévio sobre os assuntos, além da realização de uma extensa pesquisa acerca de publicações em periódicos e anais de congresso em diferentes portais e Bases de Dados, sendo: Sistemas de Biblioteca da Unicamp (SBU); Periódicos Capes; Web of Science; Scielo; Scopus; DSpace MIT; CumInCAD; Research Gate; e Google Scholar. As buscas utilizaram como palavras-chave ou *strings* os seguintes termos: (1) “Architecture” AND “Detail” AND “Wood” OR “Timber”; (2) “Architecture” AND “Digital Fabrication” AND “Wood” OR “Timber”; (3) “Detail*” AND “Digital Fabrication”; (4) “Detail*” AND “Timber Joint” OR “Wood Joint”; (5) “Wood Joint” OR “Timber Joint” AND “Digital Fabrication”; e (6) “Wood Joint” OR “Timber Joint” AND “Architecture”.

6.1.2. Revisão Sistemática da Literatura (RSL)

Foi realizada uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) sobre ERs, utilizando as seguintes bases de dados para as buscas: Periódicos CAPES; Sage Journals; CumInCAD; IngentaConnect; Compendex; SCOPUS; e Web of Science. Os termos ou *strings* de busca utilizados foram: (1) “Nexorade”; (2) “Reciprocal Frame”; (3) “Reciprocal Frame” AND “Wood”; (4) “Reciprocal Frame” AND “Timber”; (5) “Reciprocal Frame” AND “Digital Fabrication”; (6) “Reciprocal Frame” AND “Lamella”. (7) “Reciprocal Frame” AND “Zollinger”.

6.1.3. Ciclos incrementais de conscientização do problema

A conscientização do problema ocorreu por meio de ciclos incrementais, feitos pela contínua atualização da literatura utilizada nesta pesquisa. Determinados marcos do desenvolvimento do **Artefato**, como a publicação de artigos, novas versões do algoritmo, refinamento do sistema de conexões e aprimoramento de **Modelos** de análises estruturais, por exemplo, desencadeavam uma nova revisão sobre certos aspectos. Esse processo reforçava aspectos de inovação e imparidade da solução proposta, além de sugerir novas reflexões sobre os temas centrais da pesquisa.

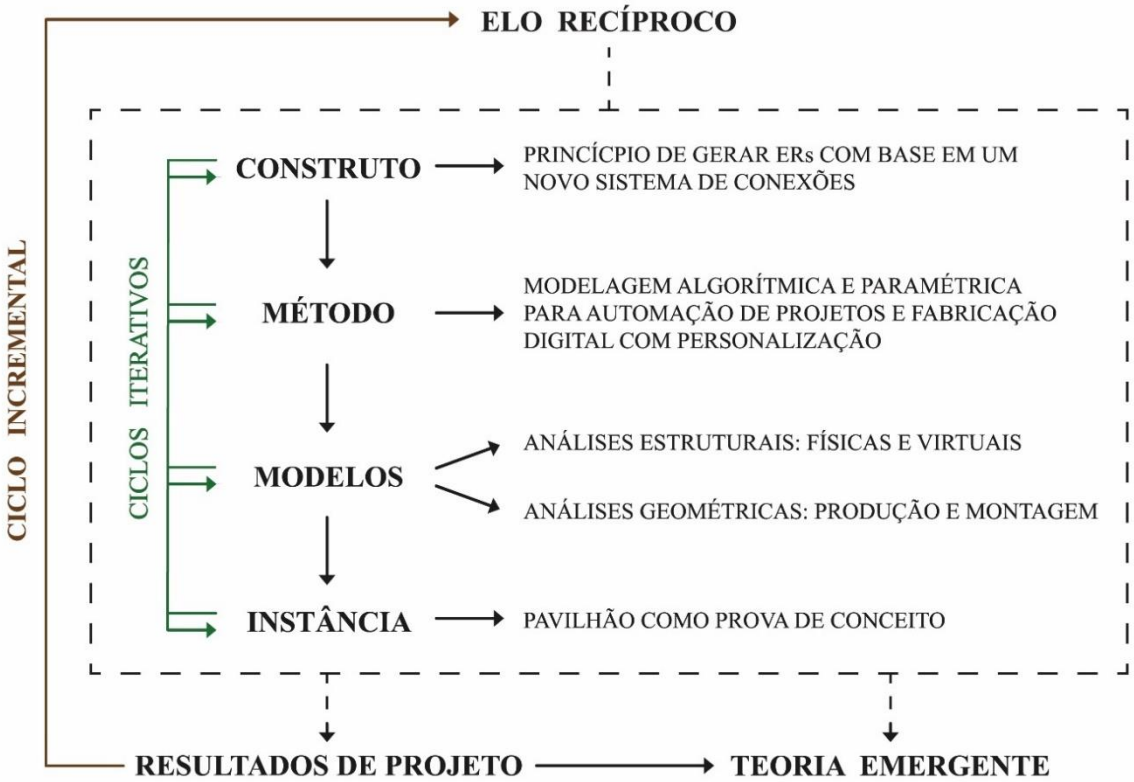
6.2. ETAPAS RELATIVAS AO ARTEFATO

As etapas relativas ao problema permitiram uma maior compreensão do universo de pesquisa sobre ERs, indicando quais os principais pesquisadores e laboratórios que trabalham com este tema no mundo. Com isso em mente e com o intuito de aperfeiçoar aspectos específicos da pesquisa e do desenvolvimento do **Artefato**, foi obtida uma Bolsa de Estágio de Pesquisa no Exterior (BEPE) oferecida pela FAPESP, utilizada para estágio na The Royal Danish Academy (KADK), sob supervisão da pesquisadora Olga Popovic Larsen, uma das principais referências mencionadas na RSL. O estágio ocorreu do início de março até o final de novembro de 2020. Além disso, dado o caráter interdisciplinar da pesquisa, a presença e participação do coorientador Felipe Tavares da Silva foi imprescindível para a obtenção de bons resultados, sobretudo nas etapas de modelagem e avaliação dos **Modelos** estruturais.

A partir do embasamento teórico e da compreensão do problema, foi possível identificar e propor um **Artefato** como solução, que por sua vez apresenta uma relação direta com o Objetivo

Geral desta pesquisa; conforme mencionado nos objetivos, trata-se do desenvolvimento do Elo Recíproco. O **Artefato** foi constituído por subprodutos, sendo eles (a) **Construto**, (b) **Método**, (c) **Modelos** e, (d) **Instâncias**, os quais podem ser relacionados com os Objetivos Específicos. Há ainda um quinto subproduto, (e) **Teoria Emergente**, que é relativo aos resultados, conclusões e reflexões proporcionadas pelo processo de desenvolvimento do **Artefato** em si. As relações entre os subprodutos que constituem o **Artefato** são apresentadas na Figura 23. Em seguida, são apresentados os processos e etapas de desenvolvimento dos quatro primeiros subprodutos, tendo como base as definições de March e Smith (1995) e Dresch, Lacerda e Antunes Júnior (2015).

Figura 23: Diagrama evidenciando as relações entre os subprodutos que constituem o **Artefato**.



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

6.2.1. Construto

O **Construto** pode ser entendido como a conceituação utilizada para descrever problemas, especificar soluções e pensar sobre as tarefas a serem executadas (DRESCH, LACERDA e ANTUNES JÚNIOR, 2015). No âmbito desta pesquisa, o **Construto** é referente ao princípio de solucionar ERs a partir de um sistema computacional, com a produção de conexões especiais

feitas pelo preenchimento do núcleo dos leques. O **Construto** é baseado nos conceitos de Detalhe Arquitetônico, Personalização em Massa e Fabricação Digital e seu desenvolvimento é feito a partir dos ciclos incrementais de conscientização do problema, com avanços em questões específicas a partir de resultados parciais do **Artefato**. Nesse sentido, as regras e os princípios estabelecidos pelo **Construto** são refinados e manifestados no **Método**, nos **Modelos** e na **Instância**.

6.2.2. Método

O **Método** é referente ao conjunto de etapas ou passos necessários para executar uma determinada tarefa, com a incorporação dos princípios estabelecidos no **Construto** (DRESCH, LACERDA e ANTUNES JÚNIOR, 2015). Neste caso, o **Método** é entendido como o sistema computacional algorítmico, cujo propósito é a geração automática de diferentes configurações e geometrias de ERs e os respectivos sistemas de conexão. Para compreender como se deu o desenvolvimento do **Artefato**, é fundamental apresentar as principais ferramentas utilizadas.

6.2.2.1. Interface de programação visual Grasshopper para Rhinoceros

O desenvolvimento do algoritmo foi feito, majoritariamente, na interface de programação visual *Grasshopper*, vinculada ao programa de modelagem tridimensional *Rhinoceros*. Existem algumas diferenças importantes entre o uso de uma linguagem visual com relação às linguagens mais tradicionais, feitas por códigos escritos (como é o caso de C#, C++ ou Python). Por um lado, as linguagens textuais são mais complexas e independem de outros softwares, ao mesmo tempo que garantem maior liberdade aos desenvolvedores. Por outro, o uso de uma interface como o *Grasshopper* tende a agilizar o processo de desenvolvimento, pois erros e / ou inconsistências são destacados de forma visual. Também possui componentes pré-definidos, que podem ser combinados graficamente.

A escolha pelo *Grasshopper* para o desenvolvimento do algoritmo foi decorrente de alguns fatores principais: (1) conhecimento prévio e facilidade de uso da ferramenta pelo pesquisador; (2) possibilidade de combinar a modelagem paramétrica com simulações de desempenho estrutural; (3) facilidade em automatizar processos, sob a lógica file-to-Factory; (4) capacidade de utilizar linguagem textual em questões mais específicas e; (5) grande quantidade de plug-

ins, feitos por uma vasta comunidade internacional, que podem auxiliar na criação do algoritmo. Neste caso, foram utilizados os seguintes plug-ins:

a) Mesh+ v. 2.1.03 (MANS, 2019): a proposta desse plug-in é expandir as possibilidades de manipulação, controle e edição de malhas virtuais, além de possuir componentes de geração de malhas entrelaçadas.
b) Pufferfish v. 3.0 (PYKER, 2021): plug-in com 330 componentes focados em manipulação e edição de geometrias e malhas, com maior nível de personalização dos parâmetros de entrada.
c) Weaverbird v. 0.9.0.1 (PIACENTINO, 2009): plug-in de modelagem e edição de malhas topológicas, com operadores de subdivisão e de transformações complexas. Permite a reconstrução da forma e a subdivisão por malhas, auxiliando na organização dos dados para a fabricação.
d) OpenNest (VESTARTAS, 2021): utilizado para o processo de *nesting*; agrupar, orientar e ordenar geometrias dentro de um limite (em geral definido pelas dimensões de materiais que serão usinados), preparando o arquivo para Fabricação Digital.
e) Human (HEUMANN, 2018): possui componentes que podem ser utilizados para referenciar e representar geometrias, associando elementos de identificação objetos modelados. Também possui uma série de componentes que auxilia a manipulação de *data tree* (dados em árvores).
f) Karamba3D v. 1.3.3 (PREISINGER, 2013; PREISINGER e BOLLINGER UND GROHMANN ZT GMBH, 2021): ferramenta paramétrica para engenharia estrutural, possui um motor de física em tempo real usado para simulações e análises pelo Método dos Elementos Finitos.
g) Scripts em linguagem textual *Python* para a etapa de análises estruturais.

6.2.2.2. Plug-in de simulação estrutural Karamba3D

Dentre os plug-ins utilizados, é necessário aprofundar as explicações acerca do funcionamento do Karamba3D, pois está diretamente vinculado com os processos de simulação e análise de desempenho estrutural das ERs geradas. Além disso, é importante esclarecer que, apesar do Karamba3D estar integrado ao algoritmo desenvolvido, trata-se de uma ferramenta

independente. Isso significa que existe a possibilidade de, futuramente, ser substituída por outras opções que sejam mais adequadas para o processamento de ERs.

Esse plug-in possui um motor de processamento que realiza simulações pelo Método de Análise por Elementos Finitos (MEF), tendo como base **Modelos** de barras e informações que conformam a tridimensionalidade do modelo. Isso significa, por exemplo, que uma linha será entendida como o eixo longitudinal de uma viga e a ela serão atribuídas as dimensões e orientação relacionadas a seção transversal como dados puramente numéricos, e não geométricos. O processamento da simulação também depende das propriedades dos materiais e das cargas aplicadas, que também são inseridos como dados numéricos.

A forma como as simulações estruturais são feitas no Karamba3D apresenta algumas implicações no processo de desenvolvimento algorítmico-paramétrico. Por um lado, os valores de entrada usados no algoritmo de geração das ERs podem estar diretamente associados com os **Modelos** usados nas simulações, o que significa que quaisquer modificações paramétricas na geometria afetam, imediatamente, os resultados estruturais. Por outro, existe uma limitação em relação a como elementos tridimensionais complexos (como ligações, por exemplo) podem ser simulados, sendo necessário recorrer a abstrações e informações adicionais que assegurem a precisão dos resultados obtidos. Além disso, o plug-in não computa materiais com características anisotrópicas (como é o caso da grande maioria de espécies de madeira). Dito isso, a explicação do funcionamento do plug-in é separada em três partes principais: i) modelagem e atribuição de informações; ii) processamento e; iii) visualização dos dados obtidos.

i. A geração de **Modelos** virtuais utilizados como base pelo plug-in depende de um conjunto de informações que podem ou não estar diretamente relacionadas com o processo de modelagem das ERs. Em outras palavras, parte dos dados é obtida em uma das saídas do algoritmo (relacionadas com aspectos geométricos: eixos dos nexors, sentido e dimensões das seções transversais dos nexors, elementos que representam as conexões e pontos de apoio). Enquanto os parâmetros de entrada específicos estão relacionados com propriedades dos materiais (módulo de elasticidade, módulo de cisalhamento, peso específico) e esforços mecânicos (forças gravitacionais e cargas adicionais).

ii. Todas as informações citadas no item anterior são combinadas em componentes específicos do plug-in e, então, inseridas no motor de processamento do Karamba3D. Este processo resulta em um modelo tridimensional com valores referentes aos deslocamentos e esforços de primeira e segunda ordem, apresentando os valores das Forças Normais, Forças de Cisalhamento e Momentos Fletores em cada um dos nexors, bem como o Deslocamento da estrutura global. Além disso, um dos motores de cálculo do Karamba3D avalia o fator de carga de flambagem para a estrutura, variando entre zero e um, sendo que um ou mais indica o colapso da estrutura. As simulações realizadas dessa forma também permitem visualizar padrões de deformação e do comportamento estrutural global.

iii. Os valores referentes aos esforços podem ser apresentados de diversas maneiras, sendo uma das mais comuns a distribuição e organização dos dados em tabelas e gráficos. O uso de ferramentas digitais também sucinta uma alternativa que pode facilitar a compreensão, dada a possibilidade de se relacionar os dados diretamente com o modelo virtual tridimensional da estrutura. Para isso, foram utilizados alguns dos componentes de visualização que fazem parte do próprio Karamba3D, associando os valores dos esforços estruturais a um sistema de gradação de cores que indicam a intensidade e o local das principais forças em cada parte de cada nexor.

6.2.3. Modelos

Os **Modelos** são compreendidos como o conjunto de proposições que expressam diferentes relações do **Construto**, muitas vezes como representações da realidade (DRESCH, LACERDA e ANTUNES JÚNIOR, 2015). Durante o desenvolvimento desta pesquisa, foram elaborados **Modelos** com diferentes propósitos, majoritariamente divididos em dois grupos: (i) **Modelos** para análises estruturais e (ii) **Modelos** para análises geométricas. Além disso, a elaboração de **Modelos**, protótipos e simulações é reconhecida como parte fundamental do PDP – Processo de Desenvolvimento de Produto (VOLPATO, 2007), uma vez que podem antecipar problemas, testar hipóteses rapidamente e podem exemplificar ideias. Os processos de Fabricação Digital utilizaram arquivos em extensão DXF ou STL (gerados no **Método**) em diferentes softwares CAM (*RDWorks*, *Repetier-Host, ArtCAM, RhinoCAM* e *SRP Player Pro*), para elaboração do projeto de usinagem. Os **Modelos** fabricados na Unicamp tiveram auxílio do técnico do

Laboratório de Modelos e Maquetes da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Rafael Corrêa Remédio. Os produzidos na KADK tiveram auxílio do aluno de doutorado Xan Browne, orientado pela professora Olga Popovic Larsen.

6.2.3.1. Modelos para análises geométricas, de produção e de montagem

Os principais focos desses **Modelos** eram: a verificação de inconsistências entre os **Modelos** virtuais e físicos, explorar diferentes técnicas de fabricação e compreender a lógica de montagem das conexões e das estruturas. Foram modeladas diversas geometrias de conexões e de estruturas em ambiente virtual, e um número delas foi produzido em escala reduzida ou 1:1. Além disso, alguns **Modelos** foram produzidos por alunos de graduação em Arquitetura e Urbanismo e de Pós-Graduação em Arquitetura, Tecnologia e Cidade, na Unicamp, com o objetivo de testar as primeiras versões do algoritmo. Considerando a interação humana, um projeto foi submetido, avaliado e aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa (CEP) da universidade, sob CAAE #17484819.8.0000.8142.

Os processos de fabricação dos protótipos foram realizados por técnicas manuais, auxiliadas por equipamentos digitais ou sob uma lógica file-to-Factory. Os principais equipamentos utilizados para a produção foram aqueles disponíveis no LAPAC (Laboratório de Automação e Prototipagem para Arquitetura e Construção) da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo e do Espaço Plasma (Figura 24), ambos da Universidade Estadual de Campinas: (1) CNC Router Vitor Ciola (3 eixos, 1000x2000x300mm, mesa de vácuo); (2) CNC Router Roland MDX 540 (dimensões originais: 520x440x155mm; com eixo rotacional: 177,8x370,8mm); (3) Cortadora a laser Combat (100w, 1200x900mm); (4) Impressora 3D Felix (255x205x225mm). Também foram utilizadas diversas ferramentas de carpintaria disponíveis nas oficinas da KADK.

Figura 24: Vista do Espaço Plasma da Unicamp, com os equipamentos CNC utilizados para a produção de alguns dos **Modelos** desenvolvidos na pesquisa. Boa parte dos equipamentos nesta sala foram doações vindas do LAPAC.

Fonte: Acervo pessoal, 2022.

6.2.3.2. Modelos para análises estruturais virtuais e físicas

Os **Modelos** virtuais serviram para a obtenção de informações relativas ao desempenho estrutural da estrutura global ou das conexões obtidas por simulações baseadas no Método de Elementos Finitos (MEF). Para analisar as geometrias tridimensionais das conexões, um leque isolado foi modelado e analisado pelo coorientador da pesquisa, Felipe Tavares da Silva, utilizando MEF no software *ANSYS*. Outro modelo, simplificado e baseado em elementos lineares, foi analisado por MEF no plug-in *Karamba3D* para *Grasshopper*. Os resultados obtidos por essas análises foram comparados e, de modo geral, indicaram valores satisfatórios. Os **Modelos** para as análises físicas foram produzidos no espaço Plasma, da Unicamp, e tiveram como foco uma melhor compreensão acerca do desempenho estrutural das conexões. As verificações foram feitas por meio de ensaios destrutivos realizados no laboratório de estruturas da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, na Unicamp, com uso de uma Prensa Universal de Ensaios, com capacidade de 100 toneladas (Figura 25). As informações obtidas foram utilizadas para recalibrar os **Modelos** virtuais.

Figura 25: Prensa Universal de Ensaios utilizada nos ensaios destrutivos das conexões

Fonte: Acervo pessoal, 2021.

6.2.3.3. Bases de cálculos utilizadas

Os **Modelos** estruturais resultantes de simulações virtuais ou ensaios físicos apresentam os valores dos principais esforços locais e globais da estrutura. Essas informações, são utilizadas para as verificações de desempenho estrutural, que devem seguir recomendações e exigências presentes em normas e legislações. No caso desta pesquisa, as bases de cálculo adotadas para as avaliações e verificações estão presentes na NBR 7190 – Projeto de Estruturas de Madeira (ABNT, 2022), no livro Estruturas de Madeira (PFEIL e PFEIL, 2003) e no guia de projeto do Eurocode 5, versão de 1995 (PORTEOUS e ROSS, 2013).

Dessa forma, as equações apresentadas a seguir (eq. 1 a eq. 19) foram implementadas no algoritmo, inicialmente, apenas utilizando componentes do Grasshopper. Porém, com o objetivo de otimizar o tempo de processamento (aproximadamente duas vezes mais rápido), foi adotado um script em linguagem Python, desenvolvido pelo coorientador desta tese, Felipe Tavares da Silva.

Dada as características das ERs como estruturas de madeira, foram adotados os coeficientes de minoração ($\boldsymbol{\gamma}$) que, conforme dados tabelados disponíveis na NBR 7190 (ABNT, 2022), assumem os valores de 1,4 para compressão e 1,8 para tração e cisalhamento. Também foi utilizado o coeficiente de fluência ($\boldsymbol{\varphi}$), com valores que dependem da combinação da classe de umidade com a classe de carregamento.

Também foram adotados os coeficientes de modificação ($\mathbf{K_{mod}}$), sendo o produto de três coeficientes parciais, conforme a equação 1: $\mathbf{K_{mod1}}$ considera o tipo de produto de madeira utilizado na estrutura (neste caso, é considerada a categoria de madeira serrada, compensada ou laminada colada) e o tempo de duração da carga, variando entre permanente, longa, média e curta duração e instantânea (0,6, 0,7, 0,8, 0,9 e 1,1, respectivamente); $\mathbf{K_{mod2}}$ é relativo ao efeito da umidade sobre os elementos de madeira, com quatro classes distintas, sendo que as classes 1 e 2 utilizam o valor de 1,0 e as classes 3 e 4 o valor de 0,8.

$$\mathbf{K_{mod}} = \mathbf{K_{mod1}} * \mathbf{K_{mod2}} \qquad \text{(eq. 1)}$$

Os coeficientes $\boldsymbol{\gamma}$ e $\mathbf{K_{mod}}$ são combinados com os valores característicos de resistência do material ($\mathbf{f_{c,k}}$), definindo os valores limites de resistência de projeto ($\mathbf{f_d}$) para compressão ($\mathbf{f_{c,d}}$), tração ($\mathbf{f_{t,d}}$) e cisalhamento ($\mathbf{f_{v,d}}$).

$$\mathbf{f_d} = \mathbf{k_{mod}} * \frac{\mathbf{f_k}}{\boldsymbol{\gamma}} \qquad \text{(eq. 2)}$$

Dada a falta de determinação experimental específica dos materiais utilizados, o módulo de elasticidade efetivo ($\mathbf{E_{ef}}$) é definido pela equação 3, baseado no módulo de elasticidade do material ($\mathbf{E_{c0}}$) definido em tabelas e na literatura.

$$\mathbf{E_{ef} = E_{c0} * k_{mod}} \quad \text{(eq. 3)}$$

Já o módulo de elasticidade transversal efetivo ($\mathbf{G_{ef}}$) pode ser definido pela equação 4. Trata-se de uma aproximação que pode ser empregada quando não houve determinação experimental do módulo de elasticidade na direção normal às fibras, conforme NBR 7190 (ABNT, 2022).

$$\mathbf{G_{ef} = \frac{E_{ef}}{20}} \quad \text{(eq. 4)}$$

Os Momentos de Inércias da seção transversal ($\mathbf{I_y}$ e $\mathbf{I_z}$) são definidos pelas duas versões da equação 5, considerando que os valores de base e altura são invertidos para $\mathbf{I_z}$.

$$\begin{cases} \mathbf{I_y = \frac{t * h^3}{12}} \\ \mathbf{I_z = \frac{h * t^3}{12}} \end{cases} \quad \text{(eq. 5)}$$

Os Raios de Giração mínimos da seção transversal ($\mathbf{i_y}$ e $\mathbf{i_z}$) são definidos pela equação 6.

$$\mathbf{i = \sqrt{\frac{I}{b * t}}} \quad \text{(eq. 6)}$$

Os esforços normais máximos resistentes de projeto ($\mathbf{NxRes_d}$) são definidos pela equação 7, associando os valores $\mathbf{f_d}$ com as dimensões de base ($\mathbf{t}$) e altura ($\mathbf{h}$) da seção transversal do nexor. No caso desta pesquisa, as seções são sempre retangulares.

$$\mathbf{NxRes_d = f_d * (t * h)} \quad \text{(eq. 7)}$$

Os esforços cortantes máximos resistentes de projeto ($\mathbf{VRes_d}$) são definidos pela equação 8, considerando as variações do coeficiente de minoração para os casos de tração e compressão.

$$\mathbf{VRes_d = \frac{2 * f_{v,d} * t * h}{3}} \quad \text{(eq. 8)}$$

Os Módulos de Resistência Elásticos ($\mathbf{W_y}$ e $\mathbf{W_z}$) são definidos pelas duas versões da equação 9, considerando que os valores de base e altura da seção transversal são invertidos para $\mathbf{W_z}$.

$$\begin{cases} \mathbf{W_y = \frac{t * h^2}{6}} \\ \mathbf{W_z = \frac{h * t^2}{6}} \end{cases} \quad \text{(eq. 9)}$$

Esses módulos são utilizados para calcular as os momentos fletores resistentes de projeto ($\mathbf{MyRes_d}$ e $\mathbf{MzRes_d}$), conforme as variações presentes na equação 10, e são calculadas para os casos de compressão e tração.

$$\begin{cases} \mathbf{MyRes_d = f_d * W_y} \\ \mathbf{MzRes_d = f_d * W_z} \end{cases} \quad \text{(eq. 10)}$$

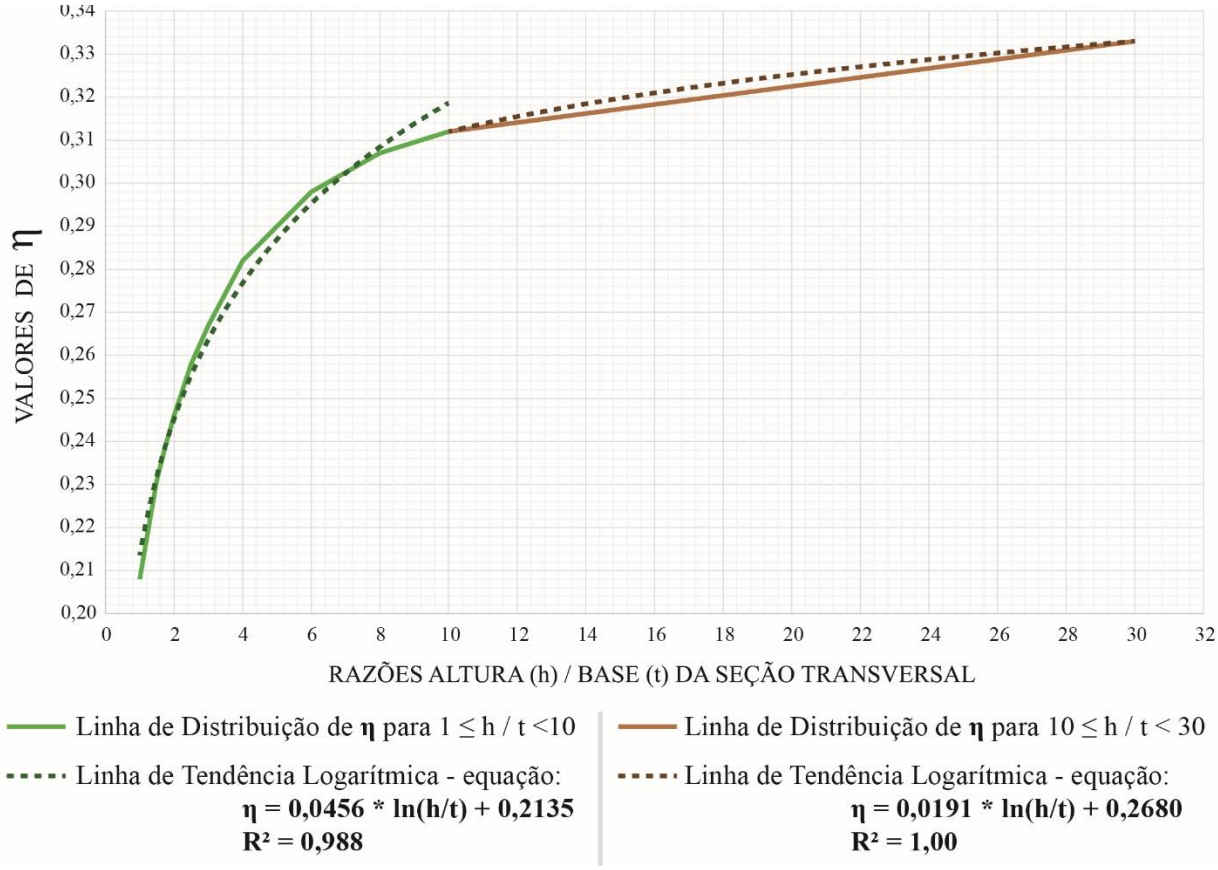
Como as seções transversais dos nexors utilizados nesta pesquisa são sempre retangulares, o cálculo do momento fletor resistente proveniente da torção ($\mathbf{MxRes_d}$) pode ser feito pela equação 11. Essa equação depende de uma das constante ($\boldsymbol{\eta}$) definidas por Timoshenko e Goodier (1951, *apud* PORTEOUS e ROSS, 2013), com valores tabelados no Eurocode 5 para algumas razões entre as dimensões das seções transversais (Tabela 1), que ainda podem ser combinados para se obter soluções aproximadas (PORTEOUS e ROSS, 2013). Assim, os valores de $\boldsymbol{\eta}$ foram inseridos em um gráfico, separados entre a grupos de razões e foram obtidas fórmulas a partir das curvas de tendência (Gráfico 4).

Tabela 2: Valores referentes à constante definida por Timoshenko e Goodier, dada as relações entre dimensões da seção transversal $\left(\mathbf{h/_t}\right)$ dos elementos.

Razão da Seção Transversal $\mathbf{h/_t}$	1,0	1,2	1,3	1,5	1,7	2,0	2,5
Constante $\boldsymbol{\eta}$	0,208	0,219	0,223	0,231	0,237	0,246	0,258
Razão da Seção Transversal $\mathbf{h/_t}$	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0	∞
Constante $\boldsymbol{\eta}$	0,263	0,281	0,291	0,298	0,307	0,312	0,333

Fonte: PORTEOUS e ROSS, 2013, p. 51. Valores referentes à constante $\mathbf{k_2}$ da Tabela 6.2 da literatura.

Gráfico 4: Gráfico gerado a partir dos valores contidos na Tabela 2, equações obtidas a partir das linhas de tendência logarítmicas e valores de R-quadrado.



Fonte: Elaborado pelo autor e pelo coorientador desta tese, 2020.

$$\begin{cases} \mathbf{MxRes_d = h * t^2 * f_{v,d} * \eta} \\ \\ \text{Se } 1 \leq {}^{h}/_{t} < 10: \\ \boldsymbol{\eta = 0,0456 * \ln\left({}^{h}/_{t}\right) + 0,2135} \\ \\ \text{Se } 10 \leq {}^{h}/_{t} < 30: \\ \boldsymbol{\eta = 0,0191 * \ln\left({}^{h}/_{t}\right) + 0,2680} \\ \\ \text{Se } {}^{h}/_{t} \geq 30: \\ \boldsymbol{\eta = 0,3333} \end{cases} \qquad \text{(eq. 11)}$$

Os índices de esbeltez ($\boldsymbol{\lambda}$) são calculados pela equação 12, sendo $\mathbf{L}$ o valor do comprimento longitudinal efetivo do nexor.

$$\boldsymbol{\lambda} = \frac{\mathbf{L}}{\mathbf{b} * \mathbf{t}} \qquad \text{(eq. 12)}$$

Os índices de esbeltez podem variar entre peças curtas ($\lambda \leq 40$), peças medianamente esbeltas ($40 < \lambda \leq 80$) e peças esbeltas ($80 < \lambda \leq 140$). Conforme a NBR 7190 (ABNT, 2022), não é admitido índice com valor superior a 140 em estruturas submetidas a flexo-compressão. Além disso, considerando o foco em ERs, a construção por elementos esbeltos é desconsiderada. Dessa forma, são calculadas as excentricidades acidentais ($\mathbf{e_d}$) pelas duas versões da equação 13. Os valores dos esforços são obtidos pelos resultados das simulações estruturais.

$$\begin{cases} \text{Se } \boldsymbol{\lambda} \leq 40: \\ \mathbf{e_d} = \mathbf{e_a} = \dfrac{\mathbf{L}}{\mathbf{300}} \\ \\ \text{Se } 40 < \boldsymbol{\lambda} \leq 80: \\ \mathbf{e_d} = (\mathbf{e_i} + \mathbf{e_a}) * \left(\dfrac{\mathbf{F_E}}{\mathbf{F_E} - \mathbf{N_d}}\right) \\ \quad \text{Onde:} \\ \quad \mathbf{e_i} = \dfrac{\mathbf{M_{1,d}}}{\mathbf{N_d}} \\ \quad \text{E a Carga Crítica } (\mathbf{F_E}) \text{ é dada por:} \\ \quad \mathbf{F_E} = \dfrac{\boldsymbol{\pi}^{\mathbf{2}} * \mathbf{I} * \mathbf{E_{ef}}}{\mathbf{L^2}} \end{cases} \qquad \text{(eq. 13)}$$

O momento fletor decorrente da presença de excentricidades acidentais ($\mathbf{M_{e,d}}$) é calculado pela equação 14.

$$\mathbf{M_{e,d}} = \mathbf{N_d} * \mathbf{e_d} \qquad \text{(eq. 14)}$$

O valor do momento fletor de projeto ($\mathbf{Mv_d}$) é calculado pela soma do esforço do momento obtido por simulação ($\mathbf{M_d}$) com $\mathbf{M_{e,d}}$; O resultado é multiplicado pelo coeficiente $\boldsymbol{\gamma}$ para compressão, conforme a equação 15.

$$\mathbf{Mv_d = (M_d + M_{e,d}) * \gamma_c} \quad \text{(eq. 15)}$$

A verificação das peças com relação à estabilidade lateral é feita pela equação 16, sendo **L** o valor do comprimento longitudinal do nexor e $\boldsymbol{\beta_m}$ o coeficiente de correção, calculado conforme os dados da NBR 7190 (ABNT, 2022).

$$\begin{cases} \mathbf{L \leq \dfrac{E_{ef} * t}{f_{m,d} * \beta_m}} \\ \\ \text{Onde:} \\ \mathbf{\beta_m \leq \dfrac{4}{\pi} * \dfrac{\beta_E}{\gamma} * \dfrac{(h/t)^{1,5}}{(h/t - 0,63)^{0,5}}} \end{cases} \quad \text{(eq. 16)}$$

A verificação das peças aos esforços de flexo-tração é feita pela equação 17, sendo os valores de resistência determinados pelas fórmulas anteriores e os demais valores obtidos pelas simulações feitas por software. De acordo com a norma, constante $\mathbf{k_M}$ é de 0,5 para barras de seção retangular.

$$\begin{cases} \mathbf{\dfrac{Nx_{td}}{NxRes_{td}} + \dfrac{My_{td}}{MyRes_{td}} + k_M * \dfrac{Mz_{td}}{MzRes_{td}} \leq 1,0} \\ \mathbf{\dfrac{Nx_{td}}{NxRes_{td}} + k_M * \dfrac{My_{td}}{MyRes_{td}} + \dfrac{Mz_{td}}{MzRes_{td}} \leq 1,0} \end{cases} \quad \text{(eq. 17)}$$

A verificação das peças aos esforços de flexo-compressão é feita pela equação 18, sendo os valores de resistência determinados pelas fórmulas anteriores e os demais valores obtidos pelas simulações feitas por software.

$$\begin{cases} \mathbf{\left[\dfrac{Nx_{cd}}{NxRes_{cd}}\right]^2 + \dfrac{My_{cd}}{MyRes_{cd}} + k_M * \dfrac{Mz_{cd}}{MzRes_{cd}} \leq 1,0} \\ \mathbf{\left[\dfrac{Nx_{cd}}{NxRes_{cd}}\right]^2 + k_M * \dfrac{My_{cd}}{MyRes_{cd}} + \dfrac{Mz_{cd}}{MzRes_{cd}} \leq 1,0} \end{cases} \quad \text{(eq. 18)}$$

A verificação das peças aos esforços de cisalhamento combinados com torção é feita pela equação 19, sendo os valores de resistência determinados pelas fórmulas anteriores e os demais valores obtidos pelas simulações feitas por software.

$$\frac{\mathbf{Mx_d}}{\mathbf{MxRes_d}} + \left[\frac{\mathbf{Vy_d + Vz_d}}{\mathbf{VRes_d}}\right]^{\mathbf{2}} \leq \mathbf{1,0} \qquad \text{(eq. 19)}$$

As ERs podem também ser consideradas como estruturas especiais, o que significa que cada caso deve ser avaliado individualmente. Por isso, também foram introduzidas avaliações referentes ao grau de utilização de cada um dos elementos presentes na estrutura, com base no conceito de *Design Ratio* (Índice de Projeto) verificado para esforços normais, esforços de cisalhamento e níveis de deformação (SILVA, 2017). Esse Índice de Projeto indica a porcentagem de uso de cada um dos elementos em termos de desempenho estrutural, sendo que 0% não há utilização e 100% é o limite. São tomadas como base as equações 17, 18 e 19 e os resultados obtidos nas simulações feitas no Karamba3D. Esses valores podem indicar quais regiões das ERs estão sendo mais ou menos exigidas e como modificações no projeto podem auxiliar numa melhoria do desempenho estrutural.

6.2.4. Instância

A **Instância** pode ser considerada como a realização **Artefato**, manifestando suas plenas funcionalidades, no ambiente em que é proposto como solução real. Em geral, as **Instâncias** são utilizadas com o intuito de articular o **Construto**, **Método** e **Modelos** para explicitar a viabilidade e eficácia da solução proposta. No caso desta pesquisa, a **Instância** é referente ao projeto, fabricação e montagem de um pequeno pavilhão em ER, que tinha o propósito de servir como prova de conceito. Essa etapa foi feita, majoritariamente, durante período da BEPE na KADK, sob supervisão da profa. Olga Popovic Larsen e de forma colaborativa com o doutorando Xan Browne. Para atender as expectativas do grupo de pesquisa no exterior, houveram mudanças no rumo de desenvolvimento da pesquisa, como a adaptações no algoritmo para incorporar a geração de ERs que seriam construídas com materiais de reuso. Os processos e ferramentas adotados foram:

i. Projeto: uso do sistema algorítmico (**Método**) combinado com as análises estruturais e resultados obtidos pelos protótipos (**Modelos**). A decisão de qual

seria a melhor geometria para construção foi baseada em princípios estéticos, estruturais, de fabricação e de montagem. Além disso, uma das complexidades inseridas no projeto para demonstrar as potencialidades do **Artefato** foi a utilização de madeira de reuso para a produção dos nexors e das conexões.

ii. Fabricação: as ranhuras das conexões em madeira compensada foram fresadas por uma Tupia Elétrica (Festool – OF 1010 EQB, equipada com uma fresa paralela 8mm com rolamento) apoiada sobre guias impressas em 3D. Os nexors foram obtidos a partir de pilares de madeira C24, encontrados em caçambas de entulho. Os pilares foram segmentados com um serrote simples, processados por uma plaina industrial e conformados por uma serra de mesa industrial (Felder K700 Sliding Saw Table). Todos os equipamentos que foram utilizados nesta etapa estavam disponíveis na oficina da KADK (Figura 26).

Figura 26: Vista da oficina de madeira da KADK com alguns equipamentos utilizados para a produção de protótipos e da prova de conceito.

Fonte: Acervo pessoal, 2020.

iii. Montagem: processo manual feito por apenas duas pessoas, apenas com equipamentos simples (chaves de boca e furadeira) e um sistema improvisado de alavanca para elevar a estrutura. Os leques foram montados de um lado para o outro da estrutural de forma sequencial.

6.3. ETAPAS RELATIVAS AOS RESULTADOS

Considerando as explicações apresentadas sobre o DSR e o conceito de *Design Science,* existem duas esferas de compreensão, análise e reflexão dos resultados obtidos pelo desenvolvimento do **Artefato**: uma é referente ao resultado como produto de um projeto e outra como uma discussão mais ampla e generalista que, por vezes, ocorre no campo das ideias. Dessa forma, os resultados obtidos foram separados em dois momentos distintos desta tese.

6.3.1. Resultados de projeto e consolidação do artefato

Essa etapa compreende a apresentação e análise dos resultados obtidos pelo desenvolvimento de cada subproduto do **Artefato**. Considerando o caráter exploratório desta pesquisa, esses resultados são tanto qualitativos como quantitativos. Nessa etapa, são apresentadas: (i) as principais vantagens do **Método**, exemplificadas por ERs geradas a partir de três geometrias distintas e com valores de entrada variáveis; (ii) a relação entre as variáveis de entrada e a definição da geometria das conexões, colocando em evidência as possibilidades de personalização e flexibilidade de produção; (iii) como o mesmo método de geração das conexões pode ser aplicado em outros arranjos de ERs, formados por Tri-Leques ou Hexa-Leques, por exemplo; (iv) as avaliações de desempenho estrutural dos **Modelos** e informações numéricas, comparando os resultados obtidos por simulações e pelos ensaios físicos. De modo geral, foram obtidos valores satisfatórios e que indicaram uma aproximação interessante entre as diferentes abordagens; (v) comparativos entre diferentes arranjos de ERs, incluindo os resultados analisados para a definição da **Instância** e; (vi) considerações sobre os processos de de fabricação e de montagem, tendo como base o desenvolvimento dos **Modelos** e da **Instância**. Alguns desses resultados são retomados em limitações e estudos futuros.

6.3.2. Teoria Emergente

A **Teoria Emergente** é considerada como o quinto e último subproduto que constitui o **Artefato**. A partir da solução específica, são propostas reflexões e a retomada da discussão sobre o Detalhe Arquitetônico na produção contemporânea de arquitetura, tendo como exemplos a conexão e o sistema algorítmico desenvolvidos. Também é apresentada uma breve discussão sobre a importância do projeto colaborativo multidisciplinar e do papel das tecnologias digitais para solucionar problemas específicos.

6.3.3. Conclusões

A última parte da tese relaciona todo o desenvolvimento com os objetivos estipulados inicialmente e aponta os principais avanços, sucessos e obstáculos enfrentados. Há a generalização odos resultados obtidos, são apontados alguns dos potenciais desdobramentos futuros e quais as possíveis estratégias para a comunicação dos resultados obtidos para um público mais amplo. Nesta etapa, são apresentadas as principais contribuições científicas desta tese, que incluem avanços relativos à modelagem paramétrica e algorítmica das ERs, desenvolvimento de novos tipos de conexões para ERs e fabricação das mesmas. Além disso, são evidenciadas as principais limitações desta tese e as lacunas ainda presentes que poderão inspirar pesquisas futuras. Por fim, são feitas as considerações finais e é apresentado um quadro síntese que relaciona objetivos específicos, resultados alcançados, limitações e estudos futuros.

7. DESENVOLVIMENTO: ELO RECÍPROCO

> *Uma vez que você possui uma cultura de inovação, mesmo aqueles que não são cientistas ou engenheiros – poetas, atores, jornalistas – "eles", como comunidades, abraçam o significado do que é ser cientificamente alfabetizado. Eles abraçam o conceito de uma cultura de inovação. Eles votam de forma a promovê-lo. Eles não lutam contra a ciência e não combatem a tecnologia. Eles reconhecem o quão fundamentais essas atividades são para a identidade da nação, mas ainda mais importantes para a saúde econômica da nação. Porque estas são as engrenagens da economia.*
>
> *TYSON, Neil DeGrease*[14].

A discussão apresentada por Krieg (2017) sintetiza, em partes, a principal problemática desta pesquisa: a industrialização da construção civil implica uma reestruturação e reordenação do fluxo de projeto. A incorporação do Detalhe Arquitetônico nas etapas iniciais do processo de projeto é fundamental para atingir melhores resultados, sobretudo sob a perspectiva de ser um elemento de conexão (FORD, 2011). Por outro, os equipamentos de Fabricação Digital e as ferramentas computacionais de projeto sucintam uma nova lógica de projeto, que deve se apropriar das limitações e potencialidades de cada uma dessas tecnologia, fazendo uso de simulações computacionais e se apropriando de conceitos como a Personalização em Massa.

É importante mencionar que a publicação de artigos em congressos e periódicos é parte fundamental do desenvolvimento de uma pesquisa. Por isso, algumas das informações relativas às etapas de Desenvolvimento e de Resultados são reproduções (traduzidas pelo autor) e adaptações (para facilitar a compreensão dentro do contexto da tese) de artigos publicados[15]. As referências são apresentadas a seguir e também estão presentes na lista de Referências. Em

[14] TYSON, Neil DeGrease. **Invest in Nasa, Invest in U.S. Economy:** entrevista [13 de março de 2012]. New York: Forbes. Entrevista concedida a Chris Barth. Disponível em: <https://www.forbes.com/sites/chrisbarth/2012/03/13/neil-degrasse-tyson-invest-in-nasa-invest-in-u-s-economy/#757819b915dc>. Acesso em: 10 de julho de 2019. Traduzido pelo autor.

[15] Os artigos estão devidamente referenciados e as respectivas permissões de reprodução são encontradas no Apêndice III.

decorrência da sobreposição de explicações contidas nos artigos, ao final de cada parágrafo é mencionada a fonte das informações do respectivo trecho.

CASTRIOTTO, C. M.; CELANI, G.; TAVARES, F. Reciprocal Frames Algorithm based on Symmetry Groups. **Nexus Network Journal**: Architecture and Mathematics [online first], 2021. https://doi.org/10.1007/s00004-021-00578-5

CASTRIOTTO, C. M.; TAVARES, F.; CELANI, G.; LARSEN, O. P.; BROWNE, X. Clamp Links: a novel type of reciprocal frame connection. **International Journal of Architectural Computing** [online first], p 1 – 22, 2021. https://doi.org/10.1177/14780771211054169

As etapas de identificação, conscientização e caracterização do problema indicaram uma série de lacunas para o desenvolvimento de ERs. Dentre elas, um dos desafios para aplicações contemporâneas de ERs é o processo de modelagem. Devido à complexidade geométrica intrínseca deste sistema, a modelagem geométrica não-associativa não é adequada para projetar essas estruturas. Nesse sentido, a modelagem paramétrica e algorítmica parece ser a melhor alternativa para lidar com as complexidades das ERs. Alguns métodos, ferramentas e algoritmos já foram desenvolvidos como uma tentativa de facilitar o projeto de ERs, como apresentado por alguns autores (CASTRIOTTO, CELANI e SILVA, 2020; PARIGI e KIRKEGAARD, 2014a; SONG *et al,* 2013; THONNISSEN, 2014; MESNIL *et al,* 2018). Em geral, esses são baseados em *form-finding* e processos *bottom-up*, o que muitas vezes resulta em dificuldades de se controlar a geometria global (CASTRIOTTO *et al,* 2021. Traduzido pelo autor).

Além disso, as conexões são outra lacuna particularmente interessante. Boa parte das estratégias de modelagem adotadas para o projeto de ERs são focadas, principalmente, em processos iterativos que garantem a relação de sobreposição de elementos, nos quais a excentricidade é considerada como o parâmetro mais importante. Isso é feito, de forma sucedida, nas abordagens de Song *et al,* (2013), Parigi e Kirkegaard (2014a), Thonnissen (2014), Gotdhelp *et al,* (2019) e, Palumbo, Lancia e Pone (2019). Por um lado, essa abordagem pode ser mais ideal para a produção de estruturas temporárias. A relação de sobreposição resulta no uso de sistemas simples de conexão, como por atrito ou encaixes, de montagem simplificada. Além disso, boa parte das estruturas geradas por essas ferramentas não requerem elementos especiais, o que facilita o processo de produção. (CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021. Traduzido pelo autor)

Por outro lado, o foco na excentricidade pode limitar o quão livremente outras variáveis podem ser modificadas. Nesse sentido, Song *et al,* (2013) afirmam que sua ferramenta não funciona em regiões de elevada curvatura, uma vez que a relação de sobreposição não é possível. Palumbo, Lancia e Pone (2019) fazem uma tentativa semelhante, mas sua ferramenta só pode ser usada para estruturas compostas por elementos lineares iguais. Quanto à ferramenta de Parigi e Kirkegaard (2014a), algumas geometrias de ERs só foram possíveis quando a regra de sobreposição entre os elementos foi negada (Parigi e Kirkegaard 2014b). Os trabalhos de Thonnissen (2014) e Gotdhelp *et al,* (2019) apresentam a possibilidade de utilização de elementos planares, mas todos devem ter altura e espessura iguais ou muito semelhantes. Embora não seja comum, essas restrições podem ser um verdadeiro obstáculo para a implementação de ERs em situações permanentes e complexas. Por exemplo, o sombreamento e a otimização estrutural podem não ser resolvidos de maneira ideal, uma vez que exigiriam elementos com dimensões ou propriedades muito variáveis (ASEFI e BAHREMANDI-TOLOU, 2019) (CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021. Traduzido pelo autor).

Mas e se a excentricidade não for o principal foco na geração de ERs? Embora esse não fosse o objetivo do pavilhão criado por Gheorghe e Vierlinger (2017), seu trabalho oferece uma perspectiva diferente sobre as possibilidades das ERs. Eles utilizaram um material composto para preencher a janela do leque a fim de conectar todos os elementos. Nesta situação, os elementos devem ter contato nas suas extremidades, mas não há necessidade da relação de sobreposição, enquanto a excentricidade desempenhar um papel menor (CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021. Traduzido pelo autor).

Com isso em mente, uma abordagem diferente foi proposta para o **Artefato** desta pesquisa. Ao invés de uma geração iterativa de elementos resolvidos pela excentricidade, o Elo Recíproco tem como objetivo a geração de ERs priorizando outras variáveis, como dimensões dos elementos, geometria global e padrões de simetria. Ao mesmo tempo, essa possibilidade só existe devido à criação de um novo sistema de conexões – que é parte constituinte do **Artefato**. As próximas seções explicitam quatro dos cinco subprodutos que constituem o **Artefato**.

7.1. CONSTRUTO: RECIPROCIDADE DE IDEIAS

O **Construto** é definido por uma relação de reciprocidade entre duas ideias e está embasado na teoria de Ford (2011), considerando o Detalhe como Conexão. Isso porque uma forma de gerar

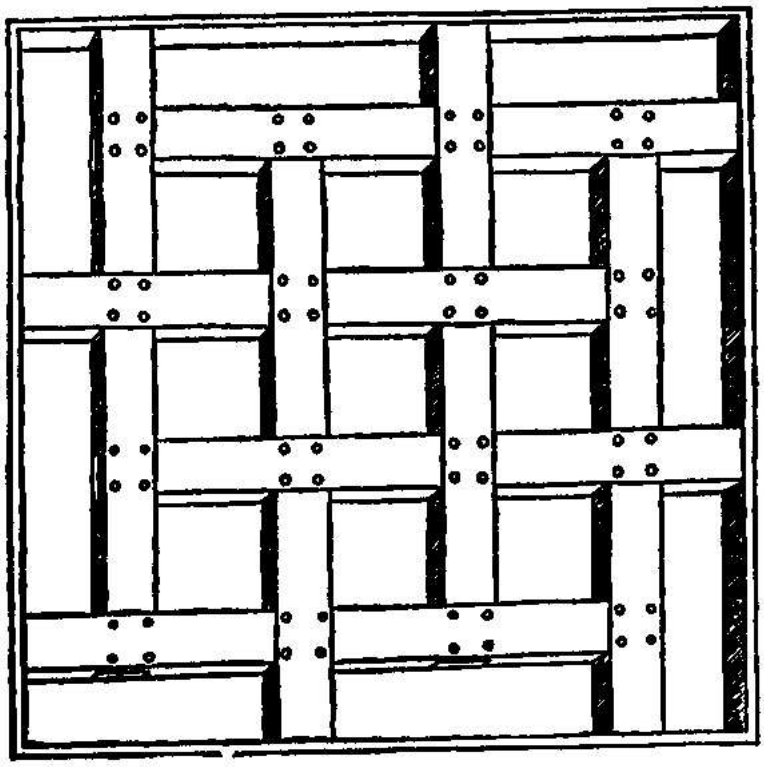
ERs que não seja focada na excentricidade implica na pergunta: “como serão feitas as conexões?”. Por outro lado, propor um novo sistema de conexões para elementos sobrepostos fomenta outro questionamento: “por qual motivo é interessante alterar sistemas simples de conexão?”. Mas quando a nova forma de gerar ERs é combinada com um novo sistema de conexões, essas duas perguntas são respondidas de forma complementar. Há, portanto, duas abordagens que devem ser explicitadas no **Construto**: quais são as fundamentações geométricas globais e quais os princípios norteadores para a geração das conexões. Para melhor compreender essas questões, também foram desenvolvidos os **Modelos** Geométricos da Série 1, apresentados na Seção 7.3.

7.1.1. Fundamentação geométrica das ERs

Há uma vasta literatura que discute o significado da simetria, do ponto de vista de diferentes áreas do conhecimento, como matemática, línguas, filosofia, biologia, ou, como é o caso desta pesquisa, da geometria. Um objeto simétrico é aquele na qual suas partes apresentam correspondências um a um entre si (HARGITTAI e HARGITTAI, 1994) e a aplicação de certas operações geométricas pode transformar o objeto sobre si mesmo (MARTIN, 1982). Nesse sentido, rotações incrementais de uma forma por uma simetria cíclica geram arranjos em espirais, definidos como cataventos (tradução feita pelo autor a partir do termo em inglês *pinwheel*) (EARL e JOWERS, 2015). Padrões de cataventos foram amplamente utilizados, por exemplo, na composição de arabescos na arquitetura tradicional islâmica (CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021. Traduzido pelo autor).

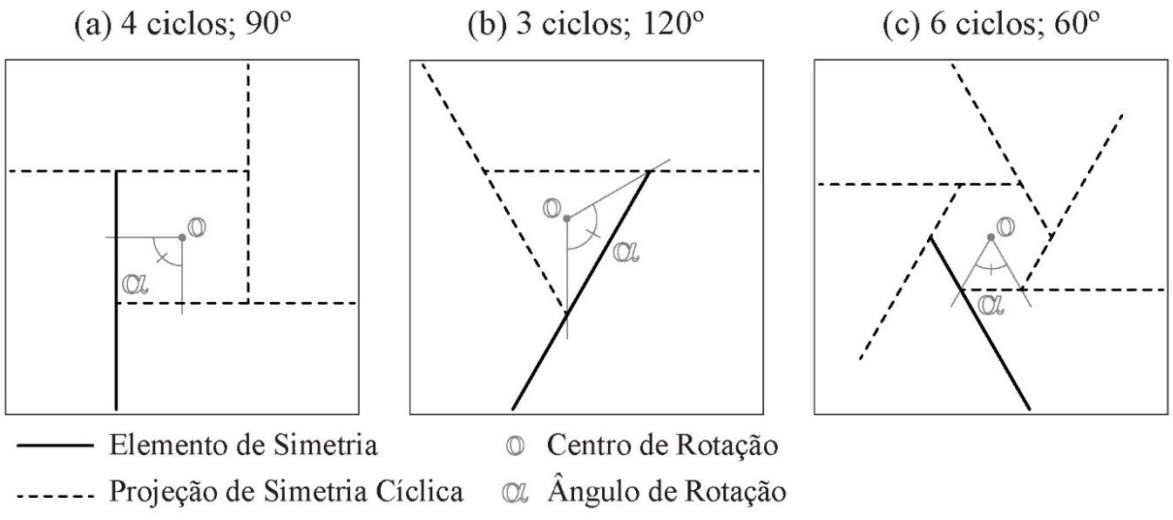
Embora existam diferentes maneiras de compor uma ER, a maior parte das configurações de leques apresenta uma estreita relação entre essas estruturas e padrões de catavento. Como sugerido por Earl e Jowers (2015), a ER de Serlio (SERLIO, 1611) (Figura 27) é um claro exemplo dessa relação. Nessa ER em específico, cada leque é baseado em um catavento com quatro ciclos de 90 graus (Figura 28a). Outras configurações bastante utilizadas para os leques são aquelas com três ciclos de 120 graus (Figura 28b) e aquelas com seis ciclos de 60 graus (Figura 28c) (CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021. Traduzido pelo autor).

Figura 27: Esquema da estrutura concebida por Sebastiano Serlio no século XV, conhecida como Serlio's Floor. O esquema original pode ser encontrado no primeiro livro da obra Tutte L'Opere D'Architettura Et Prospetiva, escrita por Serlio.



Fonte: <https://www.chaplinoak.co.uk/wordpress/wp-content/uploads/2012/08/serlio.jpg>. Acesso em: 15 de julho de 2021.

Figura 28: Os arranjos em catavento mais comuns para ERs: (a) com quatro ciclos, (b) com três ciclos e (c) com seis ciclos.



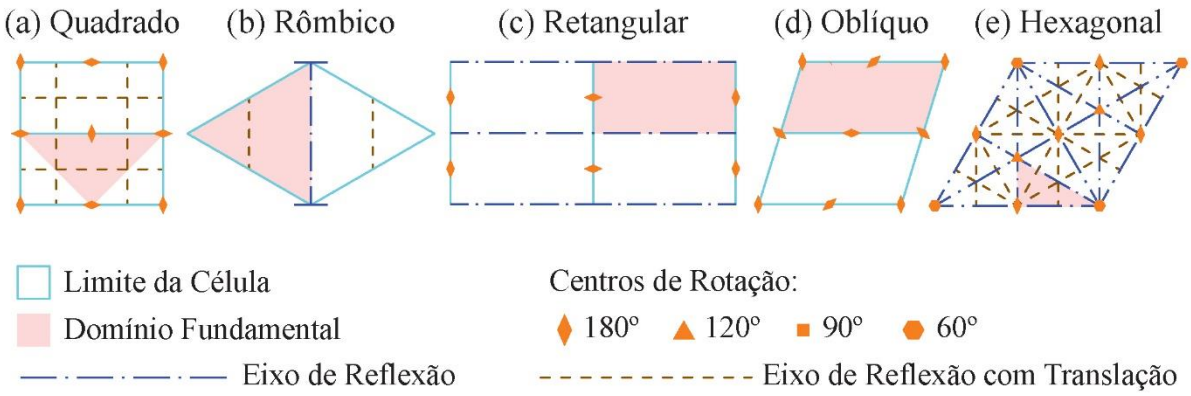
Fonte: CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021, p. 3. Textos traduzidos pelo autor.

Quando qualquer um desses arranjos em catavento são refletidos e/ou transladados por dois vetores distintos e combinados de formas específicas, é possível obter um dos 17 *wallpaper groups* (grupos de papel de parede), também conhecidos como grupos cristalográficos (MARCH e STEADMAN, 1974; CONWAY, BURGIEL e GOODMAN-STRAUSS, 2008). Esses grupos são utilizados para explicar todas as possíveis relações simétricas de um padrão repetitivo em um plano, que foram amplamente explorados pelo artista M.C. Escher (1898 – 1972), mais notavelmente nas séries *Metamorphosis* e *Circle Limit* (LANDWEHR, 2011) (CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021. Traduzido pelo autor).

A explicação matemática dos grupos de papel de parede é dada pelo valor da assinatura determinado pelo *Magic Theorem* (Teorema Mágico), como explicado por Conway, Burgiel e Goodman-Strauss (2008). Essas assinaturas são baseadas em números (**n**) e símbolos (**x**, *, **o**) e elas também são utilizadas para nomear cada grupo. Em suma, **n** é referente a um centro de rotação em **n** vezes, e **x**, *, **o** indica uma simetria baseada em **reflexão, reflexão com translação** e **translação / rotação**, respectivamente. Por exemplo, a assinatura **22*** denota dois centros de rotação da ordem de dois (180º) e um único eixo de reflexão, enquanto a assinatura ***x** não possui nenhuma rotação, mas a simetria é baseada e uma reflexão e uma reflexão com translação. Outra forma comum de se referir a esses grupos é o sistema de notação cristalográfica de Hermann-Mauguin (SANDS, 1993). Neste sistema, quando o foco está somente nos 17 grupos de papel de parede, as principais diferenças nos valores de assinaturas são que as letras **p** e **c** estão relacionadas aos tipos de célula, e os símbolos **m**, **g** ou **1** são usados no lugar de **x**, *, **o**, respectivamente. (CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021. Traduzido pelo autor).

Por outro lado, um método visual geométrico para explicar os 17 grupos de papel de parede é feito por meio de desenhos e definições de células que compõem um certo papel de parede, como utilizados por Adanova e Tari (2019). A estrutura da célula é definida por uma forma específica (cinco no total), um domínio fundamental e, se aplicável, local e tipo de rotação (quatro tipos), eixos de reflexão e/ou eixos de reflexão com translação (Figura 29) (CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021. Traduzido pelo autor)

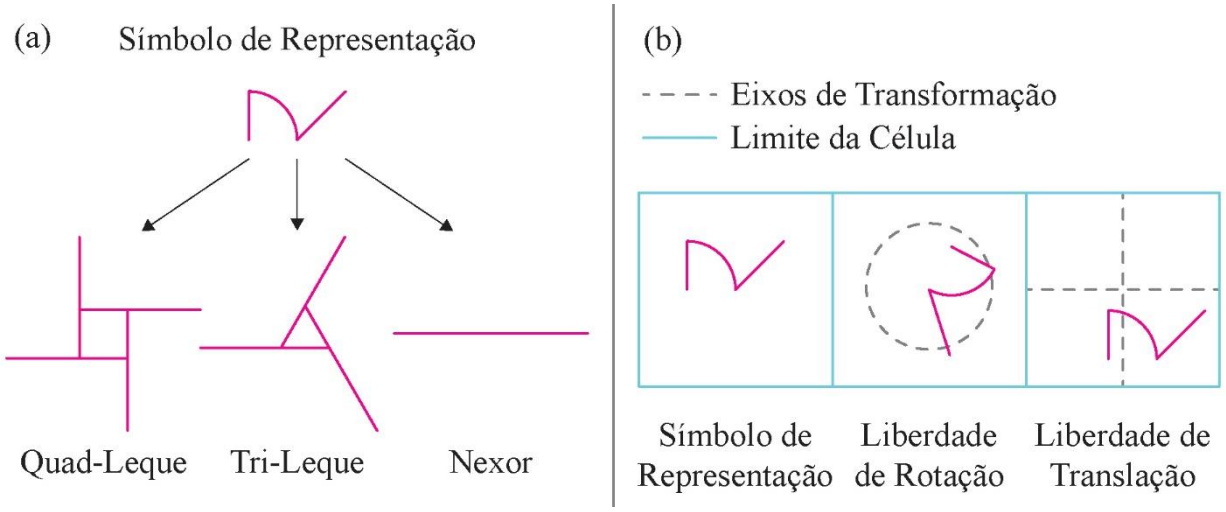
Figura 29: Exemplos de estruturas de células de grupos de papel de parede específicos: (a) ppg (22x); (b) cm (*x); (c) pmg (22*); (d) p2 (2222); (e) p6m (*632).



Fonte: CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021, p.3. Textos traduzidos pelo autor. Baseado nas células de Adanova e Tari (2019, p. 3).

De Escher às artes simétricas mais contemporâneas, o princípio de utilizar grupos de papel de parede para compor ERs ou composições similares não é algo realmente novo. Isso já foi explorado pelo artista Rinus Roelofs em muitas de suas obras de arte, como explicado por Schattschneider (2004) e Huylebrouck (2017). Ainda assim, para melhor compreender a abordagem adotada nesta pesquisa, é necessário questionar qual é a unidade de simetria. Deveria ser um leque inteiro, uma parte ou apenas um nexor? Há alguma diferença no resultado final? Na tentativa de responder isso, os 17 grupos de papel de paredes foram explorados por meio de um símbolo representativo que poderia ser substituído por um nexor, um leque triplo (tri-leque) ou um leque quádruplo (quad-leque) (Figura 30a). Este símbolo também poderia sofrer rotações ou translações dentro do domínio fundamental da célula, permitindo diversas possibilidades diferentes para as unidades de simetria (Figura 30b) (CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021. Traduzido pelo autor)

Figura 30: (a) Unidades de simetria que podem substituir o símbolo representativo e (b) possíveis transformações geométricas do símbolo em uma mesma célula.

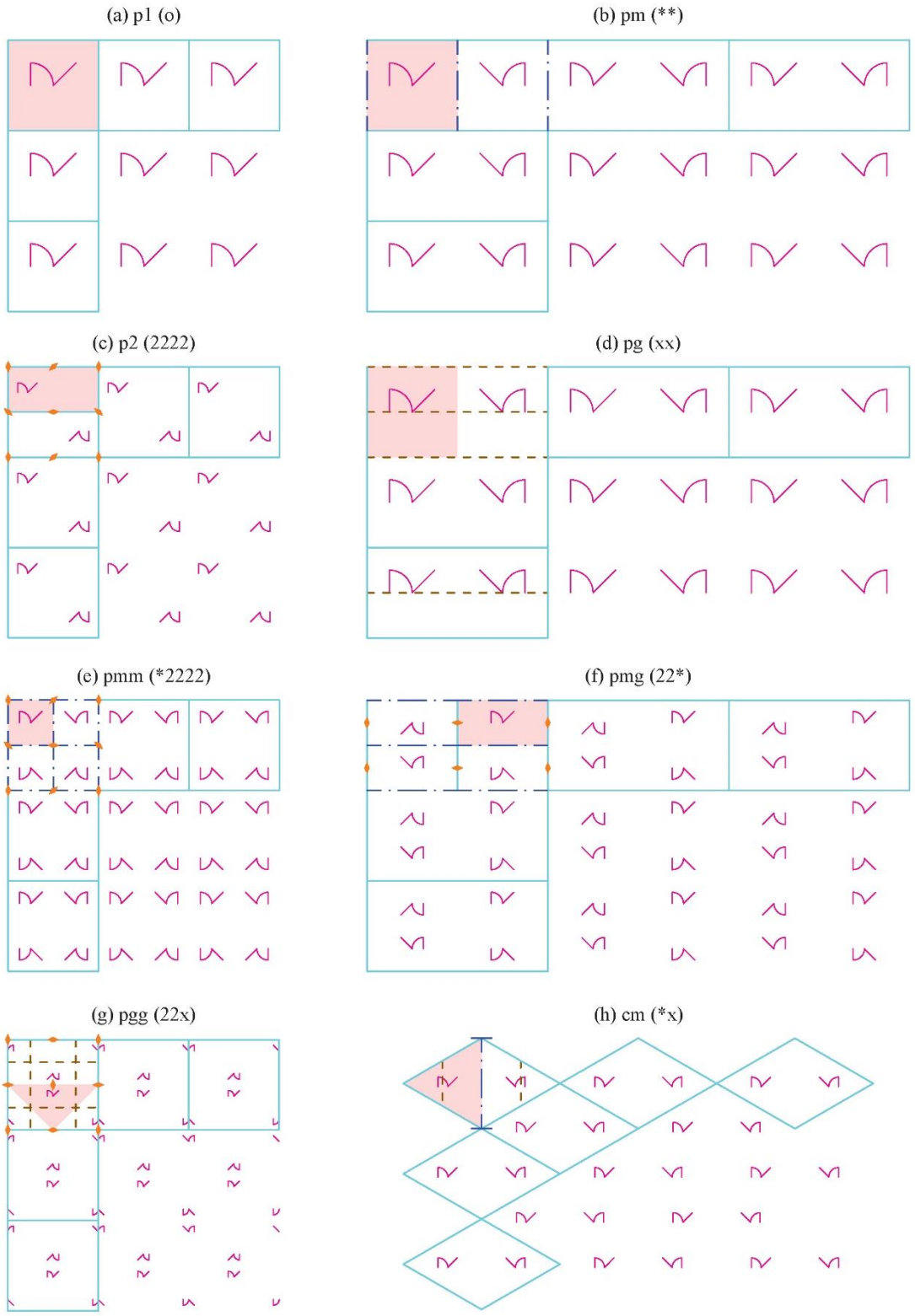


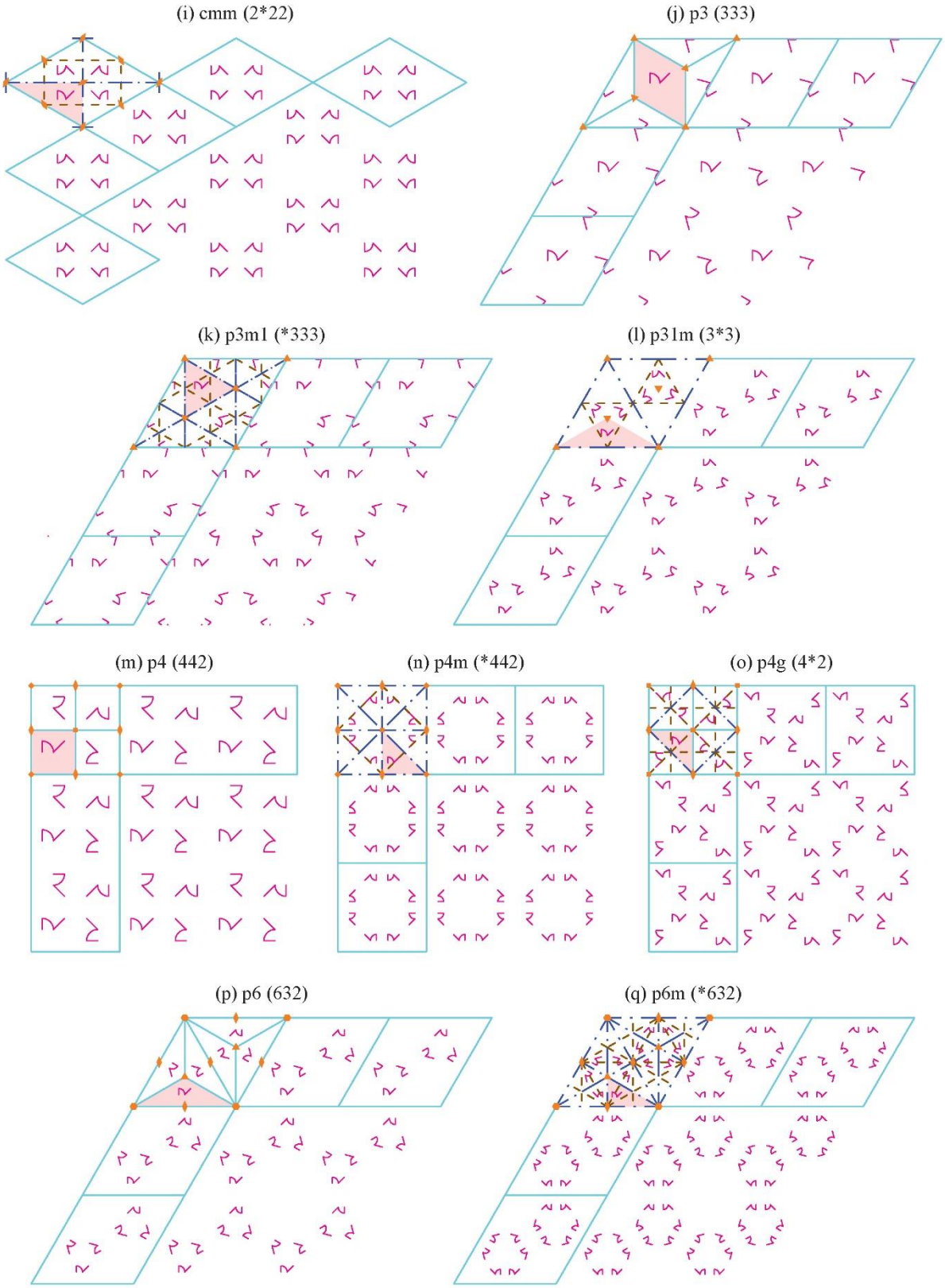
Fonte: CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021, p.4. Textos traduzidos pelo autor.

Alguns dos grupos de papel de parede podem usar mais de um tipo de estrutura celular, mas que compartilham os mesmos princípios. Por exemplo, o grupo pm (**) é baseado em eixos de reflexão paralelos, mas que podem ser horizontais ou verticais e; o grupo pmm (*2222) pode ser construído usando uma forma de célula quadrada ou retangular. Com isso em mente apenas 17 estruturas celulares foram utilizadas para gerar cada um dos 17 grupos de papel de parede, todos considerando a mesma unidade representativa de simetria (Figuras 31a – 31q). O próximo passo foi estabelecer quais grupos resultaram em possíveis configurações de ERs, respeitando certas condições: (i) todas as linhas devem ser retas; (ii) a região de conexão deve ser conformada apenas por uma geometria de leque e; (iii) exceto aquelas que estão na borda do grupo de papel de parede, cada linha representa um nexor que faz parte de apenas dois leques diferentes. Isso resultou em um total de nove padrões simétricos simples (Figuras 32a – 32i) e dois padrões especiais (Figuras 33a e 33b), encontrados em um total de oito grupos diferentes de papel de parede (CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021. Traduzido pelo autor).

Além disso, os padrões simples obtidos foram divididos em apenas quatro grupos: (1) ERs feitas de Quad-Leques (Figuras 32a – 32c); (2) ERs feitas de Quad-Leques Refletidos (Figuras 32d – 32g); (3) ERs feitas de Tri-Leques (Figura 32h) e (4) ERs feitas de Tri-Leques Refletidos (Figura 32i). Dois padrões especiais foram encontrados pela sobreposição de unidades de simetria, sendo: 2 Tri-Leques (Figura 33a) e Tri-Hexa-Leque (Figura 33b).

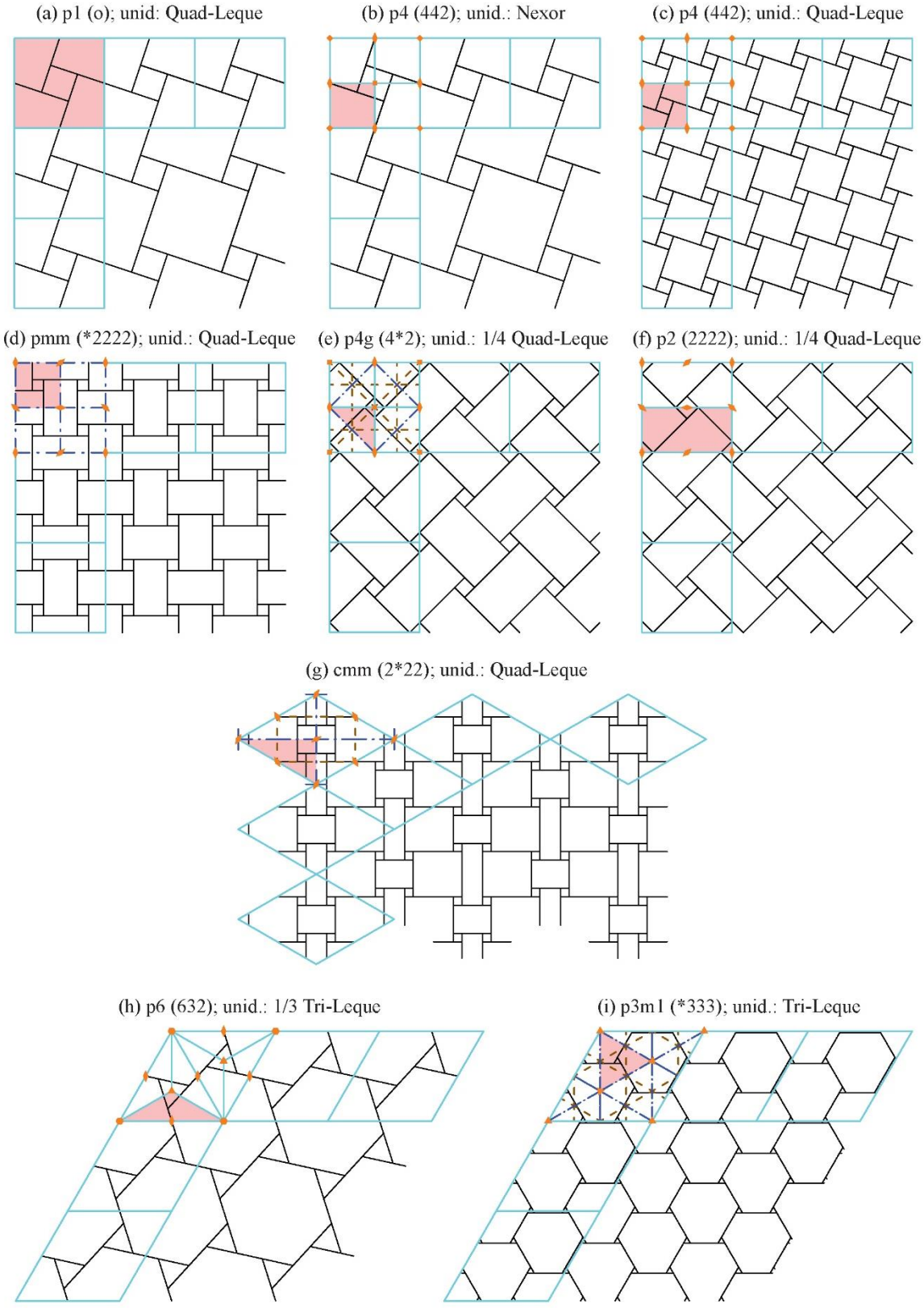
Figura 31: Os 17 grupos de papel de parede com os símbolos de representação, utilizados para encontrar as possíveis relações simétricas de ERs (a – q).





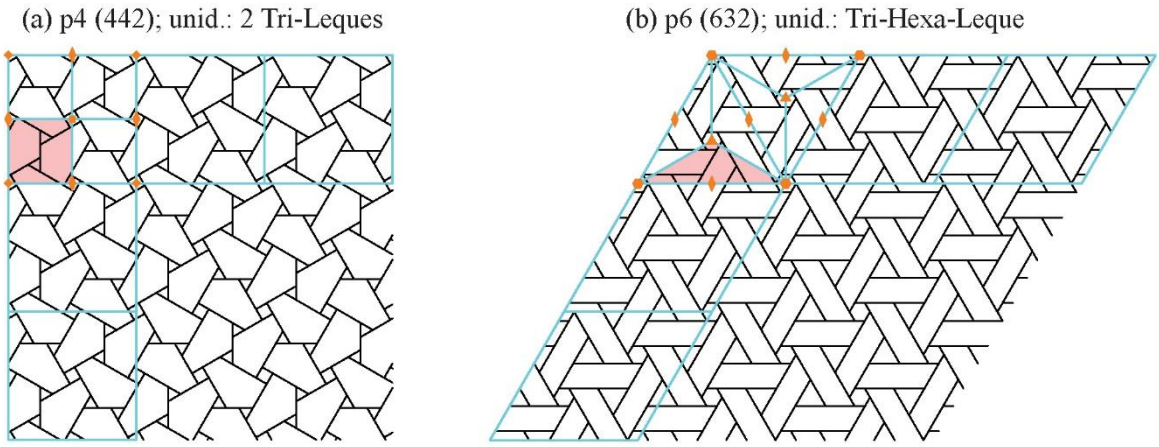
Fonte: CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021, p. 6 e 7.

Figura 32: Padrões simples de ERs encontrados nos 17 grupos de papel de paredes, com as unidades de simetria informadas (a – i).



Fonte: CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021, p. 8. Textos traduzidos pelo autor.

Figura 33: Padrões especiais em ERs, encontrados nos 17 grupos de papel de parede, com as unidades de simetria informadas (a – b).



Fonte: CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021, p. 9. Textos traduzidos pelo autor.

Os quatro grupos de padrões simples representam todas as possibilidades de relações simétricas de uma ER plana. No espaço tridimensional, eles podem se assemelhar, em certa medida, à obra de Roelofs (HUYLEBROUCK, 2017). No entanto, esses grupos podem não ser suficientes para resolver problemas complexos de ERs, como seu uso para a construção de superfícies de forma livre. Outras explorações dos grupos de papel de parede foram feitas por Escher (LANDWEHR, 2011) no espaço bidimensional, por meio de distorções, deformações e derivações, definindo uma simetria não-Euclidiana (COXETER, 1979). Esse mesmo princípio também pode ser aplicado ao 3D, mantendo a lógica em termos de topologia, a fim de gerar ERs complexas (CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021. Traduzido pelo autor).

Contudo, existem ainda algumas condições e requerimentos ao seguir esta abordagem: (i) todos os elementos devem ser lineares ou planares, sem curvaturas ou dobras; (ii) a distância entre o ponto mais alto e mais baixo dentre os nexors de um leque não deve ser maior do que a altura da seção transversal dos próprios elementos e; (iii) a região de encontro dos nexors deve conformar um leque. Por isso, ao invés de simplesmente aplicar os padrões em uma superfície, um processo de discretização dela é necessário. Um dos mais comuns é a conversão de uma superfície em uma *mesh* (malha). Nessa situação, o desafio está relacionado ao processo de obtenção de uma ER derivada de uma malha, que é, essencialmente, um problema de manipulação e combinação de dados (CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021. Traduzido pelo autor).

7.1.2. Princípios norteadores das conexões

Com base em diversos estudos anteriores (apresentados na RSL), em especial o de Gheorghe e Vierlinger (2017) e Gustafsson (2016), foi concebida a proposta de desenvolver uma conexão que preenchesse o vazio dentro da janela do leque das ERs. Contudo, a criação de um novo sistema de conexões, mais complexo do que sistemas feitos por sobreposição ou entalhes, não poderia ser justificada apenas por solucionar uma abordagem de geração específica. Por isso, as novas conexões também deveriam atender aos seguintes requisitos (CASTRIOTTO *et al,* 2021. Traduzido pelo autor):

a) Podem ser aplicadas a uma variedade de formas globais, inclusive superfícies complexas com curvaturas acentuadas;
b) Incorporam a complexidade geométrica da estrutura, permitindo que os nexors tenham formas simples;
c) Não enfraqueçam os nexors, evitando entalhes ou furos e aproveitando melhor os materiais;
d) Proporcionem facilidade de montagem e desmontagem, possibilitando o reaproveitamento da estrutura mais de uma vez;
e) O peso extra deve ser minimizado para ter menor impacto no desempenho estrutural ou no processo de montagem;
f) Permitam o uso de uma variedade de produtos e tamanhos de madeira, podendo se beneficiar de elementos reaproveitados ou residuais.

Para atender aos requerimentos acima, o desenvolvimento da conexão deveria responder às seguintes questões, relacionadas ao desempenho estrutural, viabilidade de produção e aspectos de sustentabilidade (CASTRIOTTO *et al,* 2021. Traduzido pelo autor):

i. Quais são os impactos da nova conexão na resistência das partes individuais e na estabilidade global da estrutura?
ii. Essa nova conexão pode ser facilmente produzida em massa ou personalizada em massa?
iii. Quais são os tamanhos e tipos de produtos de madeira que podem ser usados e que estão facilmente disponíveis, inclusive como resíduos industriais?

Outro aspecto importante é o fato de a geometria do leque ser resultado de uma combinação de diferentes parâmetros variáveis, o que implica na necessidade de um sistema de conexões paramétrico adaptativo. Para garantir que todas as complexidades geométricas estivessem embutidas nos elementos de conexão, todas as relações estabelecidas entre elas e os nexors deveriam ser automatizadas em um método algorítmico e paramétrico de geração de ERs (CASTRIOTTO *et al,* 2021. Traduzido pelo autor).

7.2. MÉTODO: MODELAGEM ALGORÍTMICA E PARAMÉTRICA

De acordo com Celani e Vaz (2011), existem diversas linguagens de programação que podem ser utilizadas em softwares CAD, em geral com o objetivo de automatizar partes do processo de projeto, realizar simulações ou de alcançar a produção por Personalização em Massa. Cada linguagem possui sintaxe e estrutura própria, o que implica em procedimentos específicos para se obter certos resultados, como é o caso de C#, C++, Python e Visual Basic. Uma alternativa é o desenvolvimento de algoritmos por softwares de programação visual, como é o caso do Grasshopper para Rhinoceros e ArchiCAD e do Dynamo para Revit. Dentre as principais características, as linguagens visuais são mais amigáveis e fáceis de serem aprendidas, porém, requerem maior memória, processamento e capacidade de armazenamento de computadores.

Durante a RSL, foram identificadas uma série de ferramentas, como as de Song *et al,* (2013), Parigi e Kirkegaard (2014a), Thonnissen (2014), Gotdhelp *et al,* (2019) e, Palumbo, Lancia e Pone (2019) e o plug-in NGon (VESTARTAS e RAD, 2021), além de métodos distintos para a geração de padrões recíprocos, como nos artigos de Douthe e Baverel (2009) e de Mesnil *et al,* (2018). Ao analisar todos, há uma certa concordância acerca do tratamento da geometria de entrada que serve como base para a geração e/ou aplicação de padrões recíprocos. De forma simplificada, o ponto de partida é uma superfície de forma livre, que é submetida a dois processos sequenciais: discretização em uma malha e transformação em um padrão recíproco.

Contudo, a utilização destas ferramentas na presente pesquisa poderia implicar em limitações e obstáculos para o desenvolvimento das conexões, em especial pela variedade de formas como esses dois processos podem ser realizados e como os dados são estruturados em cada uma das ferramentas. Para implementar os conceitos e princípios estabelecidos pelo **Construto** foi necessário desenvolver um **Método** que garantisse a geração automática de ERs e das conexões desenvolvidas nesta pesquisa. Logo, o **Método** é referente à criação de um sistema algorítmico

e paramétrico, baseado em padrões de catavento e fundamentado nos 17 grupos de simetria de papel de parede. O desenvolvimento foi feito com uso da ferramenta de programação visual Grasshopper, para Rhinoceros e com alguns plug-ins que auxiliam na organização e combinação de dados e de relações geométricas.

Com o objetivo de facilitar a leitura e a compreensão do algoritmo completo, a subseção 7.2.1 apresenta o sistema de nomenclatura adotado para especificar cada uma das variáveis do algoritmo e o conceito de listas e árvores. Em seguida, a subseção 7.2.2 contém a visão geral de funcionamento do algoritmo. Entre as subseções 7.2.3 e 7.2.5, são detalhados os processos de discretização, transformação, e demais operações geométricas, evidenciando a importância de cada entrada independente e dependente do sistema. São apresentados os mecanismos de geração dos padrões recíprocos unifilares, tridimensionais e para geração das conexões. Por fim, entre as subseções 7.2.6 e 7.2.8, são indicadas as Saídas obtidas pelo algoritmo.

7.2.1. Sistema de nomenclatura e conceitos de listas e árvores

Para se referir às variáveis que fazem parte do algoritmo, foi adotado um sistema de nomenclatura objetivo, constituído por três partes, que indicam qual é o elemento da estrutura, o parâmetro específico e é atribuída uma numeração para evitar repetições. Os nomes são separados por traço baixo, seguindo o padrão:

Elemento_parâmetro_numeração

A partir dessa estrutura, os Elementos e os Parâmetros são representados por uma ou duas letras, enquanto a numeração é feita por algarismos. Por exemplo, no caso acima, o elemento seria representado pela letra “E”, maiúscula; o parâmetro pela letra “p”, minúscula; e para diferenciar as partes, um número. Assim, o padrão de nomenclatura utilizado pode ser demonstrado por:

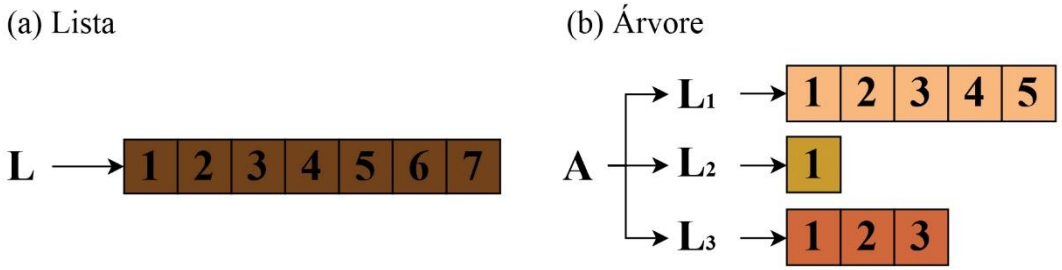
E_p_1

Em alguns casos, uma dessas partes pode não aparecer ou ter pequenas modificações. Isso acontece quando: a) O elemento e a variável são únicos, dispensando o uso da numeração; b) O elemento não depende de um parâmetro específico; c) O parâmetro é independente de elementos ou é utilizado em todos os elementos da mesma forma e / ou; d) A variável está

associada a uma das isocurvas U e V[16], acrescentando por subscrito a letra da respectiva direção. Todos os elementos e parâmetros (dependentes ou independentes) relativos ao algoritmo, com respectivos caracteres representativos e uma breve descrição de cada um estão sintetizados na Tabela A do Apêndice II.

É importante também apresentar os conceitos de **Listas (L)** e **Árvores (A)** em programação, uma vez que foram fundamentais no desenvolvimento do algoritmo. As **Listas** são agrupamentos lineares e sequenciais de dados ou itens similares, sem apresentar uma hierarquia (Figura 34a). As **Árvores**, por sua vez, são estruturas hierárquicas que podem agrupar coleções de dados ou listas em níveis distintos, exemplificados na Figura 34b. Essa hierarquia facilita a manutenção e manipulação dos dados, permitindo a realização de diversas operações geométricas ao mesmo tempo em que a lógica de estruturação dos dados é preservada.

Figura 34: Esquema representativo de como é feita a ordenação dos dados em (a) Listas e (b) Árvores.

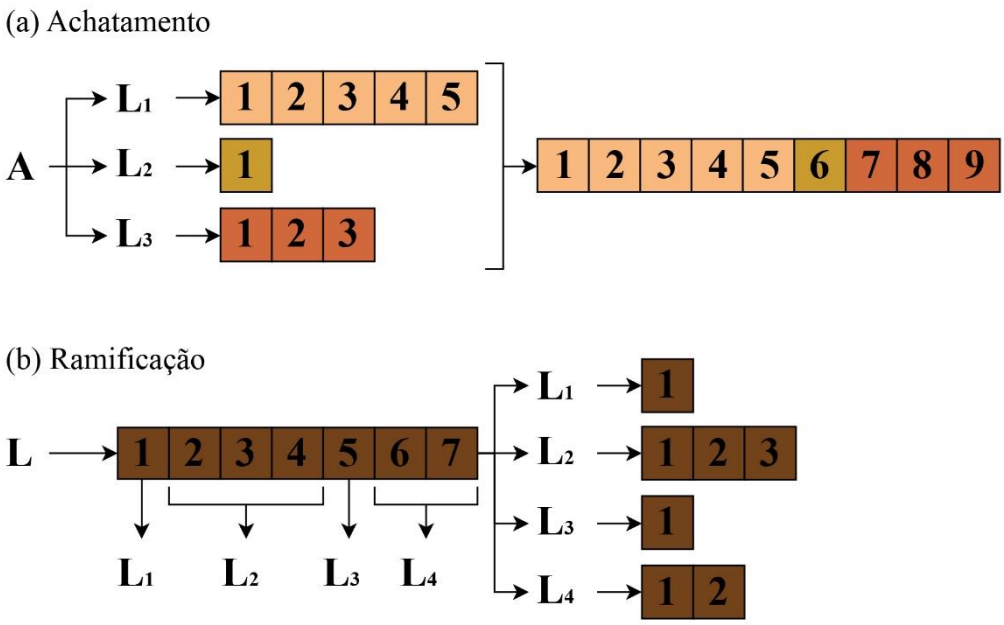


Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Existem duas operações que precisam ser mencionadas ao considerar a manipulação de listas e árvores. Uma é referente ao achatamento (*flattening*) das **Árvores**, processo recursivo que remove os níveis hierárquicos e incorpora os dados em uma única **Lista**, na qual a ordem dos índices é baseado na hierarquia da **Árvore**. Outra é pela ramificação (*grafting*) das **Listas**, fazendo com que cada dado (ou grupos menores de dados) assuma um nível hierárquico distinto, conformando uma **Árvore**. Nesse caso, os índices são rearranjados conforme a distribuição dos níveis. Essas duas operações podem ser mais facilmente compreendidas ao observar as Figuras 35a e 35b.

[16] O sistema de coordenadas UV em geral está associado ao mapeamento de superfícies; uma técnica de modelagem que permite projetar elementos bidimensionais em uma superfície tridimensional. Um paralelo que pode ser feito é de que as letras U e V são referentes aos eixos dos planos que conformam o mapeamento na superfície tridimensional, substituindo as letras X e Y usadas para se referir a coordenadas do plano Cartesiano.

Figura 35: Esquemas que demonstram como é feito o processo de (a) achatamento de árvores em listas e (b) ramificação de listas em árvores.



Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

A nomenclatura adotada para indicar as listas ou árvores segue um padrão semelhante ao utilizado para indicar as variáveis do algoritmo, constituída por três variáveis:

$$\mathbf{Estrutura_Sentido.elemento_{índice}}$$

Com base nesse sistema de nomenclatura, as **estruturas** de dados são divididas em Listas (**L**) ou Árvores (**T**), e são representadas por letra maiúscula. O **sentido** é indicado por **U** e **/** ou **V**, conforme as direções estabelecidas pelas isocurvas, também escrito em letra maiúscula. Os **elementos** são representados por uma ou mais letras minúsculas e indicam o tipo de dado contido na lista. Os **índices** são subscritos ao elemento, por uma ou mais letras maiúsculas. Quando um mesmo índice está presente em mais de uma lista, significa que, independentemente do **elemento**, a ordem dos itens é a idêntica. Utilizando a inicial de cada uma das palavras usadas na explicação da nomenclatura, a abreviação das variáveis é demonstrada por:

$$\mathbf{E_S.e_{í}}$$

A Tabela B do Apêndice II apresenta um sumário explicativo desse sistema de nomenclatura aplicado sobre as **Listas** e **Árvores** do algoritmo.

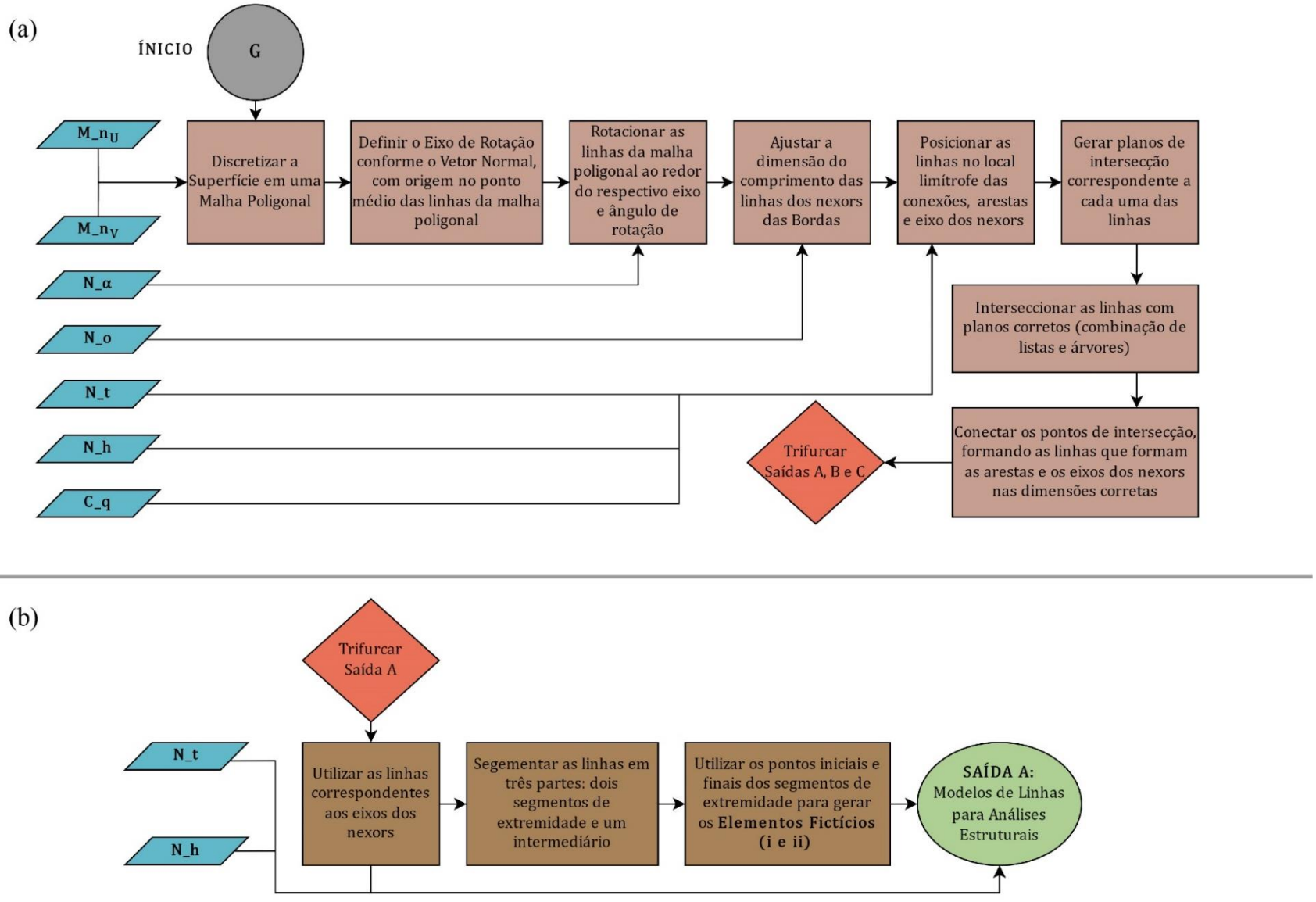
7.2.2. Visão geral e parâmetros de entrada

Uma das premissas consideradas no desenvolvimento do algoritmo era de permitir elevado nível de adaptabilidade, com a conversão automatizada de diversas geometrias em ERs. Para tornar isso possível, foi fundamental restringir certos aspectos nas variáveis de entrada, tais como: a) Dependência de uma superfície NURBS; b) Subdivisão em malhas de células quadrilaterais (quad-malha) e em losango (dia-malha); c) Aplicação pelo Método de Rotação. Assim, o funcionamento do algoritmo depende dos valores das seguintes entradas e é sintetizado nas Figuras 36a – 36d, 37 e 38:

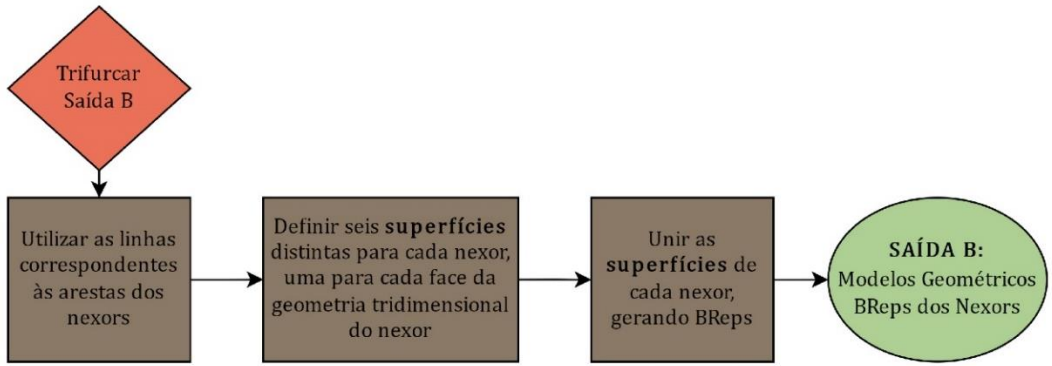
a) Geometria de Entrada (**G**)
b) Número de Subdivisões no sentido U (**M_n$_U$**)
c) Número de Subdivisões no sentido V (**M_n$_V$**)
d) Ângulo de Rotação (**N_α**)
e) Comprimento de Ajuste dos Nexors das Bordas (**N_o**)
f) Espessura da Seção Transversal dos Nexors (**N_t**)
g) Altura da Seção Transversal dos Nexors (**N_h**)
h) Comprimento da Parede da Conexão (**C_q**)
i) Espessura Adicional de Entalhe da Conexão (**C_f**)
j) Espessura Adicional de Rigidez da Conexão (**C_r**)
k) Tolerância de Variação Higroscópica da Conexão (**C_u**)
l) Tolerância de Precisão decorrente do Equipamento de Fabricação (**F_p**)
m) Diâmetro da Ferramenta de Fabricação (Fresa) (**F_d**)
n) Diâmetro do Furo para Barra Metálica (**C_d**)

Todas essas variáveis de entrada podem ser alteradas a qualquer momento, por diferentes razões, como aspectos estruturais ou estéticos, o que permite gerar produtos com características altamente personalizáveis. A principal razão para isso é o fato de que todas as operações geométricas e relações de dependência entre elementos são automaticamente atualizadas. Ao mesmo tempo, cada variável exerce uma influência sobre a geometria final da estrutura e as diversas modificações podem induzir descobertas de configurações de ERs únicas e pouco óbvias. Além disso, com a incorporação de plug-ins dentro do ambiente paramétrico, as relações entre parâmetros também podem ser exploradas para melhor compreensão do desempenho estrutural e processos de fabricação (CASTRIOTTO *et al,* 2021. Traduzido pelo autor).

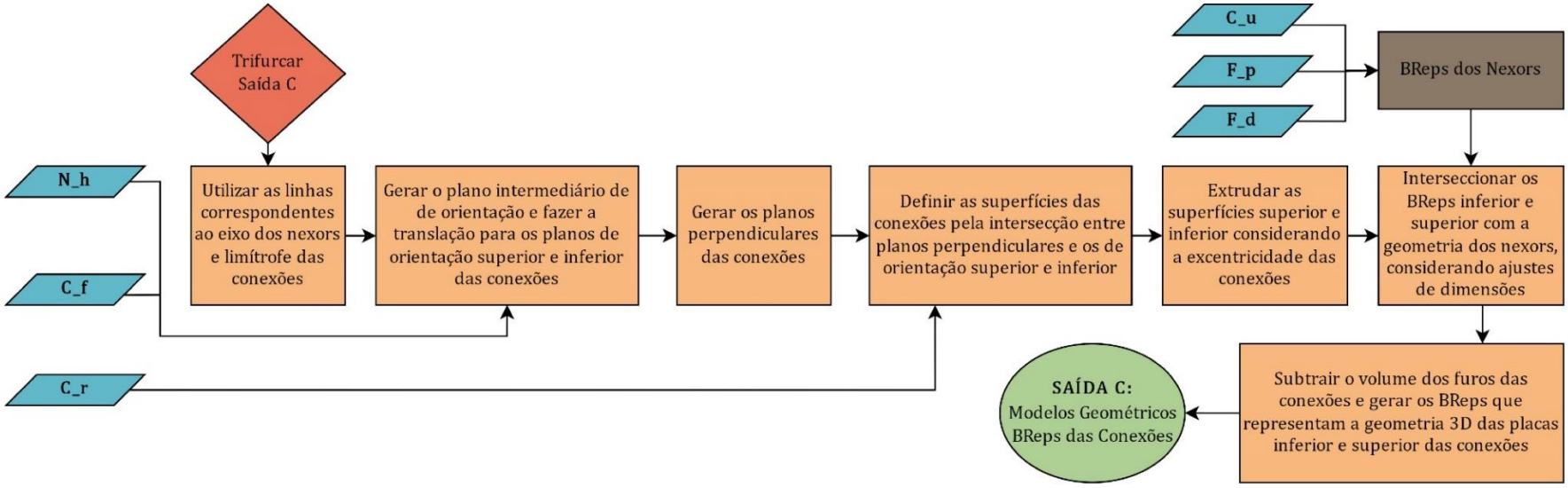
Figura 36: Encapsulamento das operações realizadas pelo algoritmo nas principais operações. (a) geração dos padrões recíprocos; (b) geração dos modelos de barras; (c) geração das geometrias dos nexors e (d) geração da geometria das conexões.



(c)

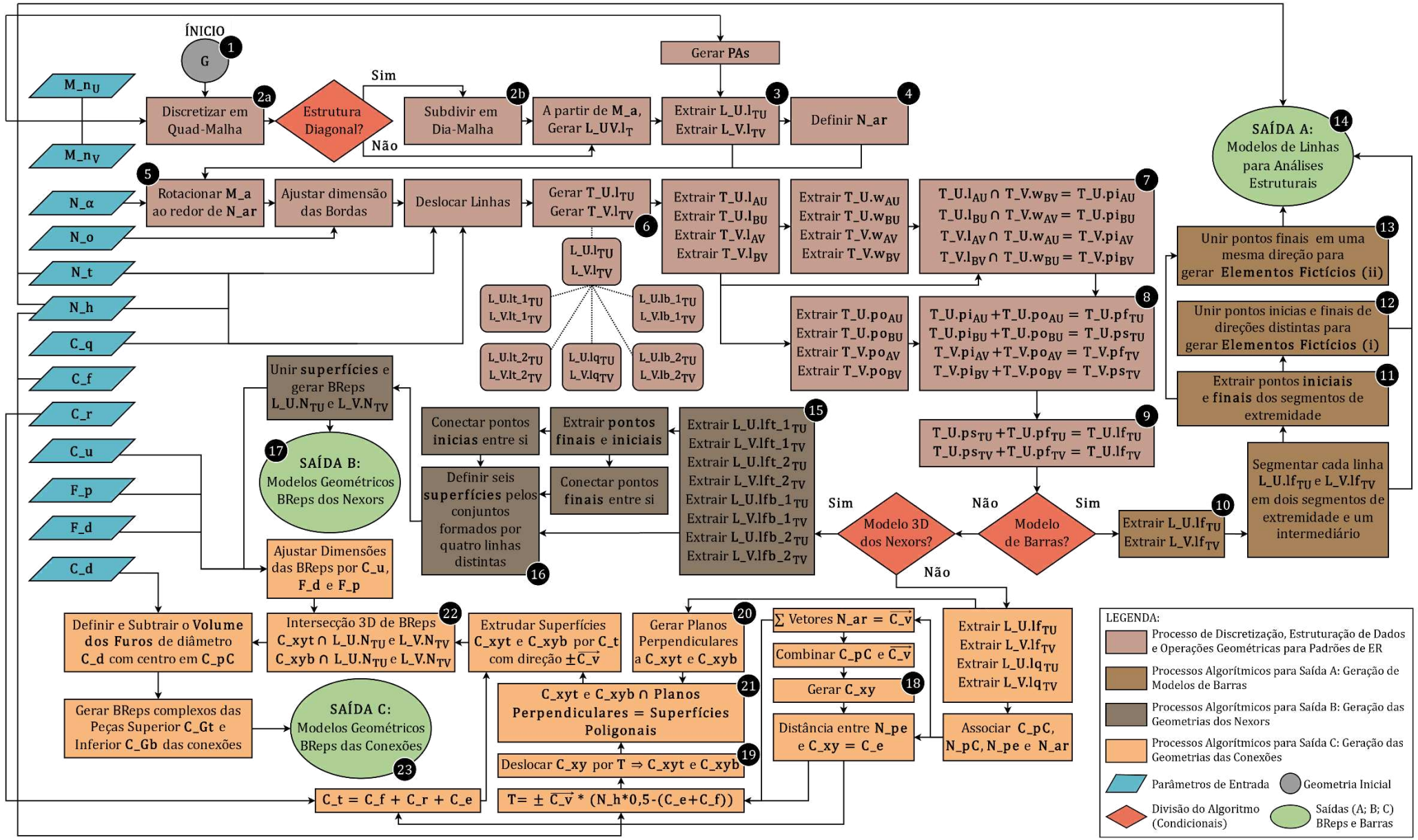


(d)



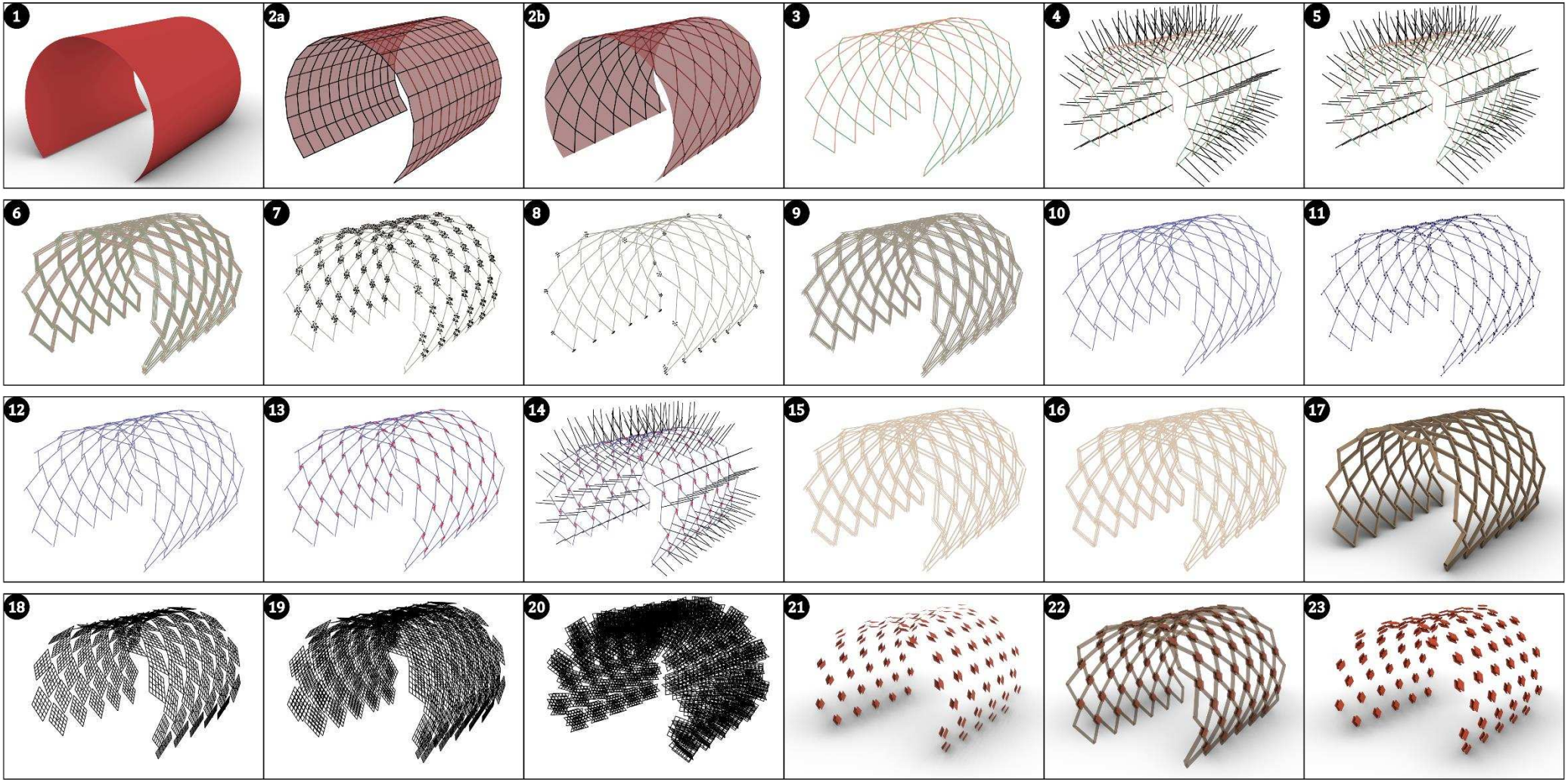
Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Figura 37: Diagrama apresentando todas as operações realizadas pelo algoritmo para a geração de uma Estrutura Recíproca. São destacadas as três principais saídas do algoritmo, sendo a geração dos **Modelos** estruturais, das geometrias tridimensionais dos nexors e das geometrias tridimensionais das conexões.



Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Figura 38: Diagrama apresentando alguns dos estágios de funcionamento do algoritmo. Os números das imagens estão relacionados com as operações da figura anterior.



Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

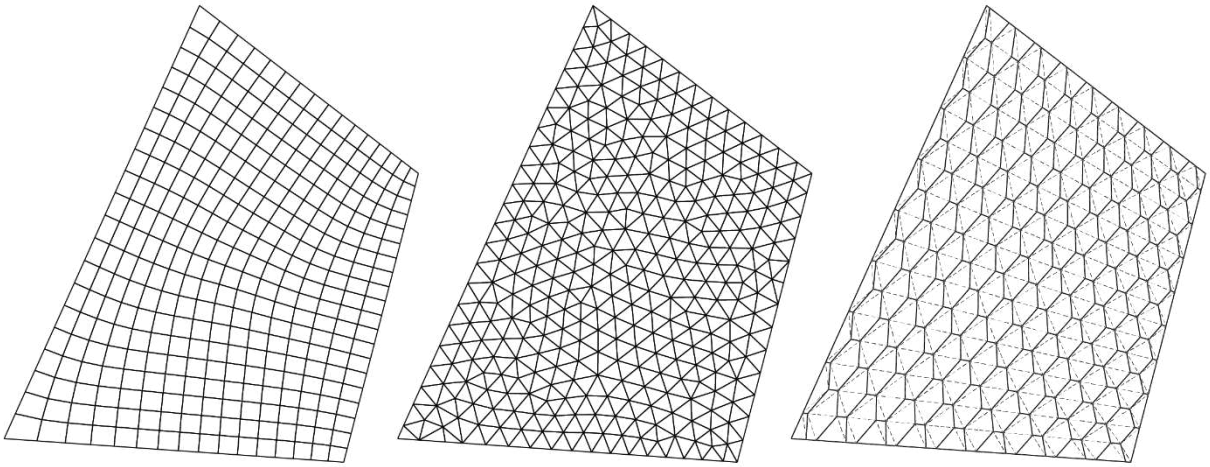
7.2.3. Processo de discretização e estrutura de dados de uma malha poligonal

Para explicar como os dados utilizados pelo algoritmo estão estruturados, é necessário compreender a importância e as implicações do processo de discretização, uma vez que a geometria de entrada é uma superfície de forma livre, construída a partir de B-Splines Racionais Não-Uniformes (NURBS)[17]. Em essência, as NURBS são modelos matemáticos utilizados por programas digitais (inclusive por sistemas CAD e CAM) e são constituídos por elementos contínuos e pontos de controle. As características intrínsecas a um ambiente virtual fazem com que a transposição de uma NURBS para o mundo físico seja uma tarefa quase impossível. Daí a necessidade da discretização: uma forma de simplificar um problema matemático-geométrico, limitando ainda mais os graus de liberdade e segmentando as continuidades.

Em geral, o produto da discretização de uma superfície NURBS é uma *mesh* (malha poligonal), composta por células com "n" lados lineares, variando entre quadrilaterais (quad-malha ou *quad-mesh*), triangulares (tri-malha ou *tri-mesh*) ou por mais de quatro lados (Ngon-malha ou *Ngon-mesh*) (Figura 39a – 39c). As malhas podem ser estruturadas ou não em grelhas, e ser geradas por uma série de estratégias diferentes, que dependem de fatores como: o tipo de algoritmo, de software e seu motor de processamento, dos parâmetros e configurações definidas, etc. Isso significa que malhas geradas por processos de discretização distintos podem até resultar em um mesmo padrão geométrico, com a mesma topologia, mas a disposição dos dados herdados é variável. Em outras palavras, a ordenação das faces ou das linhas limítrofes das células varia de acordo com o processo de discretização (CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021. Traduzido pelo autor).

[17] De forma simplificada, o termo NURBS pode ser explicado em três partes: B-Splines são curvas definidas por dois ou mais pontos de controle; Racionais implica no fato de que a equação utilizada para representar a curva pode ser expressa como um quociente de dois polinômios distintos e; Não-Uniformes significa que a influência de um ponto de controle sobre a curva é variável.

Figura 39: Tipos mais comuns de células que podem constituir uma malha poligonal.



(a) Quad-Malha (b) Tri-Malha (c) Ngon-Malha (Hexa)

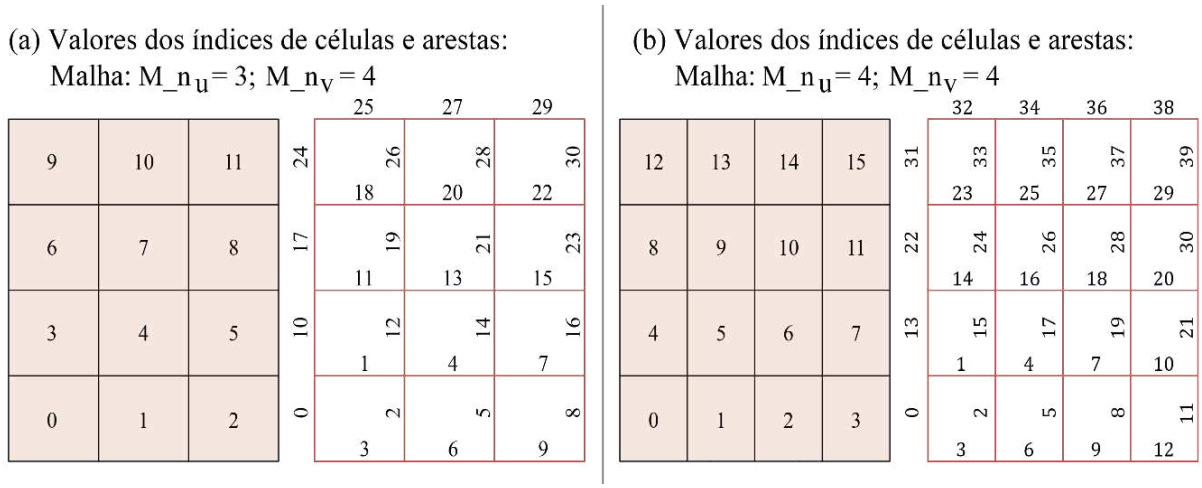
Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Contudo, é importante esclarecer que as variações lógicas de organização dos dados só ocorrem entre métodos distintos, o que significa que a aplicação de um mesmo método de discretização em geometrias distintas resultará em topologias formais diferentes, mas que seguem a mesma lógica de estruturação de dados. Nesse sentido, uma das restrições estabelecidas em prol da adaptabilidade do algoritmo foi a de sempre utilizar o mesmo processo de discretização, já que as operações geométricas realizadas pelo algoritmo dependem da combinação precisa dos dados relacionados aos elementos da malha. Dessa forma, os esforços de desenvolvimento do algoritmo foram concentrados nos dados fornecidos pela discretização de superfícies em malhas poligonais quadrilaterais, estruturadas em grelhas, compostas pela subdivisão das isocurvas nos sentidos U e V. Os números de subdivisão das linhas que constituem a malha estão relacionados com o grau de refinamento da mesma, sendo definido pelos valores independentes $\mathbf{M_n_U}$ e $\mathbf{M_n_V}$ (CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021. Traduzido pelo autor).

A lógica da estrutura de dados gerada pelo método específico de discretização da superfície pode ser descrita da seguinte forma: quando todas as linhas de uma malha poligonal ($\mathbf{M_a}$) são agrupadas em uma lista (nesse caso chamada de $\mathbf{L_UV.l_T}$), cada uma recebe um valor de índice correspondente, que fica entre $\mathbf{0}$ e $\mathbf{M_n_T - 1}$, considerando que $\mathbf{M_n_T}$ é igual ao produto da multiplicação de $\mathbf{M_n_U}$ por $\mathbf{M_n_V}$. Como a malha é baseada em isocurvas, a distribuição desses valores não é aleatória. Uma vez que os valores de U e V podem ser entendidos como

coordenadas de uma superfície tridimensional e que estão limitados à malha, um dos vértices da superfície pode ser definido como o ponto de origem, isto é, as coordenadas (0, 0) da malha. Ao mesmo tempo, apenas uma única célula de uma malha irá compartilhar essa coordenada como sua própria origem, e essa será a célula com índice 0. Isso implica que os segmentos de linhas (**M_a**) que limitam esta célula terão os índices 0, 1, 2 e 3, no caso de uma quad-malha. Os valores das células crescem primeiro em uma direção e depois na outra e, como consequência, os índices dos segmentos de linhas seguem o mesmo padrão, conforme exemplificado nas Figuras 40a e 40b (CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021. Traduzido pelo autor).

Figura 40: Uso de operações de Translação e Rotação para a geração de leques de Estruturas Recíprocas, compostos por 3, 4, 5 e 6 nexors. Esses métodos podem ser aplicados a "n" nexors.



Fonte: CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021, p. 11. Textos traduzidos pelo autor.

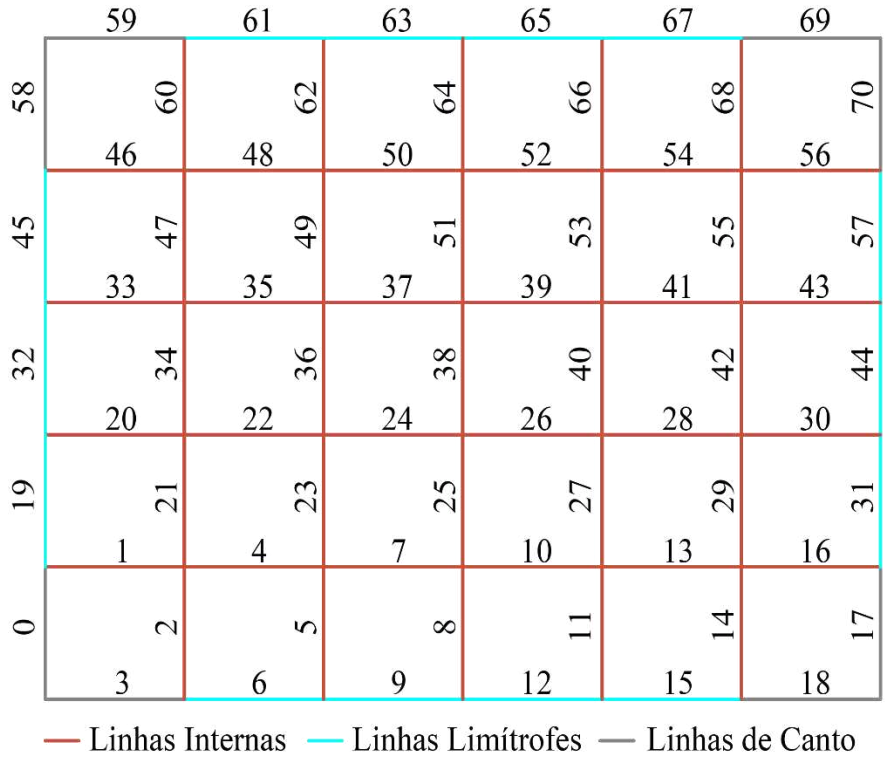
Compreender a lógica dos índices das arestas da malha como valores atribuídos aos eixos da malha poligonal (**M_a**) e como esses índices são estruturados em uma malha, desempenha um papel importante para a reorganização e combinação dos dados; nesse caso, os valores sempre serão ordenados em um padrão baseado nas isocurvas U e V, o que significa que todas as alterações feitas em $\mathbf{M_n_U}$ e $\mathbf{M_n_V}$ seguem o mesmo padrão, independentemente da superfície NURBS de entrada. Esta noção é a base para todas as operações geométricas do **Método** proposto, e também é a fundamentação de como implementar os leques das ERs a partir dos tipos de simetria encontrados. Cada linha da malha pode sofrer rotação e / ou translação em padrões específicos que irão gerar leques diferentes, mas para construir um sistema fechado de

ER, é necessário fazer a interseção e combinação das linhas de maneiras específicas (CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021. Traduzido pelo autor).

As operações geométricas necessárias para criar os padrões de Quad-Leques ou Quad-Leques Refletidos podem apresentar um grande desafio ao utilizar uma única lista de linhas ($\mathbf{L_UV.l_T}$), uma vez que alterações nas subdivisões das isocurvas alterariam as relações entre cada elemento. É mais fácil de compreender o nível de complexidade utilizando as malhas poligonais da Figura 40 como exemplo novamente. Em ambos os casos, o segmento 2 está na mesma posição e compartilha os pontos de intersecção com os segmentos 1, 3, 4 e 6. Contudo, o segmento 15 mostra diferentes relações quando as duas malhas são comparadas. Em uma (a), está na direção V, compartilhando as intersecções com os segmentos 1, 4, 14 e 16, enquanto na outra (b), o segmento está na direção U e é adjacente aos segmentos 14, 16, 21 e 23. Ao mesmo tempo, os segmentos 17 e 19 compartilham um mesmo ponto nas duas malhas, porém, estão posicionados em direções diferentes (CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021. Traduzido pelo autor).

Por esta razão, as informações contidas na lista $\mathbf{L_UV.l_T}$ podem ser manipuladas e reordenadas de forma que um padrão seja mantido independentemente das alterações dos parâmetros de entrada. Assim, os segmentos de linhas na quad-malha devem ser divididos em três grupos: (1) as linhas internas, que serão utilizadas para gerar os leques das ERs, (2) as linhas limítrofes, que definem as bordas da estrutura e, (3) as linhas de canto, que não têm utilidade para este algoritmo. A fim de explicar com mais detalhes essa divisão e as demais operações, a malha poligonal da Figura 41 será utilizada como exemplo (CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021. Traduzido pelo autor).

Figura 41: Quad-malha definida por $\mathbf{M_n_U = 6}$ e $\mathbf{M_n_V = 5}$, evidenciando os valores dos índices para cada um dos eixos da malha ($\mathbf{M_a}$) e a diferença entre os três grupos de linhas indicada por cores



Fonte: CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021, p. 13. Textos traduzidos pelo autor.

A maior parte dos próximos passos estão centrados ao redor das linhas internas (grupo 1). Para facilitar as operações, os segmentos de retas contidos na lista $\mathbf{L_UV.l_T}$ foram separados nas listas $\mathbf{L_U.l_{TU}}$ e $\mathbf{L_V.l_{TV}}$, uma para cada direção. Contudo, o padrão de distribuição dos índices das linhas que compõem a primeira fileira de células (de baixo para cima na malha) é ligeiramente diferente do restante, com uma lacuna entre os números. Ao observar a Figura 41, nota-se que a primeira fileira de linhas no sentido U apresenta um padrão de distribuição de índices começando em um e que é acrescentado por três a cada linha (1, 4, 7, 10, 13, 16), enquanto nas demais, o padrão é um mais dezenove e então é acrescentado dois (20, 22, 24, 26, 28, 30). Por esta razão e com o objetivo de extrair e reordenar as linhas, é necessário que sejam feitas combinações de listas distintas de números para cada direção ($\mathbf{L_U.n_{AT}}$, $\mathbf{L_U.n_{BT}}$, $\mathbf{L_V.n_{CT}}$, $\mathbf{L_V.n_{DT}}$). Em outras palavras, os números contidos nas listas $\mathbf{L_U.n_{AT}}$ e $\mathbf{L_U.n_{BT}}$ são utilizados como valores correspondentes dos índices das linhas internas no sentido U, compondo então a lista $\mathbf{L_U.l_{TU}}$, enquanto os números das listas $\mathbf{L_V.n_{CT}}$ e $\mathbf{L_V.n_{DT}}$ são utilizados para criar a $\mathbf{L_V.l_{TV}}$. Essas listas funcionam como um mecanismo que faz a ponte

entre todas as alterações paramétricas e a extração e ordenação das listas pelos valores dos índices (CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021. Traduzido pelo autor).

Os números específicos utilizados para cada lista podem ser obtidos utilizando uma Progressão Aritmética (P. A), isto é, uma sequência de números, baseados em três variáveis de entrada: um valor inicial (**I**), um valor correspondente a razão usada para cada número sucessivo (**R**) e um valor de contagem que representa a quantidade de números da P.A (**Q**) (equação 20). Para otimizar algumas das relações, uma ou mais dessas entradas não é um único valor, mas uma lista de números, chamadas de Séries Inicias (SI) para cada direção ($\mathbf{L_U.n_{BTSI}}$ e $\mathbf{L_V.n_{DTSI}}$). Isso significa que **I**, **R** ou **Q** podem ser formados por uma outra P.A, o que resulta em agrupamentos de listas de forma hierárquica, ou **Árvores** que podem ser achatadas em uma lista simples. Isso pode ser executado no Grasshopper pelo componente "Series" (CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021. Traduzido pelo autor).

$$\mathbf{f} : \{\mathbf{I}, \mathbf{I}+\mathbf{R}, \mathbf{I}+\mathbf{2}*\mathbf{R}, \mathbf{I}+\mathbf{3}*\mathbf{R}, \dots, \mathbf{I}+\mathbf{R}*\mathbf{Q}\} \rightarrow \mathbb{N} \qquad \text{(eq. 20)}$$

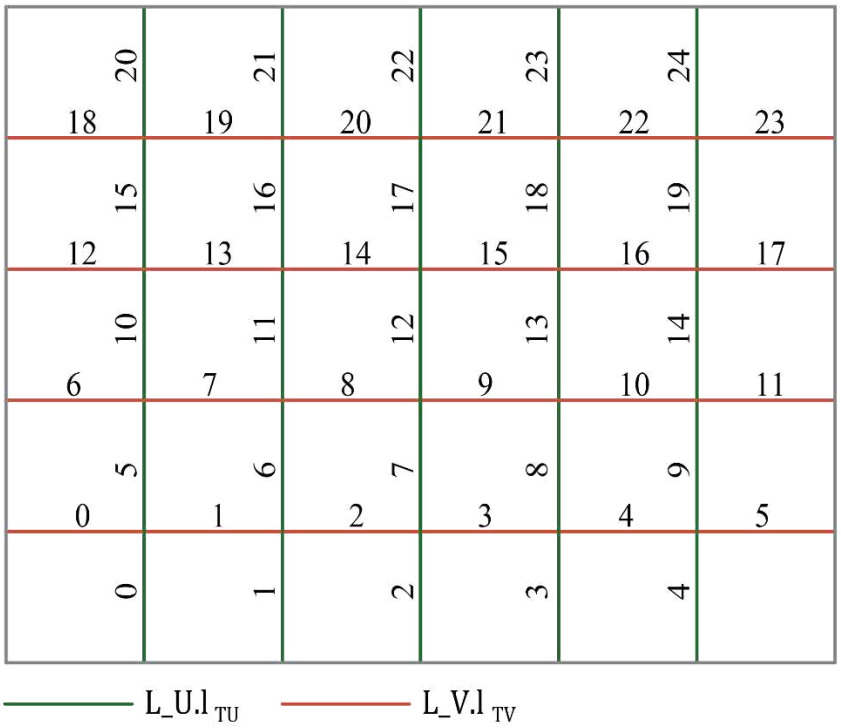
Os parâmetros **I**, **R** e **Q** adotados para gerar as listas de números utilizadas para extrair as novas listas de linhas para cada direção são apresentados na Tabela 3, e como isso altera a estrutura da malha poligonal é exemplificado pela Figura 42.

Tabela 3: Valores dos parâmetros utilizados nos componentes "Series" do Grasshopper, com objetivo de extrair os dados corretos para gerar as listas $\mathbf{L_U_{TU}}$ e $\mathbf{L_V_{TV}}$.

Listas de Origem	**P.A Aplicada**			**Listas de Números**	**Listas Resultantes**
	I	**R**	**Q**		
$\mathbf{L_UV.l_T}$	**1**	**3**	$\mathbf{M_n_V}$	$\mathbf{L_U.n_{AT}}$	$\mathbf{L_U.l_{TU}}$
	$\mathbf{L_U.n_{BSI}}$	**2**	$\mathbf{M_n_V}$	$\mathbf{L_U.n_{BT}}$	
	2	**3**	$\mathbf{M_n_V - 1}$	$\mathbf{L_V.n_{CT}}$	$\mathbf{L_V.l_{TV}}$
	$\mathbf{L_V.n_{DSI}}$	**2**	$\mathbf{M_n_V - 1}$	$\mathbf{L_V.n_{DT}}$	
Considerando que as Séries Inicias utilizadas são compostas pelas P.As:					
Série Inicial (SI)	**P.A Aplicada**				
	I		**R**	**Q**	
$\mathbf{L_U.n_{BSI}}$	$\mathbf{M_n_V * 3 + 2}$		$\mathbf{M_n_V * 2 + 1}$	$\mathbf{M_n_U - 2}$	
$\mathbf{L_V.n_{DSI}}$	$\mathbf{M_n_V * 3 + 3}$		$\mathbf{M_n_V * 2 + 1}$	$\mathbf{M_n_U - 1}$	

Fonte: CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021, p. 15. Traduzido e adaptado pelo autor.

Figura 42: Distribuição dos índices nas novas listas geradas para o sentido U e V. Nesse processo as linhas de canto e as limítrofes não são incorporadas.

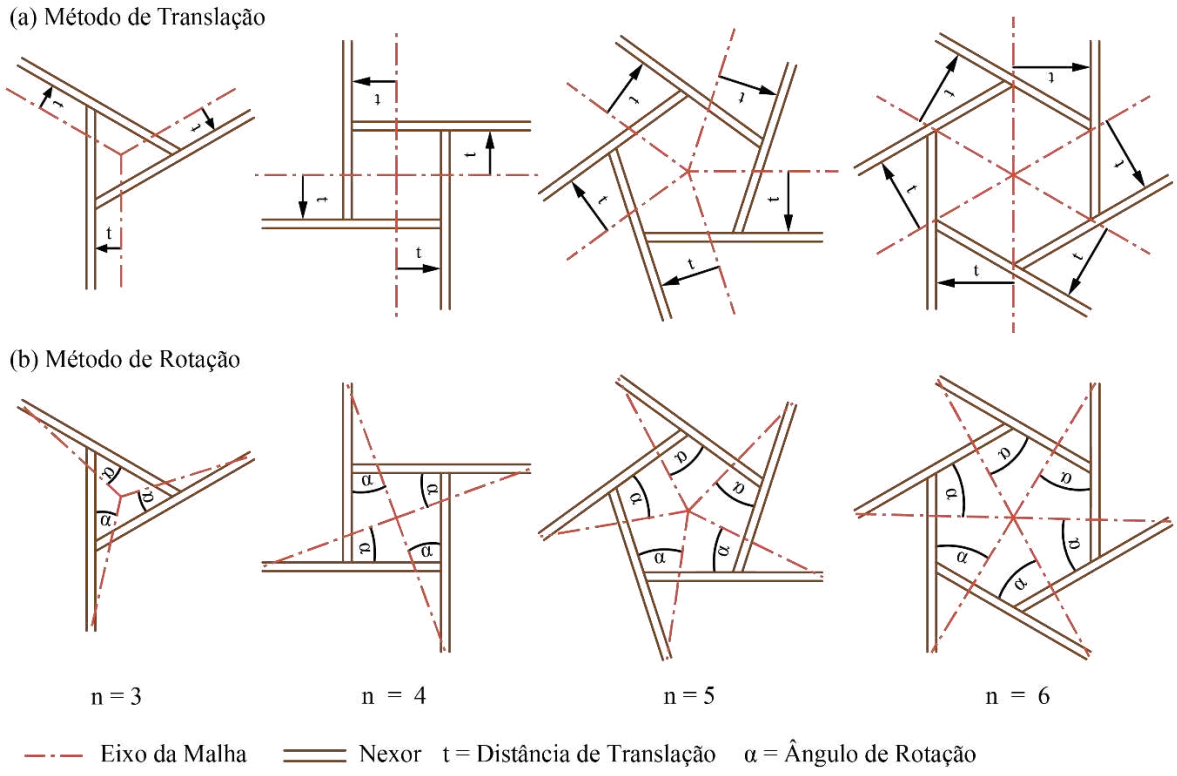


Fonte: CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021, p. 14. Traduzido e adaptado pelo autor.

7.2.4. Operações geométricas para geração de padrões recíprocos

Com os dados estruturados, é possível iniciar o processo de transformação da malha poligonal em um padrão recíproco. As formas mais recorrentes de executar esse processo é pela aplicação do Método de Translação (Figura 43a) ou pelo Método de Rotação (Figura 43b). Nos dois casos, são feitas operações geométricas (com os respectivos nomes) para o reposicionamento dos eixos da malha poligonal (**M_a**), gerando os leques de uma ER. Durante essa etapa de desenvolvimento do algoritmo também foram produzidos os **Modelos** Geométricos das Séries 1 e 2, apresentados na Seção 7.3, com o intuito de facilitar o entendimento acerca das limitações, restrições e potencialidades das relações entre a estrutura de dados e as operações geométricas.

Figura 43: Uso de operações de (a) Translação e (b) Rotação para a geração de leques de Estruturas Recíprocas, compostos por 3, 4, 5 e 6 nexors. Esses métodos podem ser aplicados a “n” nexors.



Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

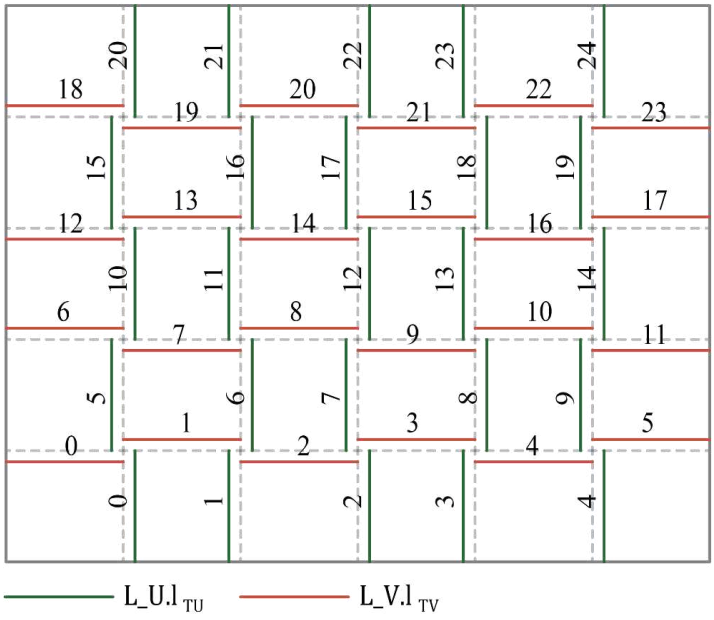
Há uma importante relação entre o método de transformação utilizado e o resultado final da composição geométrica de uma ER. Isso é mais evidente ao analisar e comparar os leques gerados pelos Métodos de Translação e de Rotação com os arranjos definidos pelos Grupos de Simetria de Papel de parede. O uso da Translação gera os arranjos simples de Quad-Leques Refletidos e Tri-Leques Refletidos e o especial Tri-Hexa Leque. Por sua vez, a Rotação resulta nos arranjos simples de Quad-Leques e Tri-Leques ou no especial de 2 Tri-Leques. Essa informação é fundamental para compreender como essas duas operações geométricas estão relacionadas com os dados da malha poligonal.

O grau de complexidade estabelecido pelas relações entre os dados para a conversão de uma malha poligonal em um dos dois arranjos é elevado. Tendo como base as Figura 44a e 44b, é evidente que os valores dos índices usados para a extração e combinação precisa das linhas são consideravelmente distintos entre ER formada por Quad-Leques e por Quad-Leques Refletidos. Por exemplo, ao comparar a linha 12 dos dois arranjos, o uso da translação implica em intersecções finais com as linhas 9 e 15 e laterais com 8 e 14, já a rotação implica em

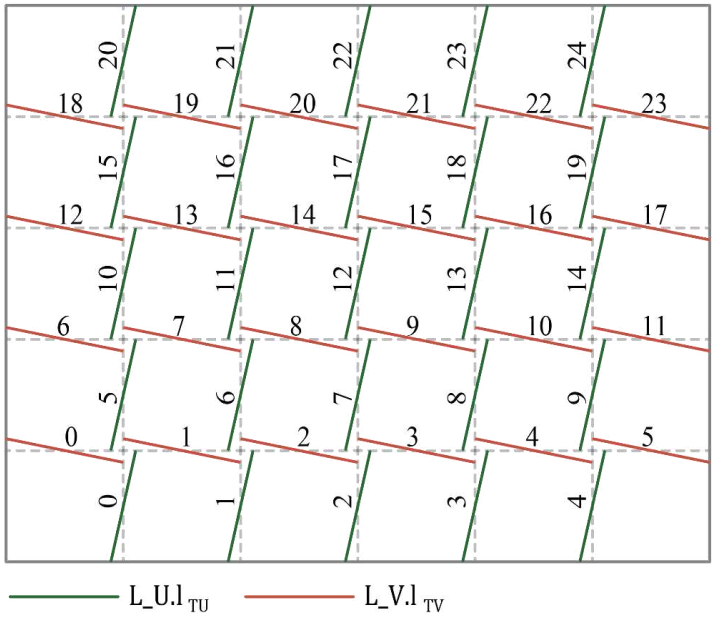
intersecções finais com 8 e 15 e laterais com 9 e 14. Em termos operacionais do algoritmo, isso implica em encontrar dois padrões distintos que devem ser aplicados exclusivamente para um ou outro método. Por conta disso, a presente versão do algoritmo é focada apenas nos padrões de Quad-Leques, gerados pela aplicação do Método de Rotação.

Figura 44: Disposição da ordem dos elementos em um arranjo gerado pelo método de (a) Translação e (b) Rotação. As relações entre elementos de mesma numeração diferem para cada um dos métodos.

(a) Relação entre linhas no Método de Translação



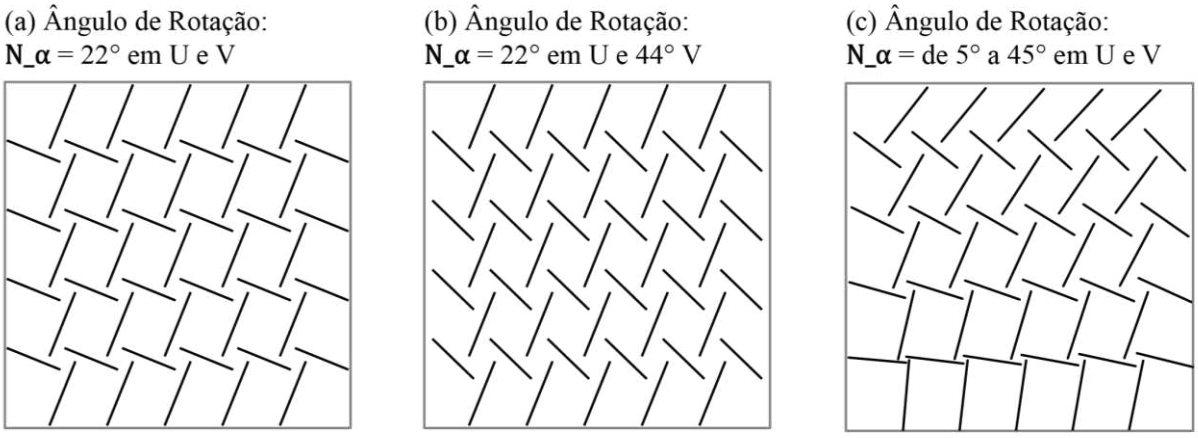
(b) Relação entre linhas no Método de Rotação



Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Com o propósito de realizar um conjunto de operações geométricas nas listas $\mathbf{L_U.l_{TU}}$ e $\mathbf{L_V.l_{TV}}$, foi necessário extrair múltiplos Vetores Normais à geometria da malha poligonal, onde a origem de cada um é dada pelos pontos centrais (**N_pc**) dos eixos da malha (**M_a**). Com base na direção definida por estes vetores, são construídos os Eixos de Rotação dos Nexors (**N_ar**), utilizados para orientar a rotação de cada uma das linhas, de acordo com o valor do Ângulo de Rotação (**N_α**). Como resultado desta operação, são geradas as configurações em catavento, utilizadas como base para os leques de uma ER. Contudo, como foi possível observar na Figura 44, os segmentos de reta ainda precisam ser conectados. Este momento abre a possibilidade de se aplicar distorções paramétricas, que podem conduzir a simetrias não-Euclidianas. Alguns exemplos são apresentados nas Figuras 45a – 45c (CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021. Traduzido pelo autor).

Figura 45: Exemplos de distorções em três situações diferentes: (a) com um único ângulo; (b) com um único ângulo no sentido U e outro no sentido V e; (c) todos os ângulos são diferentes.



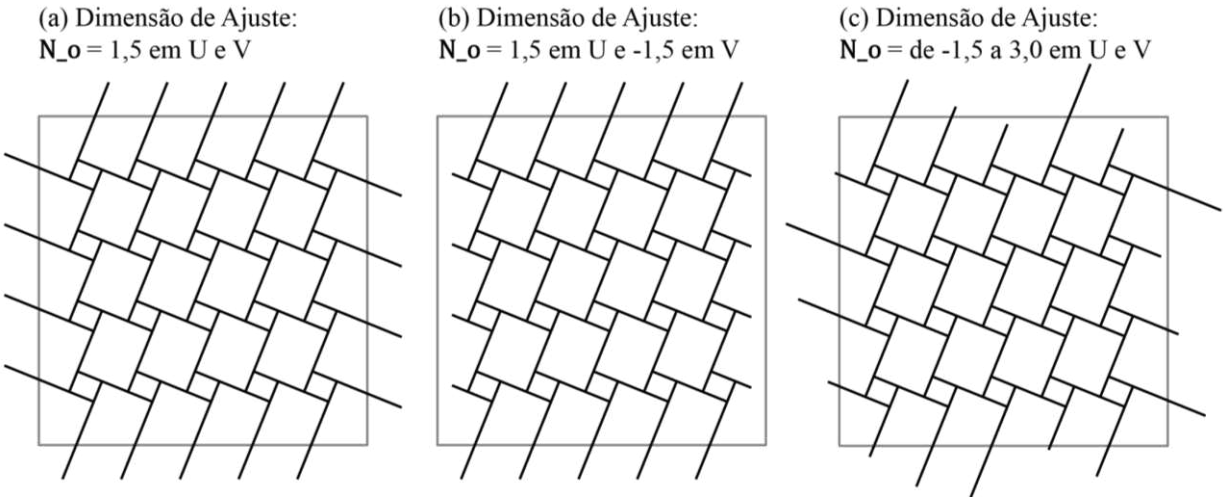
Fonte: CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021, p. 15. Traduzido e adaptado pelo autor.

As configurações rotacionadas levam a outro conjunto de operações geométricas pode ser dividida em duas partes: (1) as relações estabelecidas entre as linhas em $\mathbf{L_U.l_{TU}}$ e $\mathbf{L_V.l_{TV}}$ com as bordas da malha poligonal e, (2) as interações provenientes da relação entre as linhas em $\mathbf{L_U.l_{TU}}$ com as em $\mathbf{L_V.l_{TV}}$.

A primeira apresenta a possibilidade de controlar o tamanho máximo e mínimo de cada linha de acordo com o valor do Comprimento de Ajuste dos Nexors das Bordas (**N_o**), podendo variar entre um valor positivo ou negativo. No caso de **N_o** ser igual a zero, as linhas terminam no plano de intersecção do limite da malha poligonal. Variações e alterações nesse parâmetro

podem resultar em outras opções de distorções paramétricas, como é exemplificado pelas figuras 46a – 46c (CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021. Traduzido pelo autor).

Figura 46: Exemplos de ajustes em três diferentes situações: (a) um único valor no sentido U e V; (b) um valor positivo para U e um negativo para V e; (c) todos os valores são diferentes.



Fonte: CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021, p. 16. Traduzido e adaptado pelo autor.

Quanto à segunda parte, a complexidade é relacionada a encontrar o comprimento exato das linhas internas. O comprimento dos eixos das malhas (**M_a**) é decorrente do grau de irregularidade e curvatura da superfície de entrada (**G**), do grau de refinamento da malha conforme a subdivisão feita no sistema UV e das distorções paramétricas de rotação. Estas variáveis implicam em diferentes valores para os vãos existentes entre as linhas de cada lista, que são resolvidos pela combinação e intersecção de linhas e planos específicos em padrões específicos. Para executar essa operação, os mesmos vetores normais que foram utilizados para criar os Eixos de Rotação dos Nexors (**N_ar**), são combinados com as linhas em $\mathbf{L_U.l_{TU}}$ e $\mathbf{L_V.l_{TV}}$, considerando que seus pontos de origem compartilham os mesmos índices dos pontos centrais (**N_pc**), resultando em duas listas de planos coincidentes. Dessa forma, cada plano gerado tem exatamente o mesmo valor de índice da linha da malha que o compõe. Com estas listas em mãos, um problema semelhante ao encontrado na malha poligonal inicial é enfrentado, onde é necessário dividir todas as linhas antes das combinações. Isso foi feito pela aplicação de novas P.As com parâmetros variáveis (seguindo a mesma lógica da equação 20), resultando em quatro listas de números distintas ($\mathbf{L_U.n_{AU}}$, $\mathbf{L_U.n_{BU}}$, $\mathbf{L_V.n_{AV}}$ and $\mathbf{L_V.n_{BV}}$) e que, por sua vez, são usadas para extrair e combinar os índices corretos. Assim, são obtidas quatro listas de linhas ($\mathbf{L_U.l_{AU}}$, $\mathbf{L_U.l_{BU}}$, $\mathbf{L_V.l_{AV}}$ and $\mathbf{L_V.l_{BV}}$) e quatro listas com os planos coincidentes respectivos ($\mathbf{L_U.w_{AU}}$, $\mathbf{L_U.w_{BU}}$, $\mathbf{L_V.w_{AV}}$ and $\mathbf{L_V.w_{BV}}$). Para este processo, também foi

utilizando o componente “Series”, do Grasshopper, com os valores atribuídos a **I**, **R** e **Q** conforme a Tabela 4 (CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021. Traduzido pelo autor).

Tabela 4: Valores dos parâmetros utilizados nos componentes “Series” do Grasshopper, com objetivo de extrair os dados corretos para gerar as listas de linhas e planos de intersecção.

Listas de Origem	**P.A Aplicada**			**Listas de Números**	**Listas Resultantes**	
	I	**R**	**Q**		**Linhas**	**Planos**
$\mathbf{L_U.l_{TU}}$	$\mathbf{L_U.n_{AUSI}}$	**1**	$\mathbf{M_n_V - 1}$	$\mathbf{L_U.n_{AU}}$	$\mathbf{L_U.l_{AU}}$	$\mathbf{L_U.w_{AU}}$
	$\mathbf{L_U.n_{BUSI}}$	**1**	$\mathbf{M_n_V - 1}$	$\mathbf{L_U.n_{BU}}$	$\mathbf{L_U.l_{BU}}$	$\mathbf{L_U.w_{BU}}$
$\mathbf{L_V.l_{TV}}$	$\mathbf{L_V.n_{AVSI}}$	**1**	$\mathbf{M_n_V - 1}$	$\mathbf{L_V.n_{AV}}$	$\mathbf{L_V.l_{AV}}$	$\mathbf{L_V.w_{AV}}$
	$\mathbf{L_V.n_{BVSI}}$	**1**	$\mathbf{M_n_V - 1}$	$\mathbf{L_V.n_{BV}}$	$\mathbf{L_V.l_{BV}}$	$\mathbf{L_V.w_{BV}}$

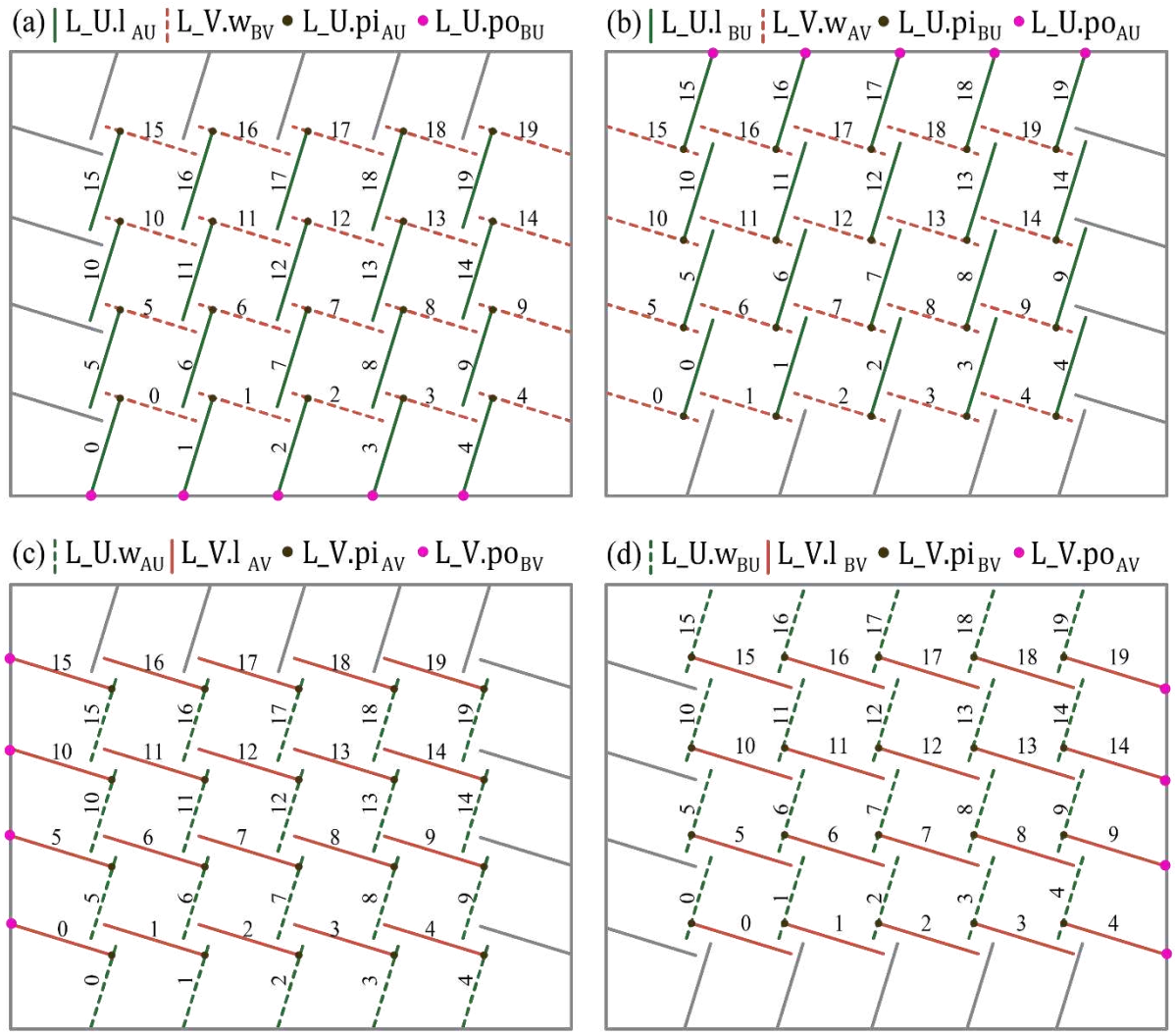
Onde as Séries Inicias utilizadas são compostas pelas P.As:

Série Inicial (SI)	**P.A Aplicada**		
	I	**R**	**Q**
$\mathbf{L_U.n_{AUSI}}$	**1**	$\mathbf{M_n_V}$	$\mathbf{M_n_U - 1}$
$\mathbf{L_U.n_{BUSI}}$	**0**	$\mathbf{M_n_V}$	$\mathbf{M_n_U - 1}$
$\mathbf{L_V.n_{AVSI}}$	$\mathbf{M_n_V - 1}$	$\mathbf{M_n_V - 1}$	$\mathbf{M_n_U - 1}$
$\mathbf{L_V.n_{BUSI}}$	**0**	$\mathbf{M_n_V - 1}$	$\mathbf{M_n_U - 1}$

Fonte: CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021, p. 17. Traduzido e adaptado pelo autor.

Com esse estágio concluído, agora é possível realizar todas as intersecções específicas (equação 21), uma vez que os índices das linhas e dos planos de intersecção coincidentes são exatamente os mesmos. O produto das intersecções são coleções de pontos distribuídos em quatro listas distintas ($\mathbf{L_U.pi_{AU}}$, $\mathbf{L_U.pi_{BU}}$, $\mathbf{L_V.pi_{AV}}$, $\mathbf{L_V.pi_{BV}}$), nas quais os valores dos índices são derivados e preservados de acordo com as operações geométricas. Por exemplo, a linha cinco em uma direção intersecta o plano cinco da outra direção, o que resulta no ponto de intersecção de índice cinco. Ao mesmo tempo, as linhas que compartilham condições de borda com a malha têm seus pontos extraídos em outras quatro listas distintas, duas para cada direção ($\mathbf{L_U.po_{AU}}$, $\mathbf{L_U.po_{BU}}$, $\mathbf{L_V.po_{AV}}$, e $\mathbf{L_V.po_{BV}}$) com base nas P.As da Tabela 5. Todo esse sistema é exemplificado nas Figuras 47a – 47d (CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021. Traduzido pelo autor).

Figura 47: Esquemas de relações entre quatro listas de linhas diferentes e as listas com a projeção dos planos correspondentes de intersecção, utilizados para gerar quatro listas de pontos. Também são obtidos os pontos das bordas neste processo.



Fonte: CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021, p. 18. Textos traduzidos pelo autor.

$$\mathbf{L_U.l_{AU} \cap L_V.w_{BV} = \{L_U.pi_{AU}\}}$$

$$\mathbf{L_U.l_{BU} \cap L_V.w_{AV} = \{L_U.pi_{BU}\}}$$

$$\mathbf{L_V.l_{AV} \cap L_U.w_{AU} = \{L_V.pi_{AV}\}} \quad \text{(eq. 21)}$$

$$\mathbf{L_V.l_{BV} \cap L_U.w_{BU} = \{L_V.pi_{BV}\}}$$

Tabela 5: Valores dos parâmetros utilizados nos componentes "Series" do Grasshopper, com objetivo de extrair os dados corretos para gerar as listas de pontos de borda.

Listas de Origem	**P.A Aplicada**			**Listas Resultantes**
	I	**R**	**Q**	
$\mathbf{L_U.l_{TU}}$	$\mathbf{(M_n_U - 1) * (M_{nV} - 1)}$	$\mathbf{M_n_V - 1}$	$\mathbf{M_n_V - 1}$	$\mathbf{L_U.po_{AU}}$
	$\mathbf{0}$	$\mathbf{1}$	$\mathbf{M_n_U - 1}$	$\mathbf{L_U.po_{BU}}$
$\mathbf{L_V.l_{TV}}$	$\mathbf{M_n_U - 1}$	$\mathbf{M_n_V}$	$\mathbf{M_n_V - 1}$	$\mathbf{L_V.po_{AV}}$
	$\mathbf{0}$	$\mathbf{M_n_U}$	$\mathbf{M_n_V - 1}$	$\mathbf{L_V.po_{BV}}$

Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

A união das listas de pontos de intersecção com as respectivas listas de pontos de borda ($\mathbf{L_U.pi_{AU}}$ com $\mathbf{L_U.po_{AU}}$; $\mathbf{L_U.pi_{BU}}$ com $\mathbf{L_U.po_{BU}}$; $\mathbf{L_V.pi_{AV}}$ com $\mathbf{L_V.po_{AV}}$; $\mathbf{L_V.pi_{BV}}$ com $\mathbf{L_V.po_{BV}}$), dada a preservação da posições originais de acordo com os valores de índices das listas $\mathbf{L_U.l_{TU}}$ e $\mathbf{L_V.l_{TV}}$, resulta em quatro novas listas: $\mathbf{L_U.pf_{TU}}$, $\mathbf{L_U.ps_{TU}}$, $\mathbf{L_V.pf_{TV}}$ e $\mathbf{L_V.ps_{TV}}$ (equação 22). Essas contêm a quantidade total de pontos que determinam com precisão o comprimento de cada uma das linhas que representam os Eixos dos Nexors ($\mathbf{N_a}$), sendo os pontos iniciais e finais de uma reta. Dessa forma, conectando os pontos de $\mathbf{L_U.ps_{TU}}$ com os de $\mathbf{L_U.pf_{TU}}$ resulta na lista de linhas $\mathbf{L_U.lf_{TU}}$, enquanto a mesma operação entre $\mathbf{L_V.ps_{TV}}$ e $\mathbf{L_V.pf_{TV}}$ gera a lista $\mathbf{L_V.lf_{TV}}$. Essas duas listas finais representam o padrão geométrico dos eixos dos nexors de uma ER, no qual cada linha pode apresentar um comprimento único e preciso independente das alterações feitas nos parâmetros de entrada. O processo de conexão dos pontos é exemplificado na Figura 48 (CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021. Traduzido pelo autor).

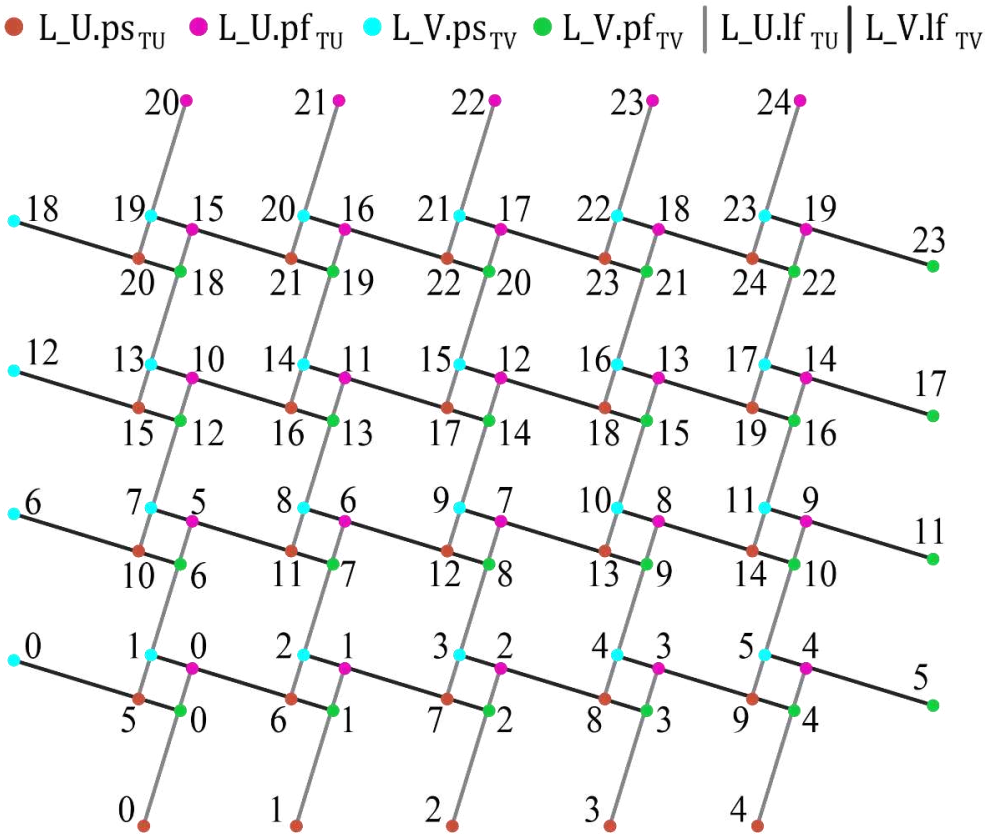
$$\mathbf{L_U.pi_{AU}} \cup \mathbf{L_U.po_{AU}} = \{\mathbf{L_U.pf_{TU}}\}$$

$$\mathbf{L_U.pi_{BU}} \cup \mathbf{L_U.po_{BU}} = \{\mathbf{L_U.ps_{TU}}\} \qquad \text{(eq. 22)}$$

$$\mathbf{L_V.pi_{AV}} \cup \mathbf{L_V.po_{AV}} = \{\mathbf{L_U.pf_{TV}}\}$$

$$\mathbf{L_V.pi_{BV}} \cup \mathbf{L_V.po_{BV}} = \{\mathbf{L_U.ps_{TV}}\}$$

Figura 48: Conexões feitas entre os pontos de intersecção para gerar as linhas que compõem os Quad-Leques de um padrão de ER.



Fonte: CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021, p. 19. Textos traduzidos pelo autor.

Um dos aspectos mais relevantes do processo apresentado até o momento é de que, após a execução de múltiplas operações geométricas, o número total de elementos permanece o mesmo, assim como a ordenação dos itens dentro da lista pelos mesmos valores de índices. Em outras palavras, "**TU**" e "**TV**", indicados nas listas $\mathbf{L_U.lf_{TU}}$ e $\mathbf{L_V.lf_{TV}}$, não indicam apenas

que a quantidade total de linhas permanece a mesma de $\mathbf{L_V.l_{TV}}$ e $\mathbf{L_V.lf_{TV}}$, mas que não houve alteração no posicionamento dos dados, sendo mantidos os mesmos valores de índice nas duas situações. Assim, relações que foram previamente estabelecidas, como as definidas entre os Vetores Normais e os Eixos de Rotação dos Nexors ($\mathbf{N_ar}$), são preservadas e podem ser novamente utilizadas, sobretudo para definir as geometrias tridimensionais (CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021. Traduzido pelo autor).

7.2.5. Ajustes das operações geométricas para o processamento do algoritmo

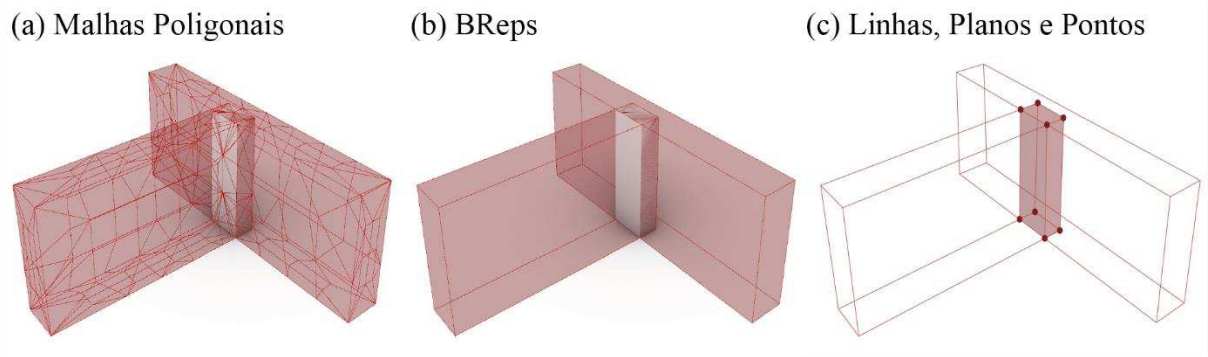
De modo geral, a representação de volumes ou sólidos em softwares de modelagem, como o Rhinoceros e o Grasshopper, é feita por Malhas Poligonais ou pela Representação de Limites (BRep). Existem algumas diferenças significativas entre uma e outra que impactam, diretamente, no desempenho computacional. Nesse sentido, as malhas poligonais são geometrias nativas utilizadas pelo processador gráfico (GPU) para exibir objetos virtuais, constituídas por um número específico de células; quanto maior a quantidade de células, maior o nível de refinamento da malha e, consequentemente, maior a demanda por poder e tempo de processamento gráfico de uma GPU. Por sua vez, uma BRep é uma forma de representar um objeto tridimensional por equações matemáticas complexas.

O tempo de processamento gasto para a realização das operações geométricas é uma variável fundamental para a viabilidade de um algoritmo. Em termos comparativos, não existe uma diferença significativa quando são realizadas poucas operações simultâneas entre alguns elementos. Por exemplo, para identificar a zona de intersecção duas malhas poligonais compostas por 137 células cada (Figura 49a), o tempo de processamento é de 23 milissegundos, enquanto a mesma operação entre dois sólidos formados por BReps (Figura 49b), o tempo diminui para 13 milissegundos. Quando essa mesma operação é feita 100 vezes, o tempo consumido muda para 680 milissegundos entre BReps e 2,2 segundos entre as malhas. Esse tempo de processamento aumenta de forma quase linear, ao ser realizada 10 mil vezes, as BReps gastam 1,2 minutos e as malhas levam aproximadamente 4 minutos

Esses dados foram obtidos com base em uma situação em que tanto as geometrias como as operações realizadas são sempre as mesmas, em condições idênticas de hardware. Contudo, o algoritmo desenvolvido precisa executar algumas centenas de operações geométricas distintas simultaneamente, o que significa que o processamento de geometrias tridimensionais em

malhas seria potencialmente inviável. Mesmo o uso de BReps poderia ser uma limitante, sendo necessário adotar algumas estratégias específicas de modelagem, a fim de executar diferentes operações da forma mais eficiente possível.

Figura 49: Exemplo de sólido gerado pela intersecção de duas (a) malhas poligonais, (b) BReps e (c) Linhas, Planos e Pontos.



Fonte: elaborado pelo autor, 2022

Uma alternativa seria de utilizar os elementos geométricos que constituem essas geometrias, como seus planos, faces, arestas e vértices. Isso porque o tempo de processamento de operações geométricas feitas entre linhas e planos é praticamente estático. Tendo como base a mesma geometria apresentada na Figura 49c, o tempo necessário utilizando linhas e planos é reduzido para menos de cinco milissegundos quando é feita apenas uma vez, uma média de 150 milissegundos ao repetir a operação 100 vezes e 300 milissegundos quando repetidas 10 mil vezes. Essas informações fundamentaram a escolha de se utilizar elementos lineares ou bidimensionais para a maior parte das operações geométricas, fazendo o uso de BReps somente em momentos muito específicos do algoritmo. O comparativo entre o tempo de processamento utilizando malhas, BReps e linhas é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6: Tempo de processamento (em segundos) que Grasshopper demanda para realização de uma, cem e dez mil intersecções idênticas entre diferentes tipos de elementos geométricos.

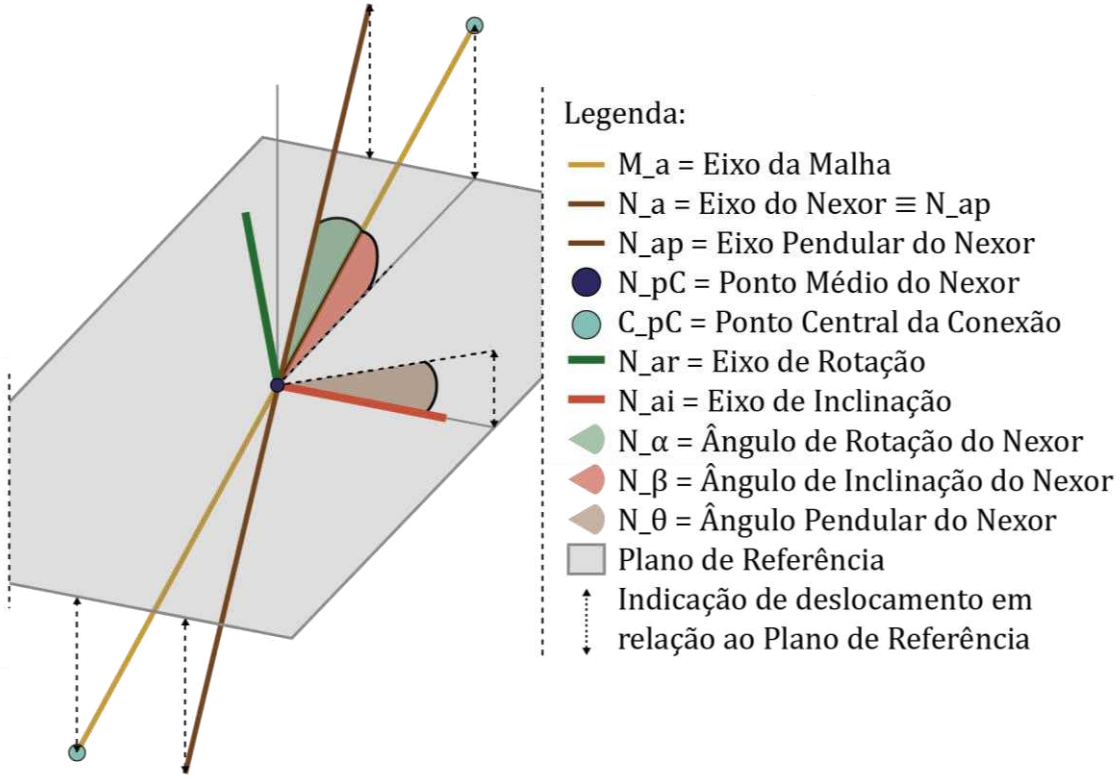
Tipo de Geometria	Quantidade de Operações		
	1	**100**	**10.000**
Malhas Poligonais	0,023 s	2,20 s	240,0 s
BReps	0,013 s	0,68 s	72,0 s
Linhas, Planos e Pontos	0,001 s	0,15 s	0,3 s

Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Portanto, ao invés de utilizar os Eixos dos Nexors (**N_a**) como base para a geração de sólidos, eles foram utilizados como referências para gerar as arestas dos nexors. Simultaneamente, a mesma lógica pode ser utilizada para gerar pontos que definem as extremidades das geometrias das conexões (**C**). Para isso, é necessário olhar novamente para a explicação dada sobre a geração dos padrões recíprocos, especificamente após a aplicação do Método de Rotação, e fazer uma alteração. Ao invés de considerar $\mathbf{L_U.l_{TU}}$ e $\mathbf{L_V.l_{TV}}$ como duas listas independentes, elas devem ser entendidas como as raízes de duas **Árvores** ($\mathbf{T_U.l_{TU}}$ e $\mathbf{T_V.l_{TV}}$), com cinco ramificações de listas de linhas cada (totalizando dez listas mais duas listas raízes). Isso significa que as operações aplicadas sobre as raízes se repetem para as ramificações, resultando em duas árvores finais, $\mathbf{T_U.lf_{TU}}$ e $\mathbf{T_V.lf_{TV}}$.

Essas ramificações são geradas a partir de combinações de deslocamentos aplicados sobre as linhas em $\mathbf{L_U.l_{TU}}$ e $\mathbf{L_V.l_{TV}}$. Para entender essas isso, é necessário resgatar os vetores que definem os Eixos de Rotação (**N_ar**) e ainda extrair outros dois conjuntos de vetores que dependem do tipo e grau de curvatura da superfície de entrada (**G**). Um é referente aos vetores que compõem os Eixos de Inclinação dos Nexors (**N_ai**), que são perpendiculares e coplanares aos Eixos da Malha (**M_a**), localizados nos planos definidos pelos Vetores Normais da malha com origem no ponto médio do nexor (**N_pC**). O outro conjunto é formado pelos vetores que constroem os Eixos Pendulares dos Nexors (**N_ap**) que são definidos pelos próprios Eixos das Malhas (**M_a**) e são coplanares a **N_ai**, com origem em **N_pC**, conforme ilustrado na Figura 50. Além das operações realizadas a seguir, esses dois novos eixos também serão utilizados para extrair os Ângulos de Inclinação (**N_β**) e Pendulares (**N_θ**) que são fundamentais na explicação da geometria das conexões.

Figura 50: Exemplo de como são dispostos os eixos de rotação, de inclinação e pendular dos nexors, apresentando os respectivos ângulos associados, tendo como base o eixo da malha e o eixo do nexor.



Fonte: elaborado pelo autor, 2021

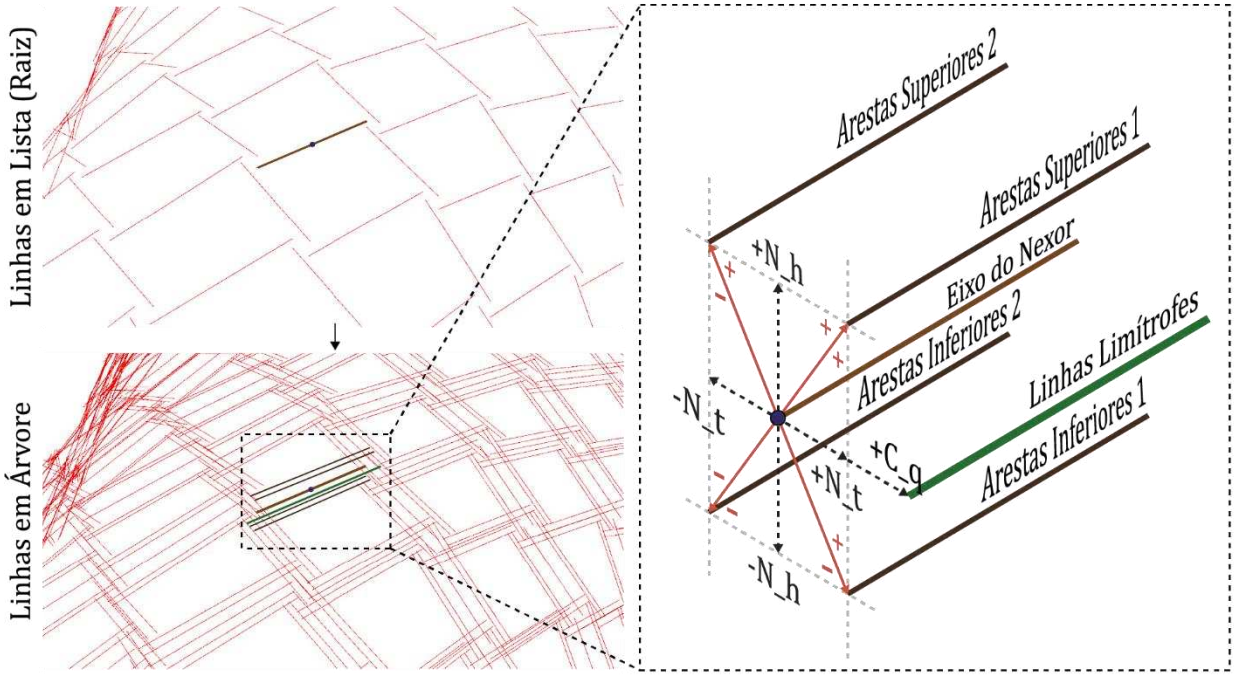
Com base na direção do Eixo de Inclinação (**N_ai**), as linhas em $\mathbf{L_U.l_{TU}}$ e $\mathbf{L_V.l_{TV}}$ são transladadas em dois sentidos opostos (para facilitar as explicações, os sentidos serão indicados como positivos e negativos), cada um com valor de metade da Espessura da Seção Transversal dos Nexors (**N_t**). Em seguida, outras duas translações são aplicadas sobre as linhas já transladadas, com base em duas direções opostas definidas pelo Eixo de Rotação (**N_ar**), com valor de metade da Altura da Seção Transversal dos Nexors (**N_h**). O resultado dessas operações são quatro listas de linhas em cada uma das árvores, que são a base para as arestas superiores (sigla **lt**) e inferiores (sigla **lb**). Ao mesmo tempo, são definidas linhas que determinam a região limítrofe das conexões (sigla **lq**), geradas a partir da translação de $\mathbf{L_U.l_{TU}}$ e $\mathbf{L_V.l_{TV}}$ na direção definida pelos Eixos de Inclinação (**N_ai**) e com o sentido correspondente ao afastamento em relação aos pontos de intersecção entre **M_a** (chamados de Pontos Centrais das Conexões ou **C_pc**). O valor é correspondente a metade Espessura da Seção Transversal dos Nexors (**N_t**) somada ao valor do Comprimento das Paredes das Conexões (**C_q**). Assim, são definidas as ramificações das árvores, conforme a Tabela 7, e ilustradas na Figura 51.

Tabela 7: Sentido das Translações para geração das ramificações da árvore de dados e elementos geométricos relacionados com cada lista

Sentido da Translação	**Ramificações Resultantes**		
	$T_U.l_{TU}$	**$T_V.l_{TV}$**	**Relação com os Elementos**
$+N_t ; +N_h$	**$L_U.lt_1_{TU}$**	**$L_V.lt_1_{TV}$**	Arestas Superiores 1
$-N_t ; +N_h$	**$L_U.lb_1_{TU}$**	**$L_V.lb_1_{TV}$**	Arestas Inferiores 1
$+N_t ; -N_h$	**$L_U.lt_2_{TU}$**	**$L_V.lt_2_{TV}$**	Arestas Superiores 2
$-N_t ; -N_h$	**$L_U.lb_2_{TU}$**	**$L_V.lb_2_{TV}$**	Arestas Inferiores 2
$+N_t ; +C_q$	**$L_U.lq_{TU}$**	**$L_V.lq_{TV}$**	Linhas Limítrofes

Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Figura 51: Exemplo de transformação das linhas que representam os eixos dos nexors em ramificações que compõem as arestas superiores, inferiores e as linhas limítrofes. A diferença entre as raízes e as ramificações pode ser vista à esquerda. À direita é apresentado um corte esquemático, em perspectiva, da seção transversal do nexor, destacando cada um dos elementos.



Fonte: elaborado pelo autor, 2022

Contudo, são necessários pequenos ajustes no processo de intersecção entre linhas e planos das ramificações. Isso é devido ao fato de que as extremidades das arestas superiores e inferiores

não são mais delimitadas de acordo com o plano coincidente ao eixo dos nexors, mas sim com os planos coincidentes às próprias arestas. A partir disso, são necessárias duas considerações importantes: a) Os planos coincidentes às arestas superiores 1 e inferiores 1 são coplanares e coincidentes entre si, assim como os planos das arestas superiores 2 e inferiores 2 e; b) Os ajustes são feitos apenas nas combinações, sem implicar em novas operações. Dessa forma, as intersecções são mantidas em termos de índices, mas a especificação dos planos e linhas é diferente. Por exemplo, as linhas na direção U e com índice AU ainda tem seu limite definido pela intersecção com os planos na direção V e com índice BV, contudo, as linhas contidas nas listas de numeração 1 e 2 fazem intersecção somente com o plano de numeração 1, nesse caso. Seguindo a mesma lógica das operações aplicadas sobre as raízes, as operações para a realização das intersecções entre as linhas e planos contidos nas ramificações resultam nos pontos que definem as dimensões exatas de toda as arestas dos nexors, conforme as fórmulas da equação 23. Esse processo é ilustrado, de forma simplificada, nas Figuras 52a – 52d.

$$\mathbf{T_U.l_{AU} \cap T_V.w_{BV} = \{T_U.pi_{AU}\}}$$

$$\mathbf{T_U.l_{BU} \cap T_V.w_{AV} = \{T_U.pi_{BU}\}}$$

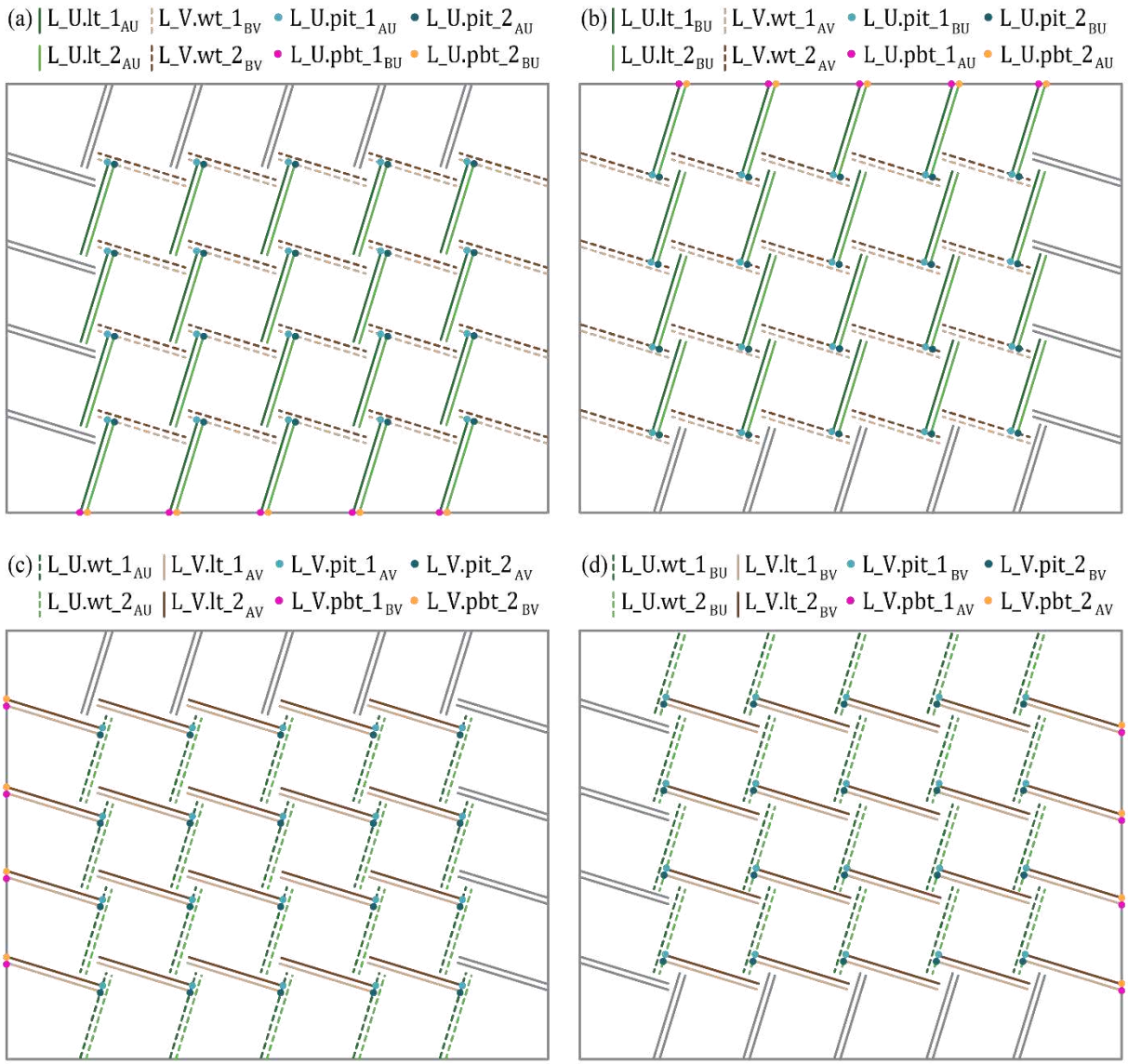
$$\mathbf{T_V.l_{AV} \cap T_U.w_{AU} = \{T_V.pi_{AV}\}} \qquad \text{(eq. 23)}$$

$$\mathbf{T_V.l_{BV} \cap T_U.w_{BU} = \{T_V.pi_{BV}\}}$$

Sendo as combinações específicas entre as ramificações:

$$\mathbf{L_U.lt_1_{AU} \cap L_V.wt_1_{BV} = \{L_U.pit_1_{AU}\}} \qquad \mathbf{L_U.lb_1_{AU} \cap L_V.wb_1_{BV} = \{L_U.pib_1_{AU}\}}$$
$$\mathbf{L_U.lt_2_{AU} \cap L_V.wt_1_{BV} = \{L_U.pit_2_{AU}\}} \qquad \mathbf{L_U.lb_2_{AU} \cap L_V.wb_1_{BV} = \{L_U.pib_2_{AU}\}}$$
$$\mathbf{L_U.lt_1_{BU} \cap L_V.wt_2_{AV} = \{L_U.pit_1_{BU}\}} \qquad \mathbf{L_U.lb_1_{BU} \cap L_V.wb_2_{AV} = \{L_U.pib_1_{BU}\}}$$
$$\mathbf{L_U.lt_2_{BU} \cap L_V.wt_2_{AV} = \{L_U.pit_2_{BU}\}} \qquad \mathbf{L_U.lb_2_{BU} \cap L_V.wb_2_{AV} = \{L_U.pib_2_{BU}\}}$$
$$\mathbf{L_V.lt_1_{AV} \cap L_U.wt_1_{AU} = \{L_V.pit_1_{AV}\}} \qquad \mathbf{L_V.lb_1_{AV} \cap L_U.wb_1_{AU} = \{L_V.pib_1_{AV}\}}$$
$$\mathbf{L_V.lt_2_{AV} \cap L_U.wt_1_{AU} = \{L_V.pit_2_{AV}\}} \qquad \mathbf{L_V.lb_2_{AV} \cap L_U.wb_1_{AU} = \{L_V.pib_2_{AV}\}}$$
$$\mathbf{L_V.lt_1_{BV} \cap L_U.wt_2_{BU} = \{L_V.pit_1_{BV}\}} \qquad \mathbf{L_V.lb_1_{BV} \cap L_U.wb_2_{BU} = \{L_V.pib_1_{BV}\}}$$
$$\mathbf{L_V.lt_2_{BV} \cap L_U.wt_2_{BU} = \{L_V.pit_2_{BV}\}} \qquad \mathbf{L_V.lb_2_{BV} \cap L_U.wb_2_{BU} = \{L_V.pib_2_{BV}\}}$$

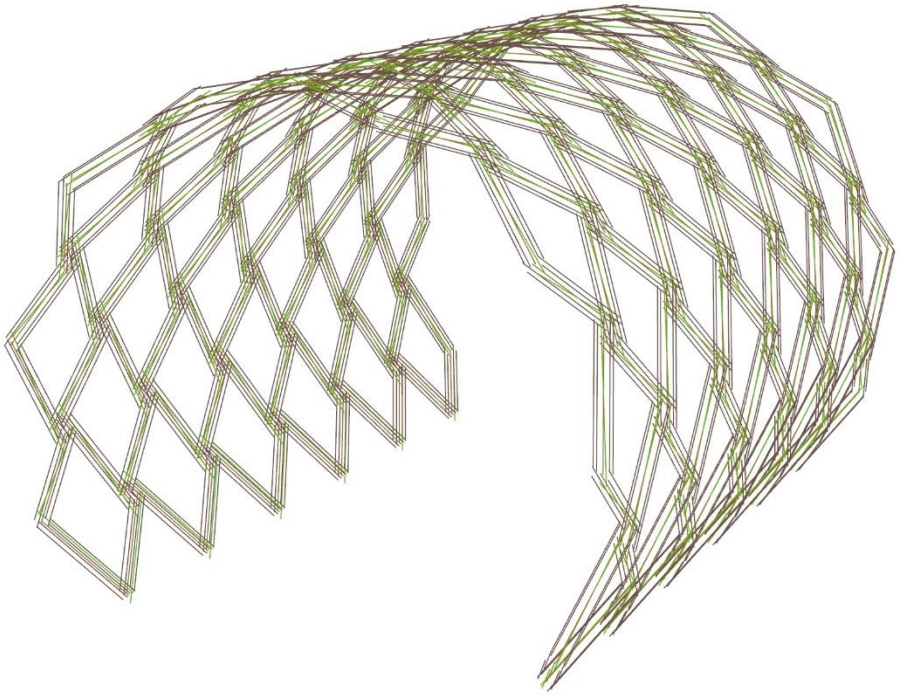
Figura 52: Exemplo de como as linhas e planos estão relacionados dentro das ramificações, usando as linhas das arestas superiores como exemplo.



Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Com os ajustes feitos, as ramificações passam pela mesma sequência de operações das suas respectivas raízes, o que resulta nas árvores $\mathbf{T_U.lf_{TU}}$ e $\mathbf{T_V.lf_{TV}}$, (Figura 53) tendo como raízes $\mathbf{L_U.lf_{TU}}$ e $\mathbf{L_V.lf_{TV}}$ e as respectivas ramificações $\mathbf{L_U.lft_1_{TU}}$, $\mathbf{L_V.lft_1_{TV}}$, $\mathbf{L_U.lft_2_{TU}}$, $\mathbf{L_V.lft_2_{TV}}$, $\mathbf{L_U.lfb_1_{TU}}$, $\mathbf{L_V.lfb_1_{TV}}$, $\mathbf{L_U.lfb_2_{TU}}$, $\mathbf{L_V.lfb_2_{TV}}$, $\mathbf{L_U.lfq_{TU}}$ e $\mathbf{L_V.lfq_{TV}}$. Em seguida, é determinada uma trifurcação no algoritmo, na qual ramificações específicas são utilizadas em uma série de operações que produzem as três principais saídas do algoritmo: a) **Modelos** de barras; b) **Modelos** tridimensionais dos nexors e; c) **Modelos** tridimensionais das conexões.

Figura 53: Exemplo das linhas contidas nas árvores $\mathbf{T_U.lf_{TU}}$ e $\mathbf{T_V.lf_{TV}}$ que compõem uma ER. Cada um dos elementos é utilizado para a obtenção das três principais saídas do algoritmo.



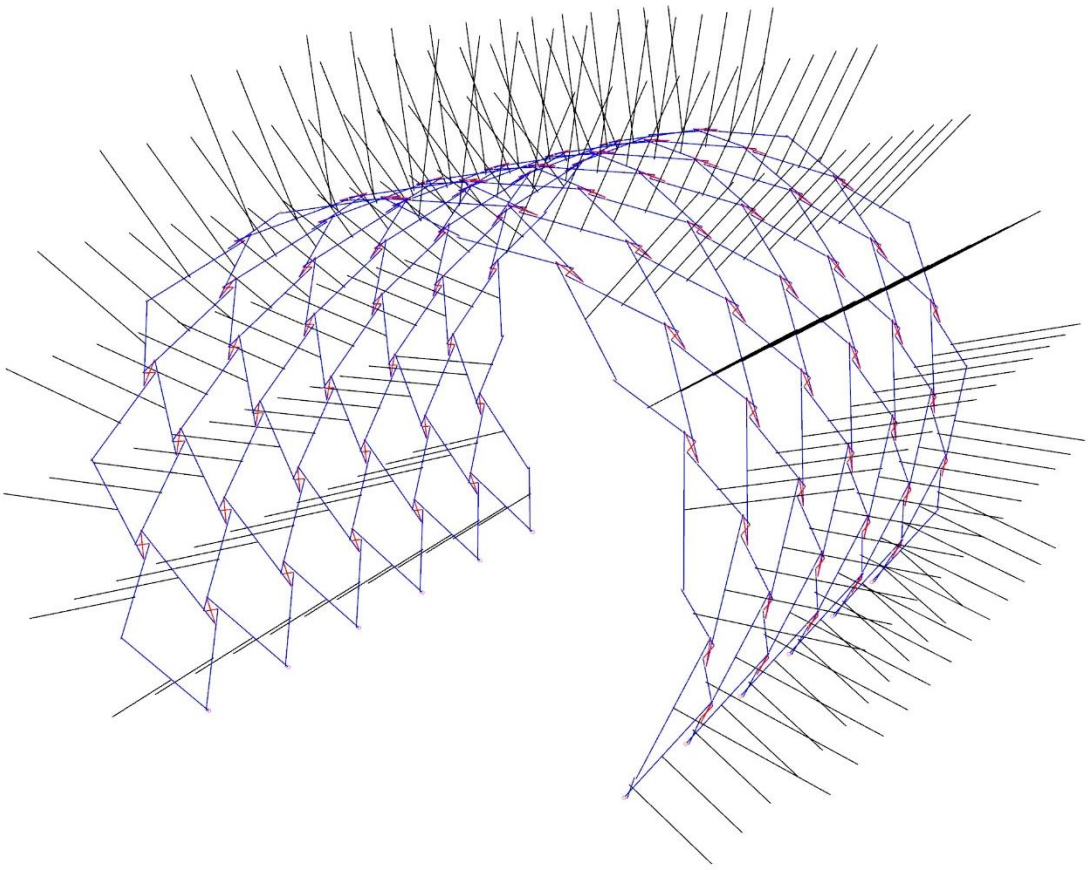
Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

7.2.6. Saída A: Geração de modelos de barras

Uma das três saídas do algoritmo é definida como o conjunto de informações geométricas utilizado para a construção de **Modelos** de barras (ou arranjos lineares) que servem de base para a realização de simulações estruturais e análises pelo Método dos Elementos Finitos (MEF). Assim, a explicação desta saída se concentra nos dados utilizados para alimentar o motor de processamento do plug-in Karamba3D, para Grasshopper, conforme exemplo da Figura 54.

De modo geral, essa saída pode ser dividida em duas partes. Uma é composta pelas variáveis numéricas e vetoriais que definem as seções transversais dos nexors: os valores que definem a altura (**N_h**) e a espessura (**N_t**) juntamente com a orientação da geometria, dada pelo vetor correspondente aos eixos de rotação (**N_ar**). Já a configuração global da ER e o comprimento de cada nexor são obtidos a partir das linhas que representam os eixos dos nexors (listas $\mathbf{L_U.lf_{TU}}$ e $\mathbf{L_V.lf_{TV}}$).

Figura 54: Exemplo de um modelo de linhas gerado pelo algoritmo, utilizado como entrada para as simulações estruturais.



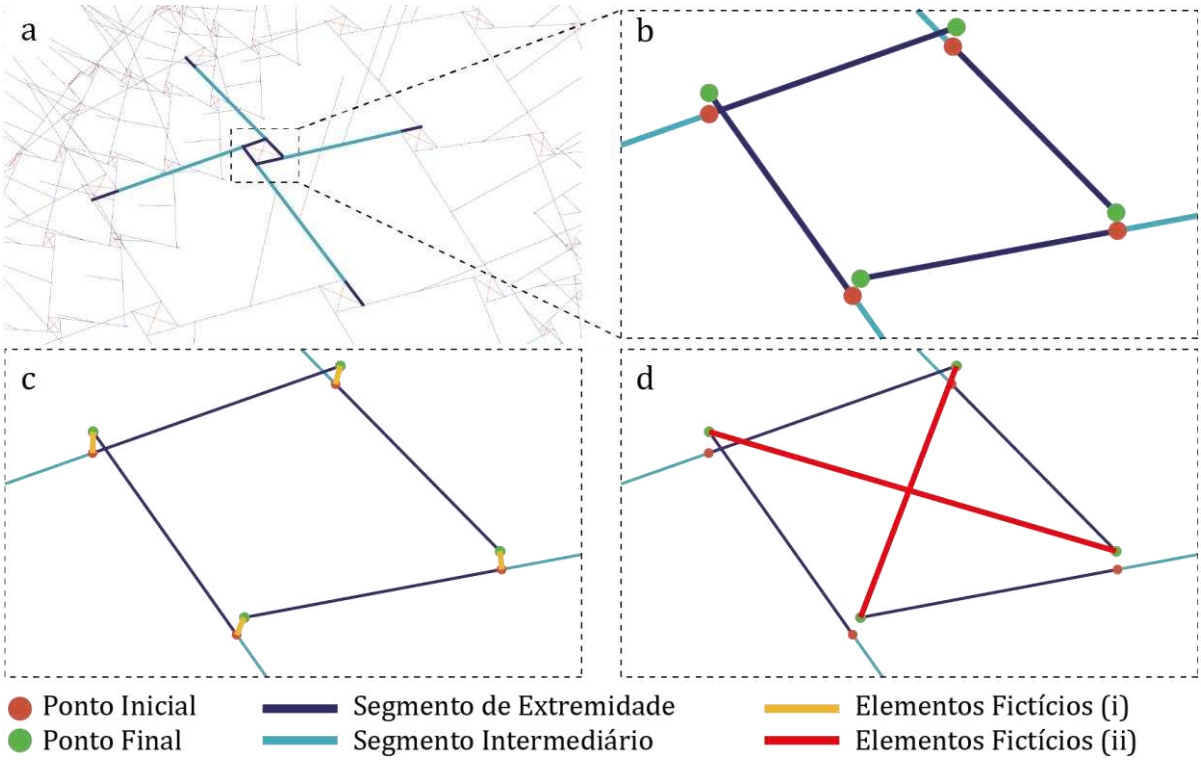
Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

A outra parte está intrinsecamente relacionada com a adoção de uma estratégia de modelagem que permitisse a simplificação do comportamento tridimensional das conexões em um modelo linear representativo composto por barras fictícias. Contudo, as explicações e motivações dessa estratégia só são coerentes conforme o aprofundamento das explicações acerca dos **Modelos** estruturais. Ao mesmo tempo, as linhas que representam essas barras fictícias são obtidas automaticamente pelo mesmo algoritmo, ou, em outras palavras, são produtos pertencentes à esta saída. Portanto, os processos apresentados a seguir explicam a forma de geração dessas linhas, enquanto sua utilização para as simulações estruturais é detalhada somente na subseção 7.3.2. **Modelos** Estruturais.

Cada linha contida nas listas $\mathbf{L_U.lf_{TU}}$ e $\mathbf{L_V.lf_{TV}}$ foi dividida em três partes: um segmento intermediário, correspondente à dimensão entre leques, e outros dois segmentos de extremidades, relacionados com as dimensões de trabalho de dois leques distintos (Figura 55a). Cada um desses segmentos é definido por uma linha que conecta um ponto inicial a um ponto

final, logo, um único leque não é apenas formado por quatro segmentos de extremidade de quatro nexors distintos, mas também por oito pontos únicos (quatro em cada direção, dois iniciais e dois finais) (Figura 55b). Esses pontos são utilizados para a criação das linhas referentes aos elementos fictícios que representam as conexões de duas formas: i) quatro linhas diferentes que conectam o ponto inicial de um segmento em uma direção ao ponto final do segmento adjacente que está em outro sentido (Figura 55c) e; ii) duas outras linhas que conectam os pontos finais de segmentos distintos, mas que estão em uma mesma direção (Figura 55d).

Figura 55: Linhas que representam as conexões em um modelo de barras. (a) Foco em um leque qualquer do modelo da Figura 54 com a distinção dos três segmentos de um nexor; (b) Pontos iniciais e finais dos segmentos de um leque que integram a região de uma única conexão; (c) Elementos fictícios conectando todas as direções e; (d) Elementos fictícios conectando uma mesma direção.



Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

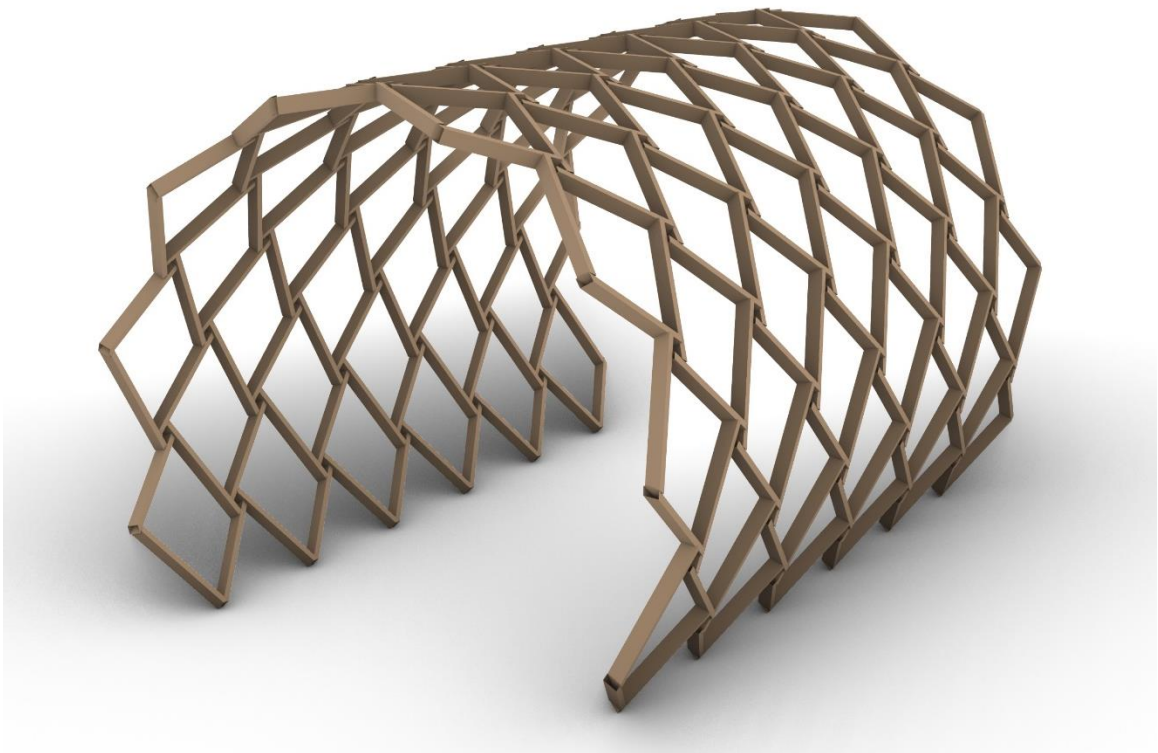
7.2.7. Saída B: Geração das geometrias dos nexors

Paralelamente, outra saída do algoritmo é definida como o conjunto de geometrias BReps dos nexors. Essa saída é obtida a partir de algumas operações aplicadas sobre as ramificações $\mathbf{L_U.lft_1_{TU}}$, $\mathbf{L_V.lft_1_{TV}}$, $\mathbf{L_U.lft_2_{TU}}$, $\mathbf{L_V.lft_2_{TV}}$, $\mathbf{L_U.lfb_1_{TU}}$, $\mathbf{L_V.lfb_1_{TV}}$, $\mathbf{L_U.lfb_2_{TU}}$ e $\mathbf{L_V.lfb_2_{TV}}$. Uma vez que as linhas contidas nessas listas representam as

arestas do nexor no sentido do eixo longitudinal, os pontos que delimitam o início e o fim de cada linha também são considerados como os vértices das faces mais externas das seções transversais. Dessa forma, ao conectar os pontos de uma extremidade entre si, de forma que nenhuma linha cruze o eixo longitudinal, são obtidas quatro linhas que representam as arestas da seção transversal em cada uma das extremidades do nexors.

Como resultado da geração dessas novas arestas, cada nexor passa a ser constituído por um conjunto de doze linhas e oito vértices, sendo que cada vértice é compartilhado por três linhas distintas. A partir disso, conjuntos de quatro linhas são utilizados para definir um total de seis superfícies diferentes, que então são unidas e passam a constituir as BReps dos nexors (Figura 56), dispostas nas listas $\mathbf{L_U.N_{TU}}$ e $\mathbf{L_V.N_{TV}}$. As geometrias contidas nessas listas são utilizadas nos processos de: a) geração de **Modelos** para análises geométricas; b) geração das geometrias virtuais das conexões e; c) fabricação e montagem.

Figura 56: Exemplo de um modelo de nexors em BReps, utilizado para análises geométricas, para geração das conexões e para os processos de fabricação e montagem.



Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

7.2.8. Saída C: Geração das geometrias das conexões

A terceira saída do algoritmo é referente à geração automática das geometrias das conexões desenvolvidas nesta tese. Nesse sentido, as explicações apresentadas a seguir são concentradas nas operações algorítmicas utilizadas para a geração da versão mais recente das conexões. Contudo, é importante mencionar que essa versão foi obtida por meio de um processo iterativo, alimentado pelo aprendizado obtido pela criação de **Modelos** físicos e virtuais. As informações adquiridas a partir de **Modelos** e protótipos, bem como a evolução da ideia inicial para essa versão, estão contidas na Seção 7.3. Além disso, o texto a seguir contém informações diretamente relacionadas com o pedido de patente (protocolo presente no Apêndice V). Pequenas alterações em siglas ou descrições podem estar presentes, uma vez que a tese contém diversas explicações prévias que não fazem sentido dentro do contexto de uma patente.

De modo geral, é importante explicar alguns aspectos das conexões desenvolvidas: cada conexão é composta por uma Peça Superior (**C_Gt**) e outra Inferior (**C_Gb**), e a geometria base é dada por um polígono de número de lados igual ao número de nexors que estão sendo conectados. O valor da espessura (**C_t**) e dos comprimentos (**C_l**) são variáveis, conforme o arranjo geométrico global e aspectos estruturais da ER. Cada peça possui, na face voltada para o interior do leque, entalhes que correspondem à geometria negativa do nexor que está sendo conectado. No centro de cada peça, há um furo de diâmetro variável (**C_d**), que é feito com o propósito de passar uma barra que irá comprimir e travar o sistema inteiro.

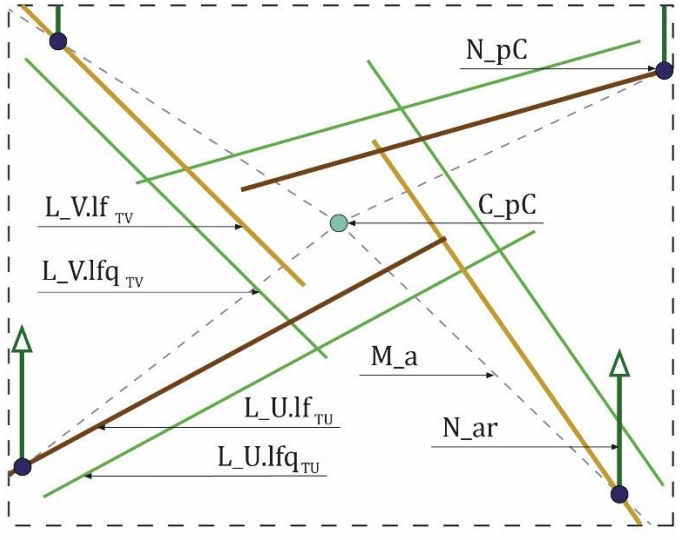
Dentre os valores variáveis mencionados, há duas restrições importantes: a) o valor de **C_t** (mais especificamente o valor da espessura de entalhe, isto é, **C_f**) não pode ser maior do que metade do valor da altura da seção transversal dos nexors (**N_h**); b) o valor de **C_l** deve ser menor do que um terço do comprimento total do nexor (**N_l**) correspondente à aquela parte da conexão.

O **Método** algorítmico utilizado para a geração das conexões é descrito no Quadro 3:

Quadro 3: Descrição do **Método** algorítmico utilizado para a geração automatizada das conexões desenvolvidas nesta tese. A apresentação das informações é acompanhada de figuras que ilustram o processo, utilizando um leque composto por quatro nexors diferentes como exemplo.

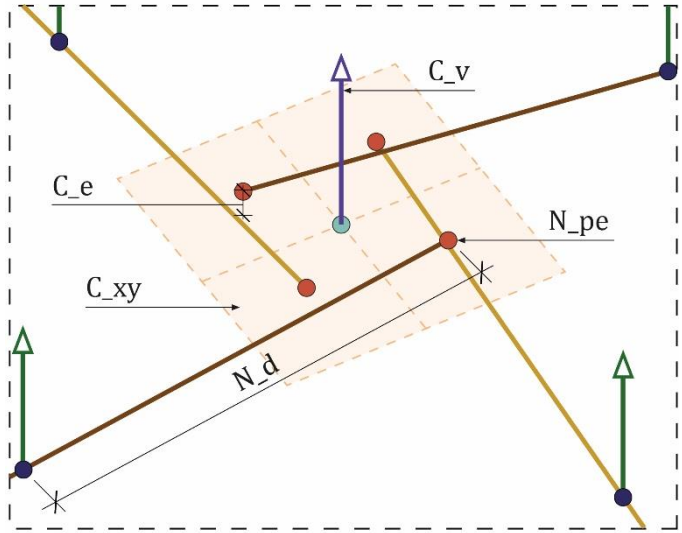
1) Variáveis do algoritmo que são utilizadas como entrada para gerar o elemento de conexão de um leque

a) Os pontos de intersecção dos eixos da malha, que são coincidentes com os Pontos Centrais das Conexões (**C_pC**);
b) Os Pontos Centrais dos Nexors (**N_pC**);
c) As linhas que definem a região limítrofe das conexões, dispostas nas listas **L_U.lfq$_{TU}$** e **L_V.lfq$_{TV}$**;
d) As linhas que definem os eixos dos nexors, contidas nas listas **L_U.lf$_{TU}$** e **L_V.lf$_{TV}$**;
e) Os vetores normais definidos pelos Eixos de Rotação (**N_ar**);
f) Valor da Espessura de Entalhe (**C_f**);
g) Valor da Espessura de Rigidez (**C_r**).



2) Propriedades definidas a partir das variáveis de entrada que influenciam aspectos gerais das conexões

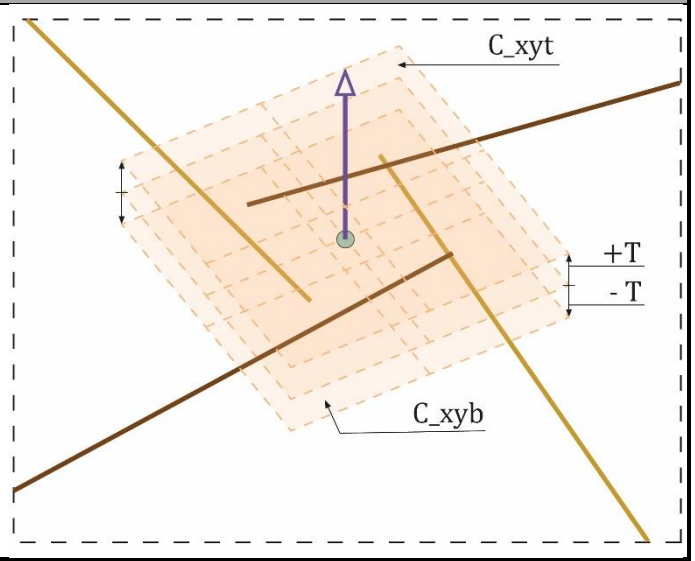
h) Cada linha que representa os eixos de nexors (**L_U.lf$_{TU}$** e **L_V.lf$_{TV}$**) é delimitada por dois pontos, cada um definido como um Ponto de Cálculo de Excentricidade do Nexor (**N_pe**) de um leque;
i) A distância entre **N_pe** e **N_pC** é definida como o Comprimento de Influência do Nexor (**N_d**);
j) A soma dos vetores normais, representados pelos Eixos de Rotação dos Nexors (**N_ar**), resulta no Vetor Normal das Conexões (**C_v**);
k) A combinação dos vetores **C_v** com os Pontos Centrais da Conexões (**C_pC**), como origem, definem os Planos Intermediários das Conexões (**C_xy**);
l) Em um único leque, as distâncias estabelecidas entre o plano **C_xy** e os pontos **N_pe**, orientados pelo vetor **C_v**, são definidas como os Valores de Excentricidade entre Nexor e Conexão (**C_e**).



3) Geração dos Planos de Orientação das Peças Superior e Inferior

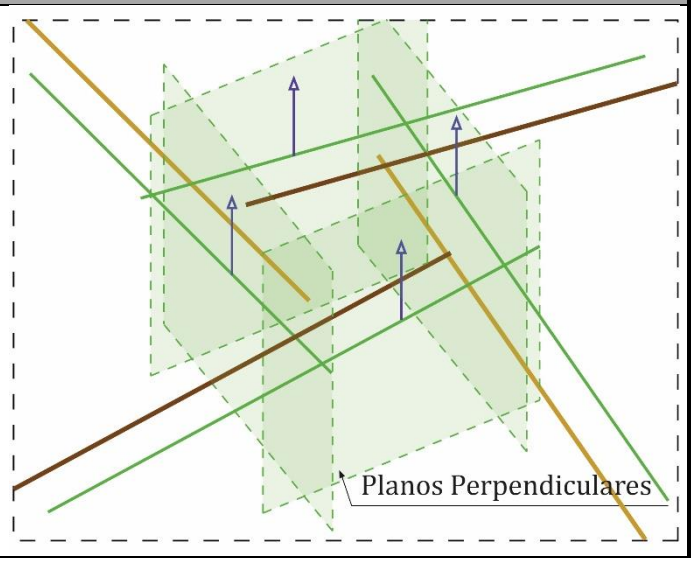
Para a geração dos Planos de Orientação das Peças Superior (**C_xyt**) e Inferior (**C_xyb**), os Planos Intermediários das Conexões (**C_xy**) sofrem duas translações ($\pm$**T**): uma no sentido positivo do Vetor Normal das Conexões (**C_v**) e outra no sentido negativo. O valor de cada uma dessas operações corresponde à metade da altura do nexor do leque (no caso de seções transversais com dimensões diferentes, utilizar o maior valor de **N_h**), subtraindo a soma do maior Valor de Excentricidade entre Nexor e Conexão do leque (**C_e**) com o valor da Espessura de Entalhe (**C_f**) (equação 24)

$$\mathbf{T} = \pm \overrightarrow{\mathbf{C_v}} * (\mathbf{N_h} * \mathbf{0,5} - (\mathbf{C_e} + \mathbf{C_f})) \qquad \text{(eq. 24)}$$



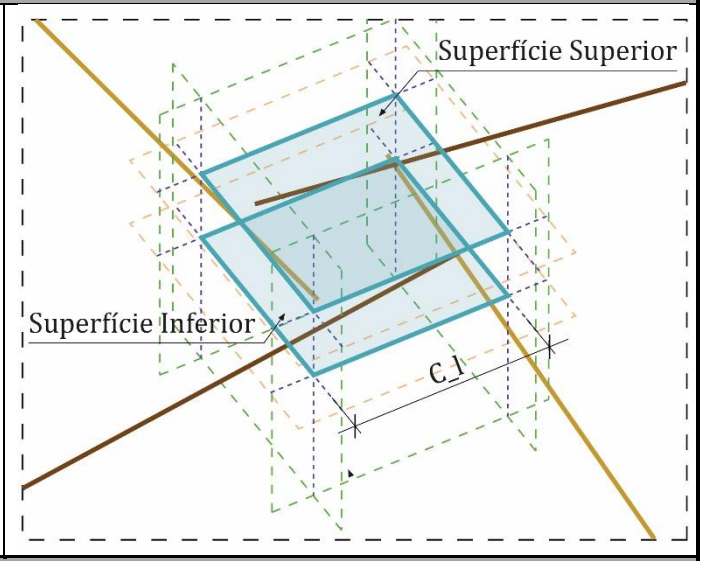
4) Geração de Planos Perpendiculares aos Planos de Orientação das Peças Superior e Inferior

Para a geração dos Planos Perpendiculares aos Planos de Orientação das Peças Superior (**C_xyt**) e Inferior (**C_xyb**), as linhas contidas em $\mathbf{L_U.lfq_{TU}}$ e $\mathbf{L_V.lfq_{TV}}$ são combinadas com o vetor Normal das Conexões (**C_v**) de um determinado leque. Os planos gerados apresentam duas características importantes: a) o número de planos gerados é correspondente ao número de nexors que estão contidos na região do leque e; b) os planos gerados são paralelos aos eixos dos nexors ($\mathbf{L_U.lf_{TU}}$ e $\mathbf{L_V.lf_{TV}}$).



5) Definição dos Limites das Geometrias das Peças Superior e Inferior

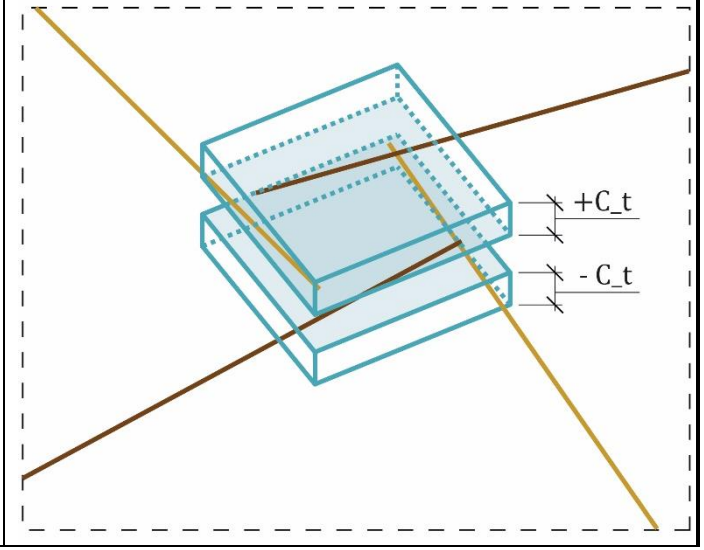
A delimitação dos perímetros das geometrias das Peças Superior e Inferior de um leque é dada pelas intersecções entre os Planos Perpendiculares com os Planos de Orientação das Peças Superior (**C_xyt**) e Inferior (**C_xyb**). Os resultados dessas operações serão duas superfícies poligonais distintas (superior e inferior), ambas com número de lados igual ao número de nexors pertencentes a determinado leque. O valor do comprimento de cada lado (**C_l**) é definido como resultado dessa etapa.



6) Definição da Espessura das Peças Superior e Inferior

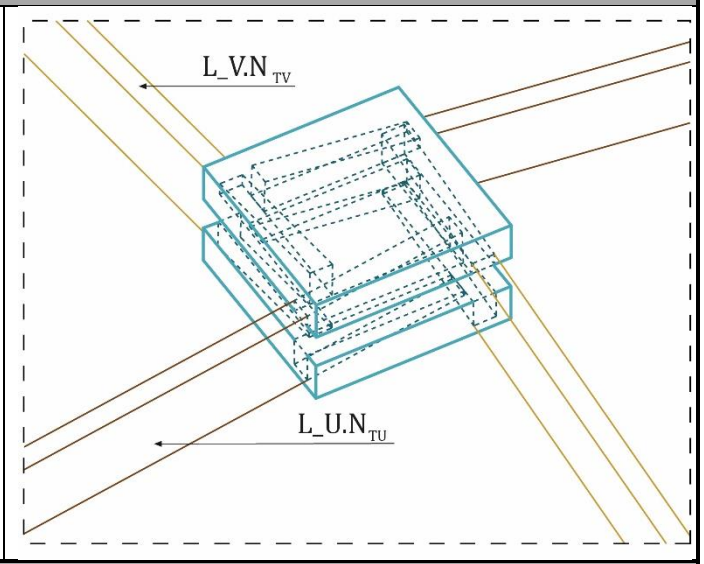
A geração dos sólidos tridimensionais que representam as Peças Superior e Inferior é feita a partir da extrusão das superfícies poligonais, cujo valor é dado pela Espessura da Conexão (**C_t**), resultante da soma entre a Espessura de Entalhe (**C_f**), a Espessura de Rigidez (**C_r**) e ao maior valor das Excentricidades entre Nexor e Conexão (**C_e**) (equação 25). A orientação da extrusão de cada superfície é definida pelo Vetor Normal das Conexões (**C_v**), seguindo o mesmo sentido do que foi utilizado na etapa 3.

$$\mathbf{C_t} = \mathbf{C_f} + \mathbf{C_r} + \mathbf{C_e} \qquad \text{(eq. 25)}$$



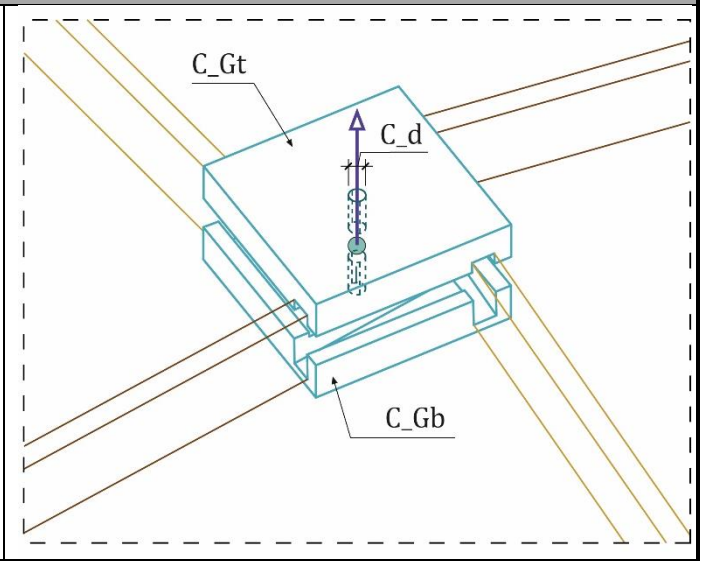
7) Definição da Geometria de Entalhe das Peças Superior e Inferior

As geometrias dos entalhes são definidas como as regiões tridimensionais negativas dadas pelas intersecções entre os sólidos tridimensionais das Peças Superior e Inferior com as BReps dos Nexors ($\mathbf{L_U.N_{TU}}$ e $\mathbf{L_V.N_{TV}}$) que fazem parte de determinado leque. Antes de realizar as intersecções, é somada à espessura dos nexors uma dimensão milimétrica que considera a dilatação higroscópica do material (**C_u**) e uma tolerância definida pela precisão do processo de fabricação (**F_p**). Paralelamente, é somado ao comprimento um valor correspondente ao raio da ferramenta (em geral, uma fresa) utilizada para o processo de usinagem (**F_d**).



8) Definição dos Furos para Passagem da Barra de Travamento

As Peças Superior e Inferior de cada conexão são conectadas utilizando uma barra que passa pelo centro de cada peça. Para determinar o posicionamento dos furos necessários, o Vetor Normal das Conexões (**C_v**) é combinado com o Ponto Central das Conexões (**C_pC**), definindo o eixo de orientação de passagem das Barras de Travamento. O valor do Diâmetro do Furo é definido pela variável de entrada (**C_d**). Esse processo resulta em duas BReps das Peças Superior e Inferior (**C_Gt** e **C_Gb**), com regiões de entalhe que servem para posicionamento e travamento dos nexors.

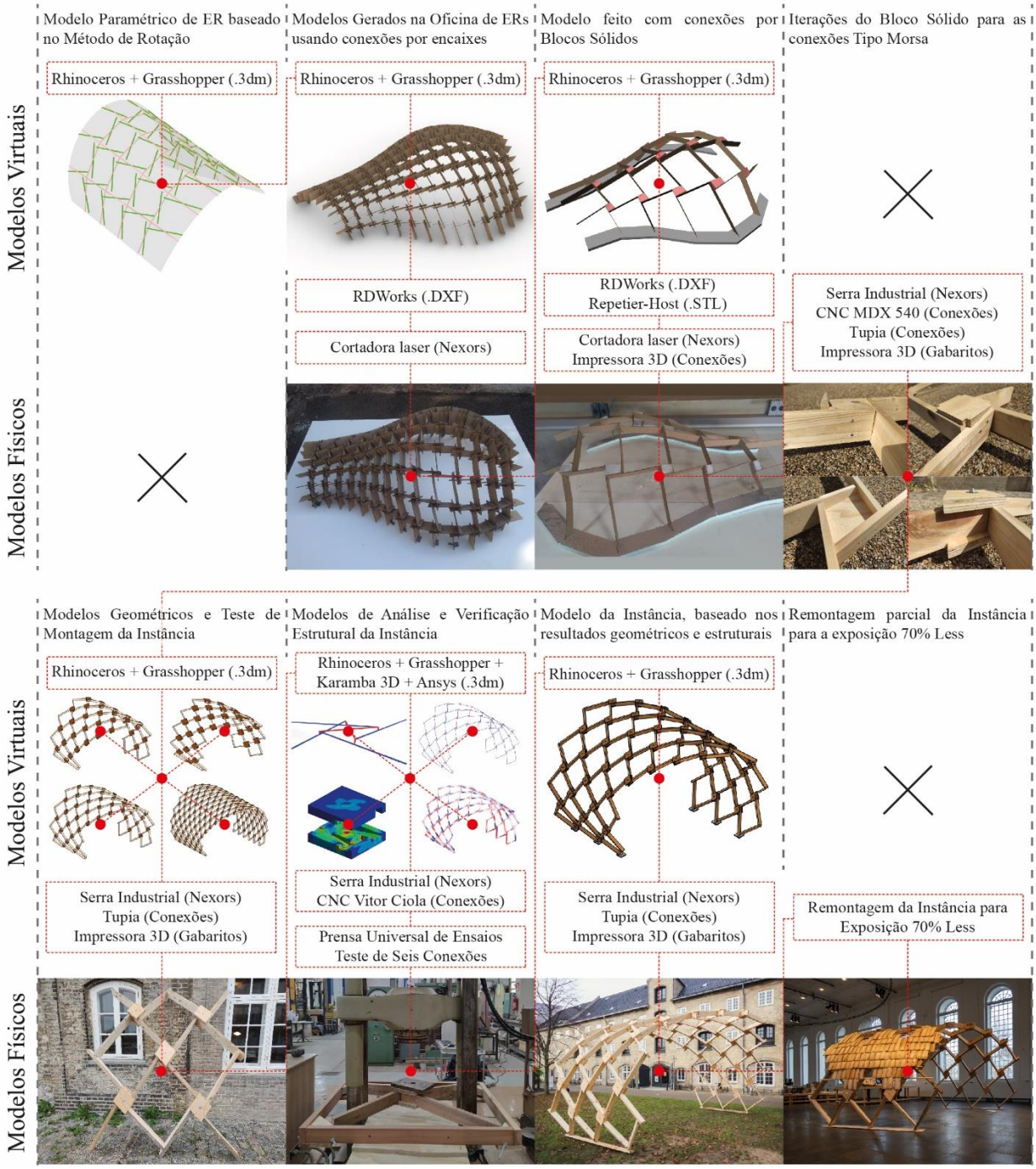


Fonte: todas as informações, inclusive as figuras, foram elaboradas pelo autor, 2022.

7.3. MODELOS: ASPECTOS GEOMÉTRICOS E ESTRUTURAIS

Nesta seção são apresentados os processos de concepção, desenvolvimento e, quando possível, fabricação dos **Modelos** que foram utilizados nesta tese. A evolução dos **Modelos** virtuais e físicos é apresentada na Figura 57.

Figura 57: Evolução dos **Modelos** físicos e virtuais desenvolvidos na pesquisa.



Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

A geração de uma coleção de **Modelos** foi fundamental em três aspectos principais da pesquisa: a) verificação do funcionamento e das limitações do algoritmo; b) concepção e aprimoramento da geometria das conexões e; c) compreensão do comportamento estrutural das ERs e das conexões.

Tanto a criação de um algoritmo como a de um novo sistema de conexões estão intrinsecamente ligadas ao conceito de inovação, que muitas vezes é caracterizado por processos não-lineares, iterativos e que podem ser aprimorados por meio de analogias e recombinação de conceitos já existentes (KUMAR, 2013; CASTRIOTTO *et al,* 2021). Dentre esses aspectos, a iteratividade é uma das razões que justificam a apresentação de resultados parciais ou totais de determinados **Modelos**, já que fundamentam alterações e implementações. Mais do que isso, a construção de modelos e protótipos é reconhecida como um mecanismo que incentiva o processo de inovação (VOLPATO, 2007; CASTRIOTTO *et al,* 2021). Por fim, pode-se entender que todos os **Modelos** apresentados a seguir contribuem com a construção da narrativa e da explicação do desenvolvimento do próprio algoritmo.

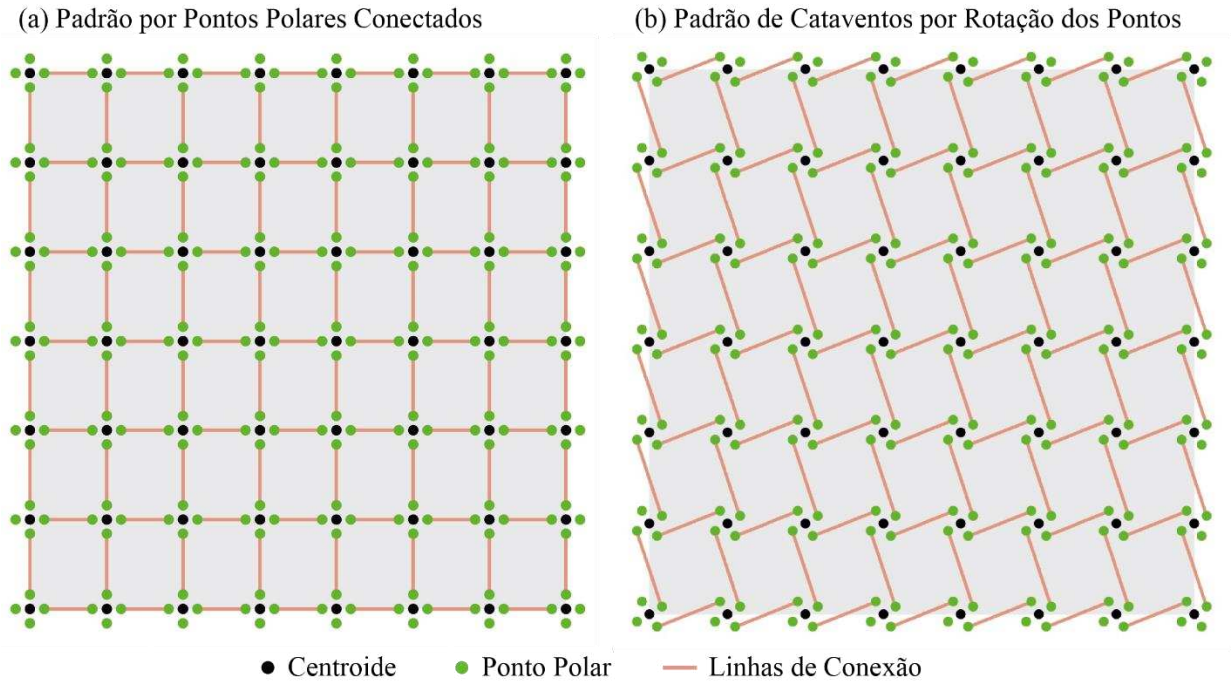
7.3.1. Série 1: Modelagem do padrão em catavento

Após a RSL e a compreensão acerca da dificuldade em gerar ERs de forma automatizada, mesmo com a existência de alguns algoritmos pré-existentes, o primeiro passo era compreender quais mecanismos poderiam ser utilizados para criar um algoritmo que permitisse elevada adaptabilidade e aplicação em um grande número de superfícies de forma-livre distintas. Por isso, ao invés de considerar a complexidade envolta de um arranjo de ER global, o foco inicial foi dado em uma escala mais reduzida, na parte, no detalhe, ao invés do todo. O objetivo era de entender como poderiam ser modeladas algumas das relações geométricas fundamentais dessas estruturas.

Tendo como base o arcabouço teórico relacionado com os grupos de Papel de parede e a possível relação com os padrões de cataventos, os primeiros **Modelos** gerados exploraram como um padrão desses poderia ser gerado em um ponto qualquer em uma superfície. Para isso, a superfície foi povoada com pontos, de forma padronizada, de maneira que todos tivessem uma distância similar entre si. Eles foram utilizados como centroide para a geração de outros quatro pontos a partir de coordenadas polares, em períodos de 90 graus e uma distância fixa. Esses novos pontos foram conectados por linhas, assumindo o padrão apresentado na Figura 58a. A

partir disso, os pontos foram rotacionados ao redor do centroide, gerando as configurações em catavento (Figura 58b).

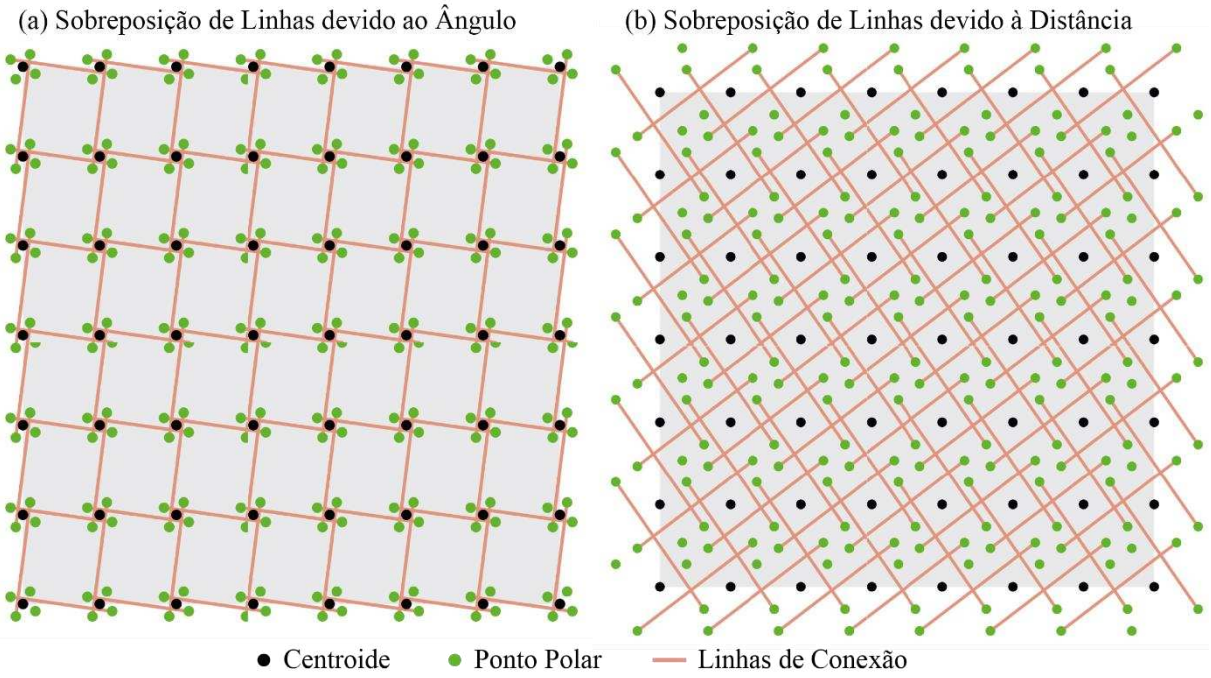
Figura 58: Construção do Padrão de Cataventos a Partir de Pontos Polares: (a) demonstra o padrão formado a partir pela conexão dos pontos e (b) apresenta o padrão de cataventos gerado a partir da rotação dos pontos.



Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Contudo, a abordagem adotada para gerar este modelo continha limitações substanciais para ser aplicado em diversas superfícies complexas. O principal obstáculo estava relacionado com a complexa relação estabelecida entre a (i) distância entre pontos conectados, (ii) o posicionamento desses pontos na malha e (iii) a distância dos pontos polares com relação ao centroide. Em um sistema algorítmico adaptativo, os valores para cada um desses três aspectos são altamente variáveis, o que dificulta a criação de uma regra universal que funcione em qualquer situação. Como consequência, os **Modelos** gerados apresentavam leques distorcidos ou erros em situações diversas. Por exemplo, em uma mesma superfície regular, a sobreposição entre as linhas ocorria pela variação do ângulo de rotação (Figura 59a) ou quando a distância entre pontos conectados era menor do que a distância entre o centroide e os pontos polares (Figura 59b). Nestes casos, as operações geométricas subsequentes deveriam ser diferentes de quando não havia nenhum tipo de sobreposição, o que significava, em última instância, um número ainda maior de variáveis.

Figura 59: Dois tipos de erros gerados pela abordagem de rotação por pontos polares. Em (a) o valor do ângulo de rotação implica na sobreposição de linhas, enquanto em (b) a sobreposição é causada pela distância dos pontos polares com relação ao centroide.



Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

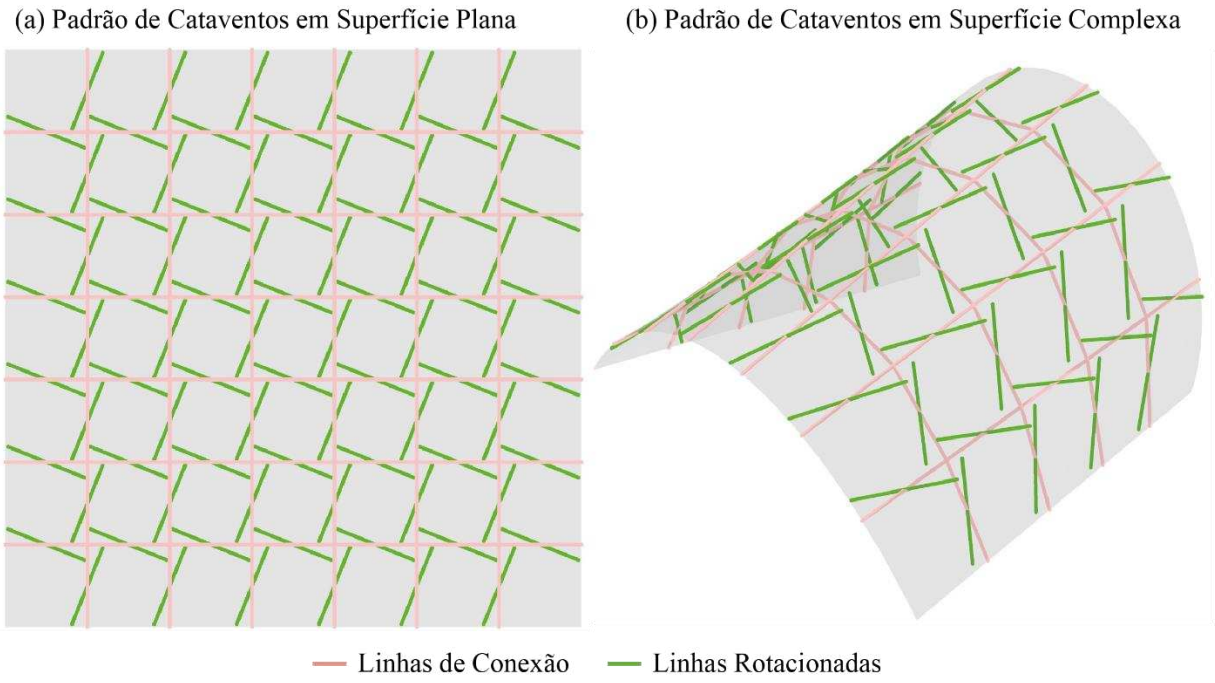
Apesar das limitações mencionadas, o princípio de rotacionar elementos para a geração de padrões de Cataventos era promissor. Para prosseguir com o desenvolvimento, estava explícita a necessidade de implementar restrições com relação às distâncias ou aos ângulos de rotação.

Uma alternativa possível era de primeiro conectar os centroides, em seguida, rotacionar as linhas, utilizando um eixo posicionado no centro de cada linha como eixo de rotação. Como a conexão dos centroides resultava num arranjo ordenado de linhas conformando uma malha, ficou claro que, ao invés de iniciar o processo a partir de pontos em uma superfície, seria mais prático transformar a superfície em uma quad-malha. Com isso, o ângulo de rotação se torna a principal variável para compor os padrões de Cataventos, enquanto o comprimento das linhas permanece estático após a rotação e a geometria dos leques se torna um resultado da combinação dessas duas variáveis.

Em outras palavras, ao comparar os **Modelos** Geométricos desta Série, é perceptível que a nova abordagem implicou em um menor controle sobre a geometria específica do leque, uma vez que a distância do centroide não é mais uma variável de entrada. Por outro lado, isso também

significou um maior controle sobre o resultado final, já que a complexidade geral de modelagem é simplificada, ao passo que a geometria do leque se torna parte do resultado do processo de aplicação e adaptação dos padrões de Cataventos em diferentes superfícies (Figura 60a e 60b).

Figura 60: Exemplos de aplicação do padrão de cataventos em (a) uma superfície plana e (b) uma superfície curva, utilizando o método de rotação sobre linhas.



Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

7.3.2. Série 2: Oficina prática com alunos de arquitetura

Desde os primeiros estágios de desenvolvimento do algoritmo, uma das principais dificuldades era compreender o nível de adaptabilidade que poderia ser alcançado, e quais restrições deveriam ser impostas para o pleno funcionamento. Com o objetivo de testar e demonstrar alguns dos aspectos do algoritmo, ainda nas fases iniciais de desenvolvimento, foram gerados **Modelos** durante uma oficina prática, com a participação de alunos de ensino superior.

7.3.2.1. Oficina para construção de ERs em escala reduzida

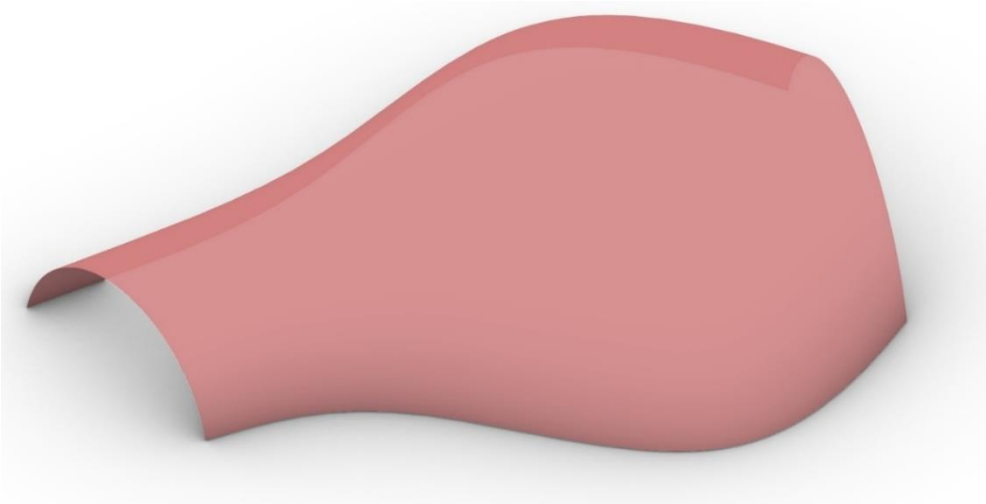
Durante o primeiro semestre de 2019, foi oferecida uma oficina para o desenvolvimento de ERs, como parte da disciplina eletiva conjunta entre graduação (AU 254 – Tópicos em Arquitetura e Urbanismo XVI) e pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura

e Urbanismo (FECFAU) da Unicamp. Como essa etapa envolveu a atividade de outros seres humanos, o projeto foi aprovado pelo CEP-CHS, com CAAE #17484819.8.0000.8142.

O objetivo da disciplina foi, de modo geral, a concepção de pavilhões que iriam suprir certas demandas da Unicamp. Como os nomes das disciplinas sugerem, os projetos desenvolvidos deveriam focar em questões de sustentabilidade e conforto ambiental, tendo como um objetivo mais amplo o incentivo à ativação do espaço urbano. Paralelamente, uma das premissas era de que as estruturas fossem construídas em madeira, o que acabou justificando, ainda mais, a oficina de teste e aplicação do algoritmo de ERs.

A disciplina contou com a presença de 28 alunos, que se dividiram em seis grupos (quatro com cinco alunos e dois com quatro alunos) e iniciaram o desenvolvimento do projeto com a coleta de dados sobre variáveis locais, urbanas e climáticas. Com uma série de informações obtidas e com a experiência prévia dos alunos, cada grupo deveria definir uma geometria que atendesse as condições ambientais e funcionais. Para tal, os grupos utilizaram ferramentas digitais de projeto, com a inclusão de simulações que demonstrassem, inicialmente, como era o desempenho térmico. Esse processo resultou em seis formas completamente diferentes, que deveriam seguir uma única restrição: serem superfícies NURBS, exemplificado pela Figura 61.

Figura 61: Superfícies do projeto desenvolvido pelo Grupo 2 durante a disciplina.

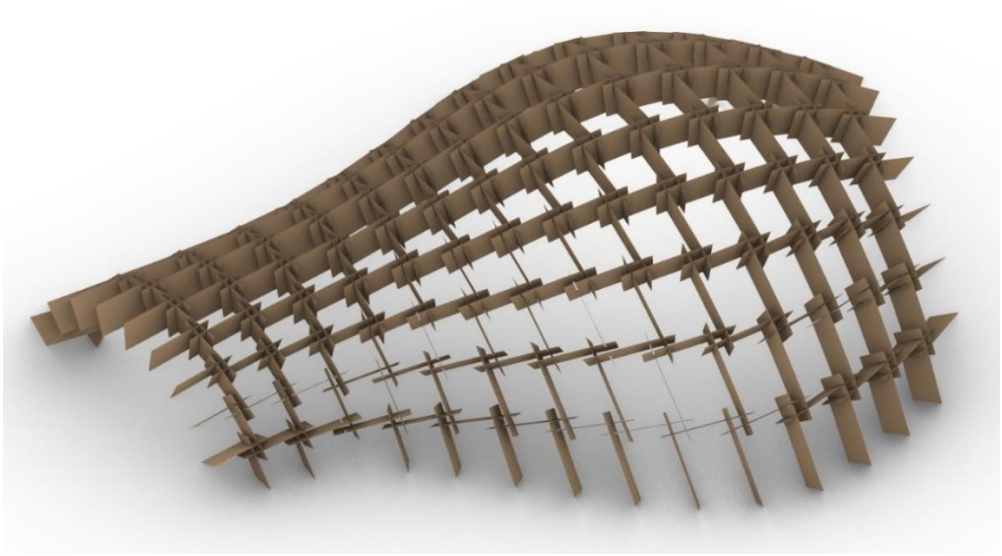


Fonte: modelo criado pelos alunos da disciplina AU 254. Imagem gerada pelo autor, 2019.

Tendo essas superfícies como base, o algoritmo para a geração automatizada das ERs sobre as superfícies foi aplicado. Considerando todos os parâmetros de entrada que estão presentes na

versão final do algoritmo, os grupos tinham liberdade para alterar as seguintes variáveis: i) Número de Subdivisões no Sentido U ($\mathbf{M_n_U}$); ii) Número de subdivisões no sentido V ($\mathbf{M_n_V}$); iii) Ângulo de Rotação ($\mathbf{N_\alpha}$); Comprimento de Ajuste dos Nexors das Bordas ($\mathbf{N_o}$) e Altura da Seção Transversal dos Nexors ($\mathbf{N_h}$). O resultado é demonstrado pelo exemplo da Figura 62.

Figura 62: Exemplo de um modelo de ER gerado pelo algoritmo com base na superfície do Grupo 2, durante a disciplina AU 254.



Fonte: modelo criado pelos alunos da disciplina AU 254. Imagem gerada pelo autor, 2019.

Entretanto, uma das premissas da disciplina era de que os **Modelos** fossem produzidos fisicamente. Nesse sentido, a aplicação do algoritmo resolveria a geometria digital, mas ainda seria necessário modificar ou implementar aspectos que permitissem o processo de Fabricação Digital e montagem das estruturas. Além disso, essa mesma premissa implicou na fixação dos valores da espessura da seção transversal dos nexors ($\mathbf{N_t}$), já que era dependente das especificações do material que seria utilizado nos **Modelos** físicos.

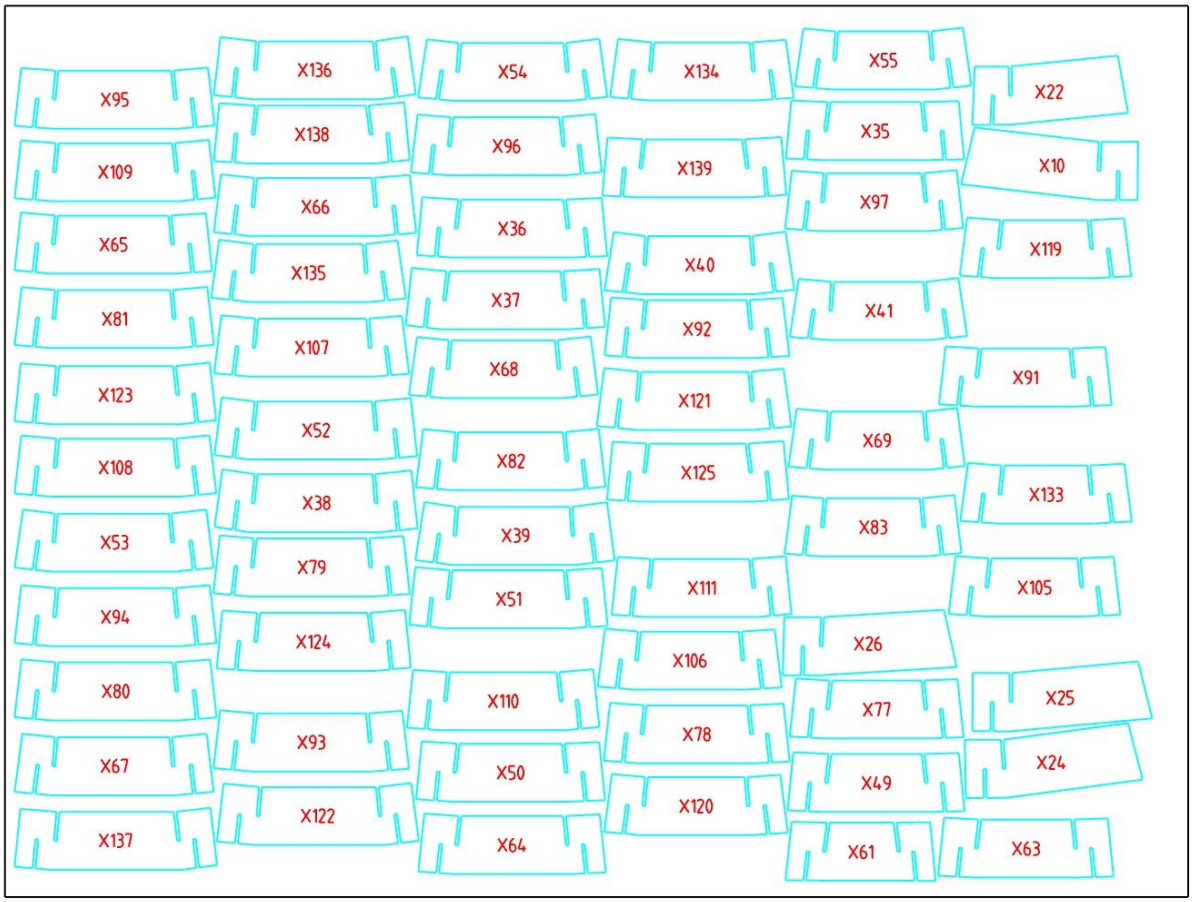
Uma primeira questão que não estava prevista na versão do algoritmo usada na oficina era o sistema de conexão entre os elementos, fundamental para a montagem dos **Modelos** físicos. Para solucionar isso, foi adotada uma alternativa relativamente simples: a criação de conexões por meio-entalhes sobrepostos intertravados, com largura correspondente a espessura do material utilizado (3mm) e localizados na região de intersecção entre dois nexors distintos.

Outra implementação feita no algoritmo estava relacionada com o fato de que as ERs geradas possuíam algumas dezenas de elementos distintos, cada um com um posicionamento específico na estrutura global, o que implicou na necessidade de identificação de cada um. Para facilitar esse processo, o algoritmo foi combinado com o plug-in Human (HEUMANN, 2018), que permite a criação de marcadores e sua atribuição a elementos variados. Dessa forma, os nexors foram divididos em dois grupos, um para cada direção (U e V), numerados de 1 até o máximo de elementos naquele sentido. Porém, as letras U e V possuem certa similaridade em suas formas, o que poderia causar confusão durante a montagem. Por isso, o sistema de marcação adotado foi constituído pelas letras X (no lugar de U) e V, acrescidos de um número.

Por fim, as geometrias dos nexors com entalhes foram combinadas com as respectivas marcações e introduzidas no plug-in OpenNest (VESTARTAS, 2021[18]). Isso possibilitou o agrupamento e a distribuição ordenada dos nexors sobre uma superfície bidimensional, de dimensões correspondentes ao tamanho do material utilizado no processo de fabricação, com o intuito de diminuir o desperdício e agilizar o processo de produção. A combinação dessas estratégias proporcionou um processo file-to-Factory mais direto: além da automação relacionada a geração das ERs, os desenhos para fabricação, composto por linhas separados em camadas distintas em um arquivo de extensão DXF (Figura 63).

[18] Diversos plug-ins para o Grasshopper são disponibilizados para uso em versões de teste ou em desenvolvimento. A versão utilizada do OpenNest na oficina é anterior a que foi referenciada, porém, ela não está mais disponível. Assim, foi referenciada a versão do plug-in disponível durante a elaboração desta tese.

Figura 63: Exemplo de uma das quatro pranchas de corte com os elementos planificados e as respectivas marcações, contidas em um arquivo DXF, para montagem do modelo do Grupo 2.



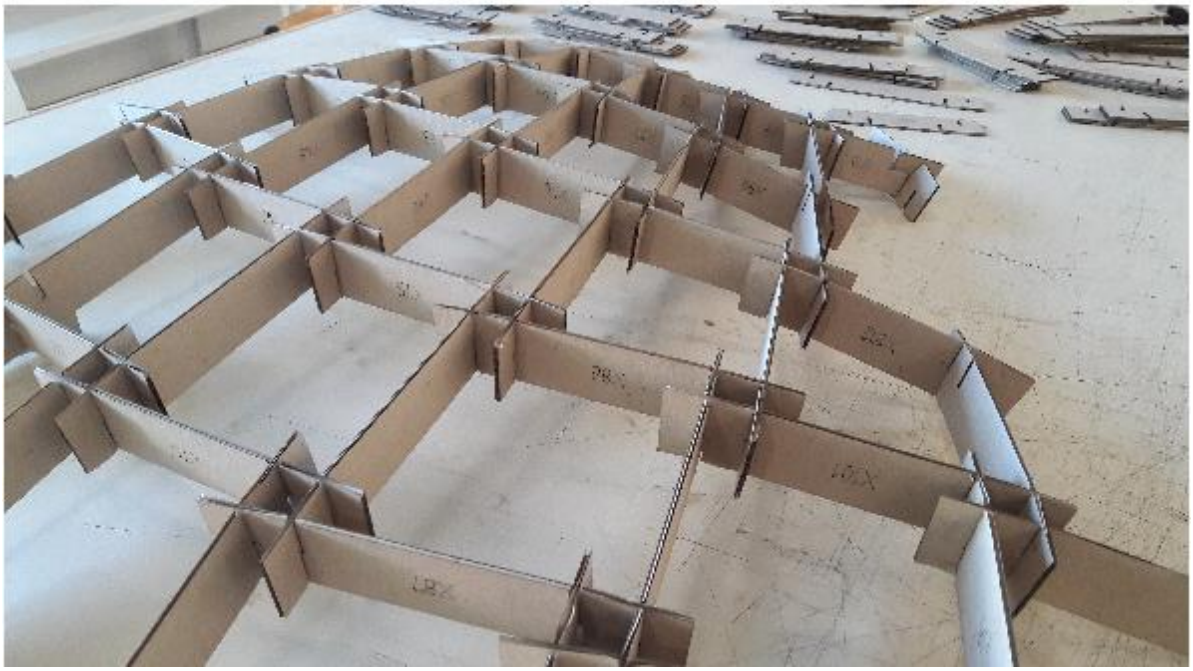
Fonte: modelo criado pelos alunos da disciplina AU 254. Imagem gerada pelo autor, 2019.

Por fim, esses arquivos DXF são enviados para um software CAM (RDWorks) para a definição do projeto de usinagem e interface com o equipamento de fabricação. No caso específico dos arquivos gerados nessa oficina, as linhas na camada vermelha foram definidas como gravação enquanto as em ciano para corte e a produção dos elementos foi feita pela cortadora a laser Combat (100w, 1200x900mm), usando chapas de papelão de dimensão 120cm x 90cm e 3mm de espessura (Figuras 64a e 64b). Todas as superfícies, os **Modelos** digitais das estruturas e os **Modelos** físicos, produzidos em escala 1:20, estão sintetizados no Quadro 4.

Figura 64: Exemplo (a) dos nexors produzidos por corte a laser, separados pequenos grupos para facilitar a montagem e (b) estrutura parcialmente montada com os nexors. As duas imagens são relacionadas com o modelo do grupo 2.

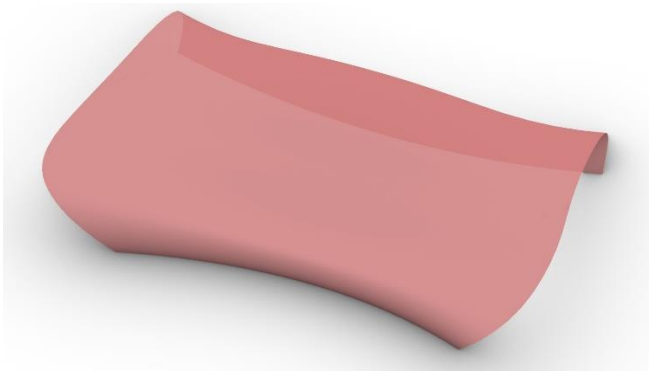
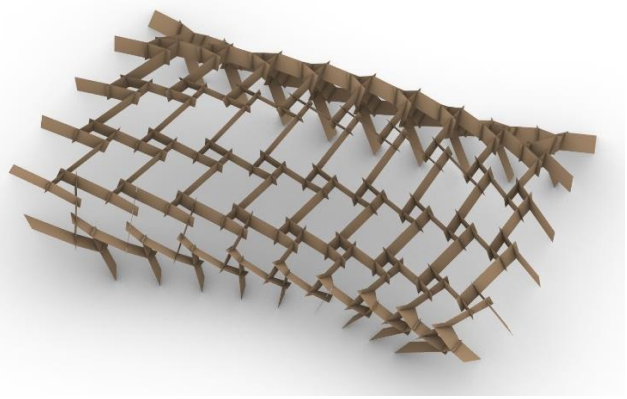
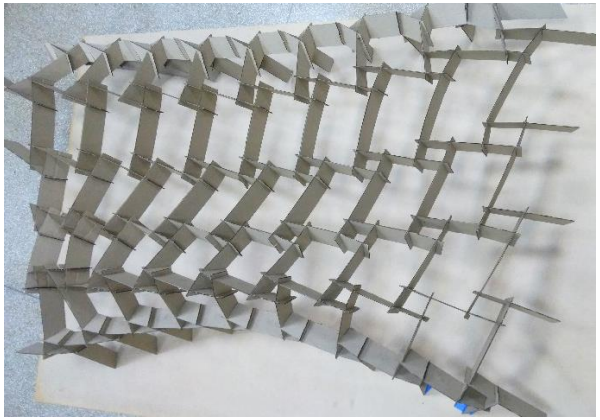
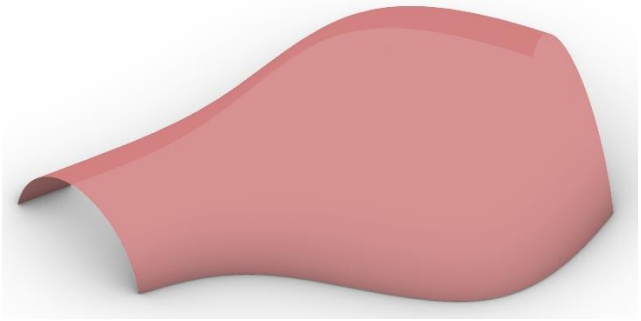
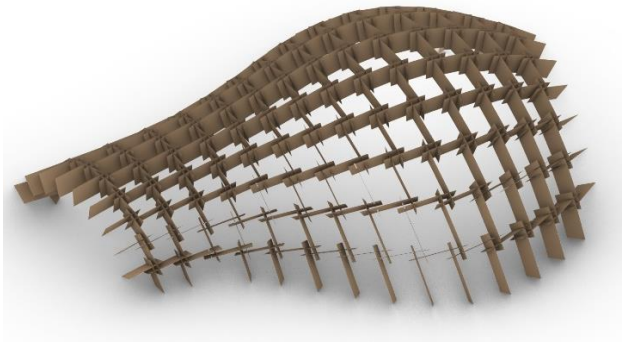
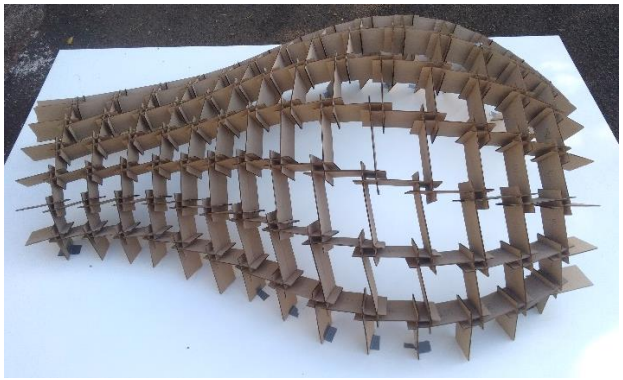
(a) Nexors produzidos por corte a laser para a montagem das ERs

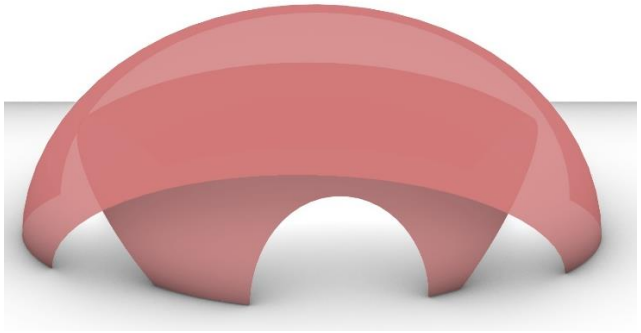
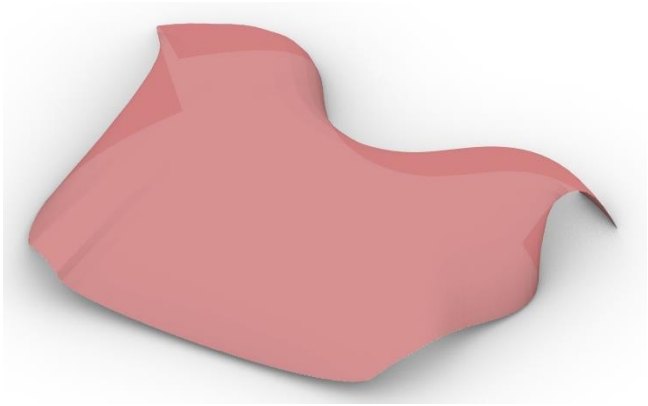
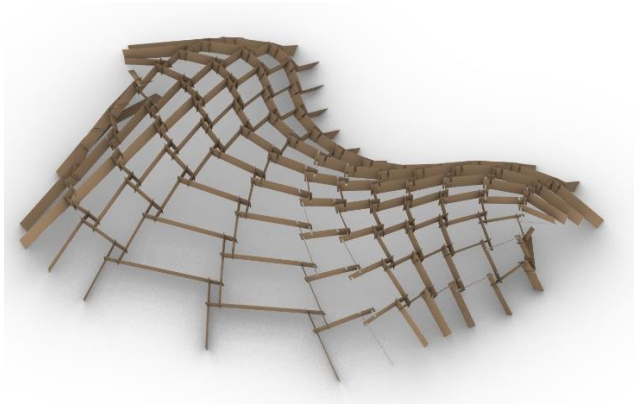
(b) Montagem parcial de uma ER com os Nexors da imagem acima

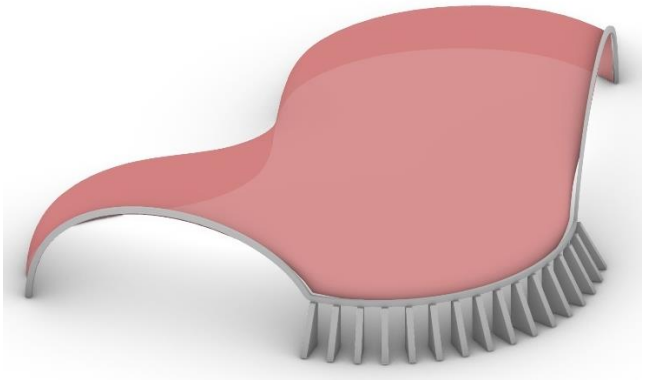
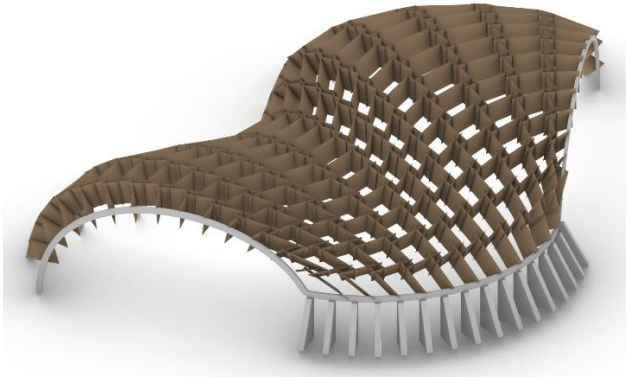
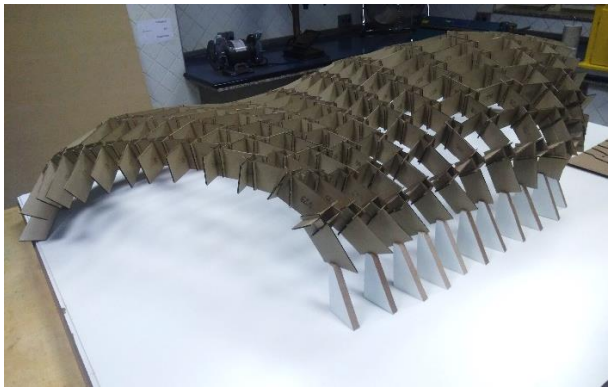
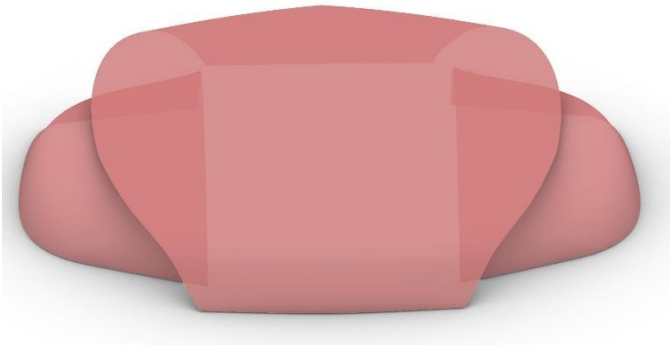
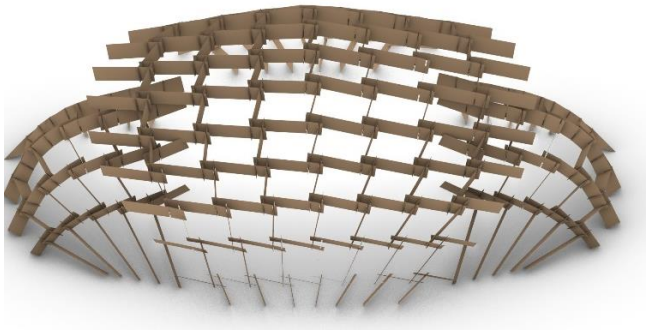
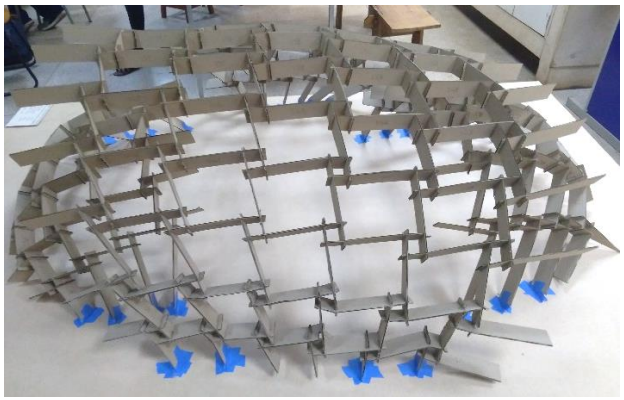


Fonte: modelo criado pelos alunos da disciplina AU 254. Acervo pessoal, 2019.

Quadro 4: Geometrias desenvolvidas pelos seis grupos de alunos, durante a disciplina AU 254.

	Superfície de Origem	Modelo Virtual	Modelo Físico
Grupo 1			
Grupo 2			

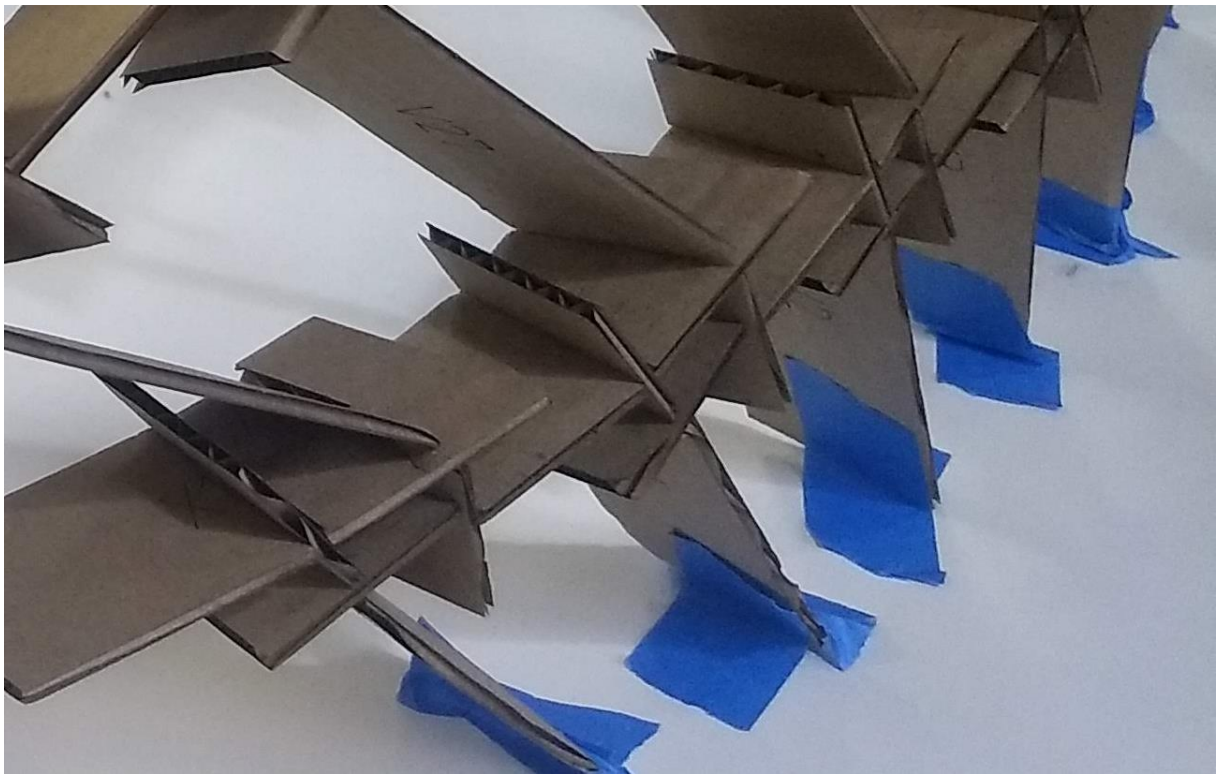
Grupo 3			
Grupo 4			

Grupo 5			
Grupo 6			

Fonte: **Modelos** elaborados pelos alunos de AU 254. Todas as imagens foram geradas ou fotografadas pelo autor, 2019.

O processo de montagem dos **Modelos** físicos apresentou obstáculos muito semelhantes entre todos os grupos, com destaque para dois aspectos específicos. Um deles foi o fato de que a conexão feita entre cada um dos nexors e a base de madeira foi feita com o uso de fitas adesivas, o que resultou em problemas de estabilidade (Figura 65). Outro, ainda mais significativo, tinha relação com o modelo de conexão entre nexors adotado. O uso de meio entalhes intertravados combinado com os arranjos globais das estruturas implicou em elevada dificuldade de posicionar os nexors no local correto para encaixar uns aos outros, fazendo com que muitos alunos optassem por dobrar o material (Figuras 66a e 66b). Em alguns casos, a montagem só foi efetivamente possível por causa da maleabilidade do papelão. Logo, ao considerar ERs feitas em madeira, o uso desse processo e desse tipo de encaixe se tornaria inviável. Esse fato reforçou a importância de se pensar um sistema de conexão novo e que, dentre suas características, permitisse uma facilidade de montagem.

Figura 65: Exemplo do processo de montagem das estruturas, em que (a) o aluno manuseia um nexor e (b) precisa dobrar ou curvar para fazer o encaixe em um outro elemento.

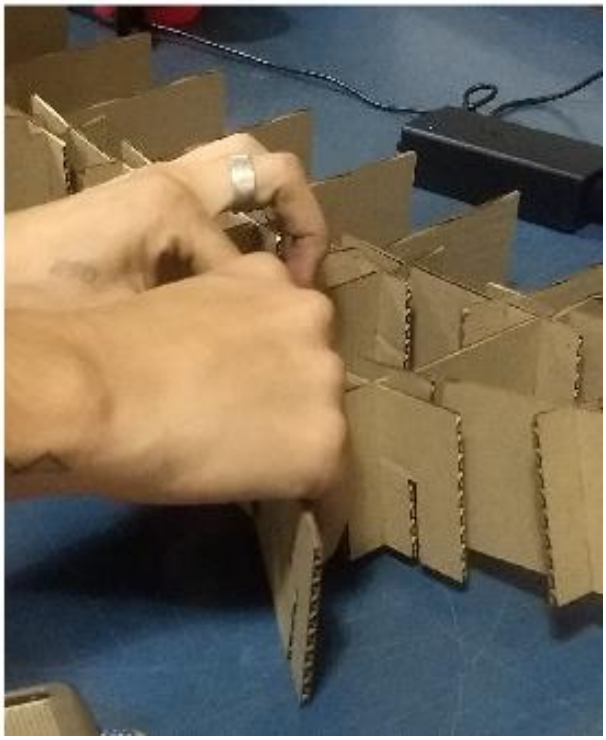


Fonte: modelo criado pelos alunos da disciplina AU 254. Acervo pessoal, 2019

Figura 66: Exemplo do processo de montagem das estruturas, em que (a) o aluno manuseia um nexor e (b) precisa dobrar ou curvar para fazer o encaixe em um outro elemento.

(a) Nexor sendo manuseado por um aluno

(b) Nexor sendo dobrado para o encaixe



Fonte: modelo criado pelos alunos da disciplina AU 254. Acervo pessoal, 2019

7.3.3. Série 3: Concepção das conexões por Blocos Sólidos

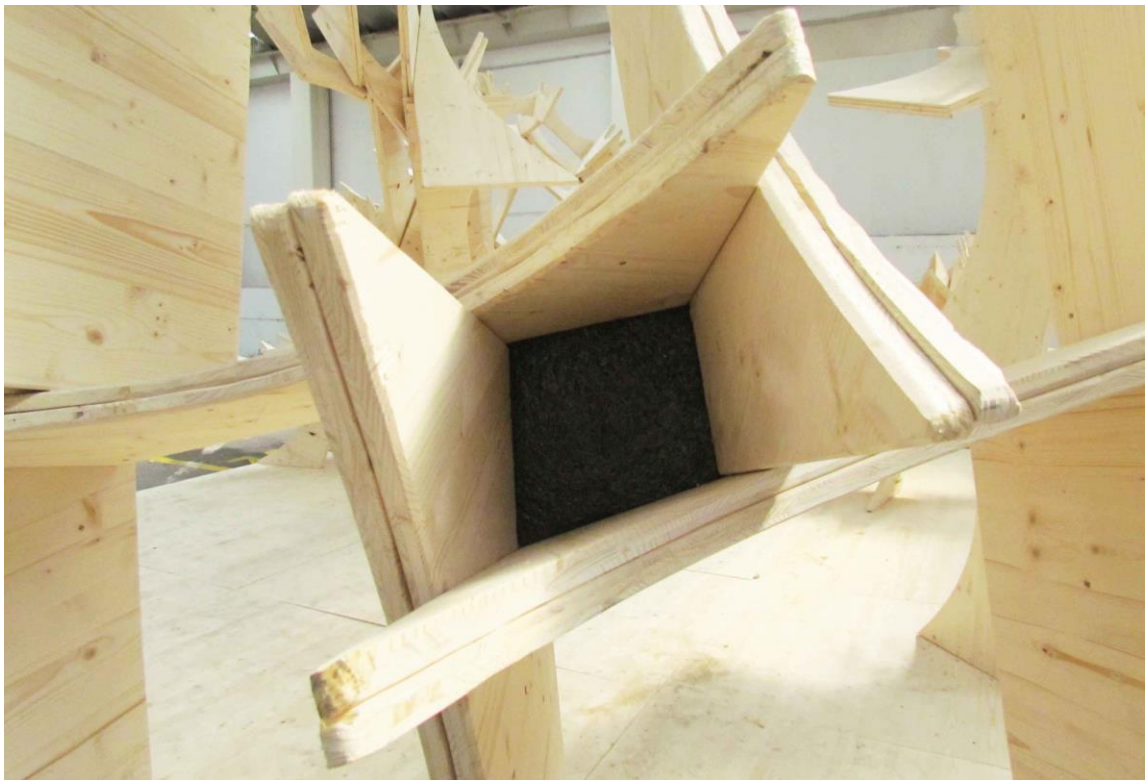
Os **Modelos** Geométricos da Série 2 demonstraram o funcionamento global e a elevada adaptabilidade do algoritmo. Todavia, também deixaram explícita a necessidade de se repensar o sistema de conexões, com o intuito de se alcançar maior facilidade de fabricação e montagem. Além disso, os **Modelos** proporcionaram outras duas reflexões sobre o sistema de conexões e sua relação com os nexors: (1) cortes, entalhes ou qualquer processo que retire parte do material dos nexors implicam, diretamente, na diminuição da resistência do material naquela região; (2) o fato das conexões estarem nos próprios nexors resulta em uma necessidade de personalização de todas as peças, o que pode significar o uso menos racional dos materiais e, potencialmente, maiores custos de produção.

Mais do que isso, Rizzuto e Larsen (2010) estudaram o desempenho de três tipos de conexões utilizadas em ERs, todas construídas com barras de seção circular, avaliando suas principais vantagens e desvantagens. Os autores analisaram conexões feitas por acopladores rotulados,

por parafusos e por entalhes e concluíram que “o uso de entalhes ao longo do comprimento de um elemento o enfraquece sob flexão devido à redução da seção transversal [...] e entalhes no final de um elemento resultarão em uma redução na capacidade de cisalhamento” (RIZZUTO e LARSEN, 2020, p. 250). Eles ainda sugerem que são necessárias maiores investigações, experimentais e numéricas, para se obter melhor compreensão do comportamento estrutural de ERs. Contudo, uma desvantagem de conexões parafusadas é reconhecida pelo fato de concentrarem esforços de cisalhamento, às quais a madeira é menos resistente (CASTRIOTTO *et al,* 2021. Traduzido pelo autor).

Com base em diversos princípios estabelecidos no **Construto** e nos pontos levantados até esse estágio de desenvolvimento dos **Modelos** (refletindo o estágio do **Método** naquele momento), a ideia de se desenvolver um novo sistema de conexão foi reforçada. A Série 3 não registra apenas a geração de mais um modelo, mas também o início de uma abordagem distinta, inspirada pela experiência de Gheorghe e Vierlinger (2017), relacionada com o preenchimento da janela dos leques de uma ER com um sólido (Figura 67).

Figura 67: Leque da ER feita por Gheorghe e Vierlinger (2017), com o preenchimento da janela do leque com um elemento sólido.



Fonte: disponível em: < http://www.digdesfab.com/ddf-14/>. Autor: Andrei Gheorghe. Acesso em: 25 de maio de 2022.

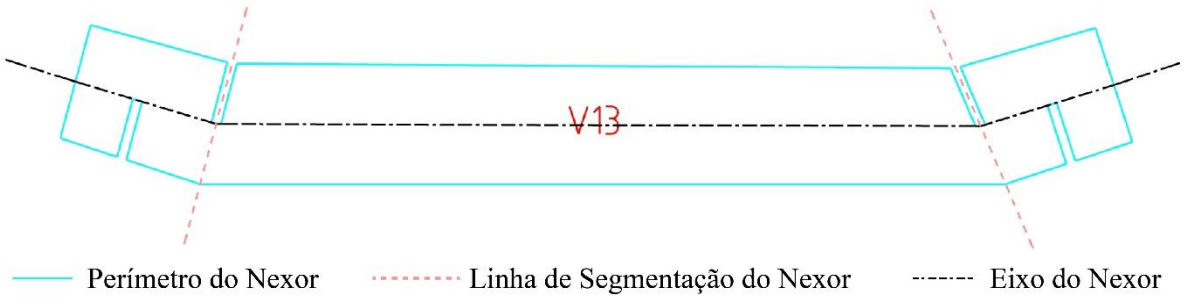
Este sistema possui algumas vantagens interessantes quando comparados a outros sistemas de conexões de ERs. Ele pode ser aplicado a superfícies com inúmeros valores para os raios de curvatura e, ao mesmo tempo, possui o potencial de aumentar a rigidez das ligações e do leque como um todo. Além disso, como os comprimentos de trabalho dos nexors estão presos ao elemento sólido sem nenhum tipo de elemento metálico ou entalhe, não há enfraquecimento ocasionado por furos ou cortes (CASTRIOTTO *et al,* 2021. Traduzido pelo autor).

Uma nova abordagem foi iniciada pela aplicação de um bloco maciço sólido, que preencheria totalmente o volume vazio dos leques. Era fundamental compreender o impacto disso em três momentos distintos: 1) no desenvolvimento do algoritmo; 2) no processo de fabricação e; 3) na montagem das estruturas. Os **Modelos** a seguir demonstram as principais implicações do uso do bloco sólido, ainda sem considerações sobre desempenho estrutural.

7.3.3.1. Reflexos no processo algorítmico

A forma mais simples de explicar as modificações no algoritmo para a geração dos Blocos Sólidos é a comparação das novas relações entre nexors com as que estavam sendo utilizadas nos **Modelos** da Série 2, em especial durante as oficinas. Uma vez que as conexões eram feitas por meio entalhes intertravados, os nexors precisavam ser prolongados para além da região de intersecção. Além disso, havia uma segmentação da linearidade dos nexors em três partes: a intermediária e os dois trechos de extremidade, conforme evidenciado pela Figura 68.

Figura 68: Segmentação da linearidade dos Nexors utilizados nos **Modelos** da Série 2.



Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

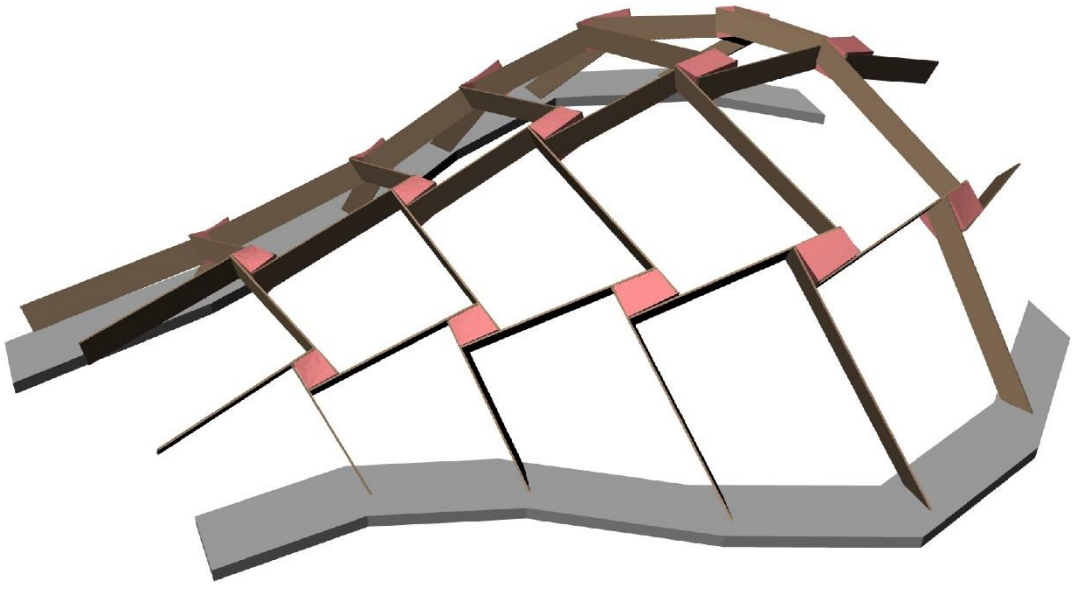
A implementação das conexões feitas por Blocos Sólidos permitiu simplificar a geometria dos nexors, fazendo com que o eixo axial fosse totalmente linear (Figura 69a). Ao mesmo tempo, o

comprimento dos nexors passa a ser limitado pelo plano de intersecção definido pelos nexors ortogonais, uma vez que as relações de sobreposição e intertravamento se tornaram dispensáveis. Mais do que isso, os elementos de conexão não só unem os elementos como também incorporam a maior parte da complexidade geométrica contida nas ERs. Isso significa que os Blocos Sólidos passam a ser os elementos responsáveis pela transferência da curvatura e que auxiliam o posicionamento espacial de cada um dos nexors. Para ilustrar essa mudança, foi desenvolvido um modelo baseado na geometria de entrada definida pelo grupo 2 da disciplina AU 254 (Série 2). Nesse caso, optou-se por reduzir o número de subdivisões relativos às isocurvas U e V, como forma de testar o efeito acentuado da curvatura sobre as conexões, e o resultado virtual é ilustrado pela Figura 69b.

Figura 69: Exemplo de (a) a geometria simplificada do nexor e (b) geometria virtual de uma ER que utiliza conexões por Blocos Sólidos.

(a) Geometria do Nexor utilizado em uma ER com Blocos Sólidos

(b) Geometria Virtual de uma ER com Conexões formadas por Blocos Sólidos



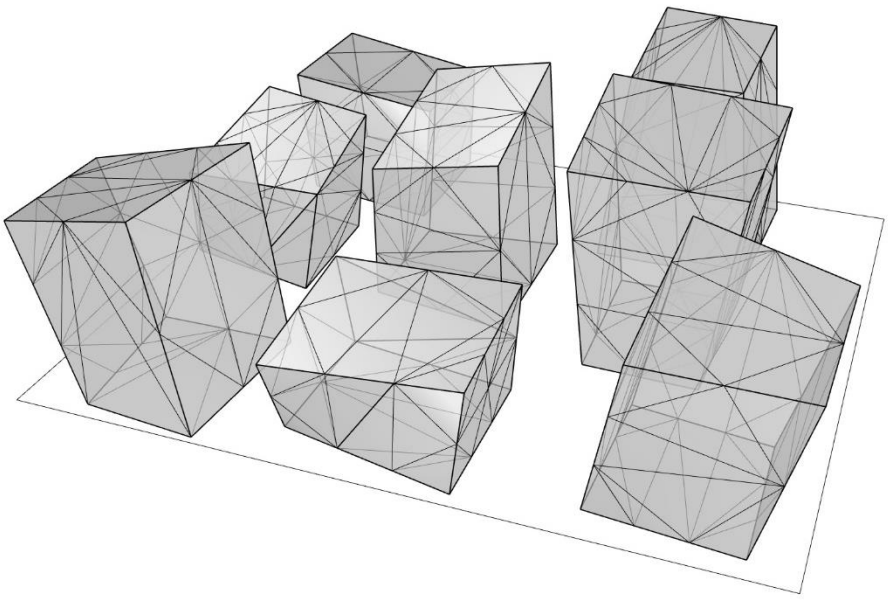
Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

7.3.3.2. Reflexos nos processos de fabricação e montagem

Com o intuito de melhor compreender o impacto das novas conexões no processo de fabricação, foi proposta a produção de um novo modelo físico, que seguiu lógica similar aos **Modelos** produzidos durante a disciplina AU 254. Para isso, o modelo virtual apresentado na figura anterior foi dimensionado para a escala 1:20 e a produção dos nexors seguiu os mesmos procedimentos dos utilizados na oficina. Em outras palavras, a principal diferença estava, de fato, na produção das conexões feitas por Blocos Sólidos.

Uma das principais consequências ocasionadas pela complexa geometria dos elementos foi a inviabilidade de produção por métodos de planificação para corte a laser ou até mesmo pelo uso de uma CNC com menos de cinco eixos. A alternativa encontrada para possibilitar a produção das conexões foi o uso da Impressora 3D Felix (255x205x225mm). Tendo isso em mente, o processo de fabricação pode ser resumido da seguinte maneira: os sólidos gerados pelo algoritmo eram distribuídos, no ambiente CAD, em uma região correspondente à área de impressão. Essas geometrias eram salvas com a extensão STL (Figura 70) e enviadas para o software Repetier-Host, que permitia a geração do código com o plano de impressão dos elementos geométricos. Esse processo resultou na produção de 15 geometrias totalmente únicas, porém, ao custo de um novo obstáculo: o tempo de produção foi de mais de 20 horas.

Figura 70: Oito das quinze geometrias das conexões, salvas em arquivo STL, dispostas dentro da área de um retângulo de 20cm x 22cm, correspondente ao tamanho da mesa da impressora 3D.



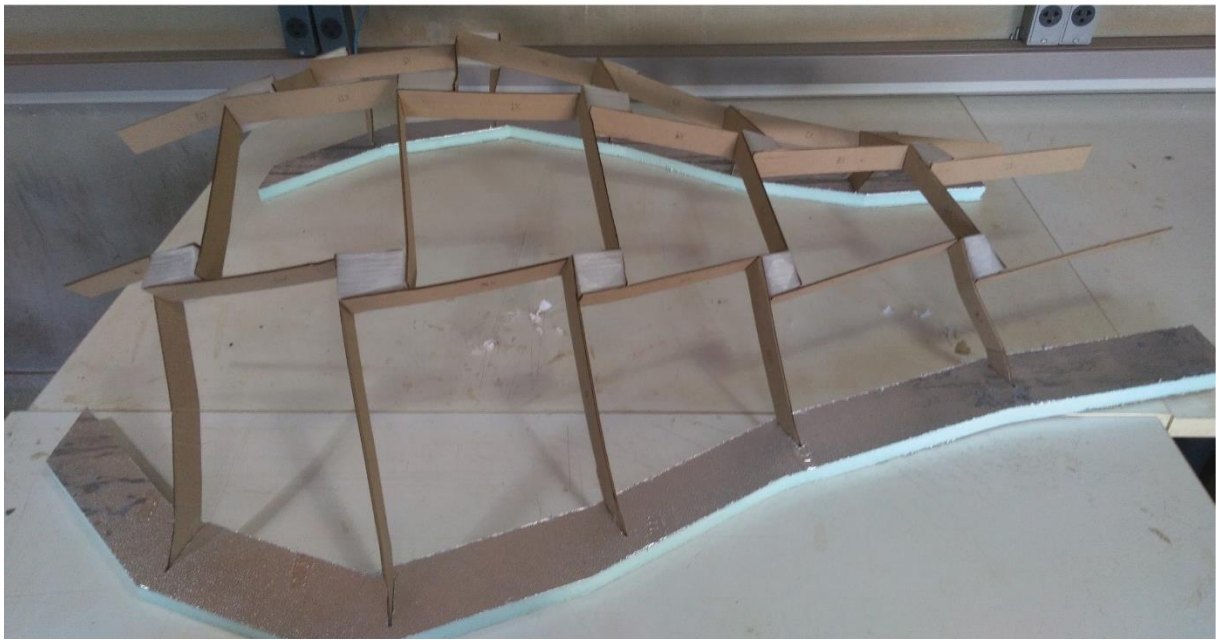
Fonte: elaborado pelo autor, 2020.

Sob a perspectiva do processo de montagem, esse modelo apresentou uma melhora substancial quando comparado às estruturas feitas na disciplina AU 254. Conforme esperado, a necessidade de se dobrar os nexors para encaixar uns aos outros desapareceu (Figura 71a), o que indicava a possibilidade de utilizar materiais mais rígidos nas etapas seguintes. Ao mesmo tempo, a adoção de elementos que serviram como base para a estrutura facilitou a fixação dos nexors sem o uso de fitas adesivas, garantindo maior estabilidade para o modelo geral (Figura 71b).

Figura 71: Primeiro modelo construído com as conexões de Blocos Sólidos. Em (a) é apresentada a imagem ampliada de um único leque e (b) apresenta o modelo completo.

(a) Imagem ampliada do Bloco Sólido conectando os nexors

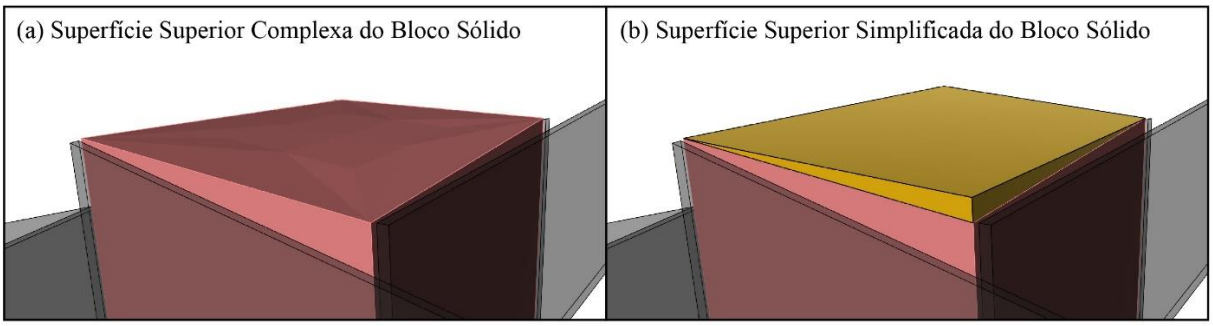
(b) Modelo em escala 1:20, utilizando os Blocos Sólidos como elementos de conexão



Fonte: elaborado pelo autor, 2020.

Com o objetivo de tentar facilitar o processo de fabricação e para compreender o processo de montagem com elementos rígidos, outro modelo físico foi produzido. Desta vez, tratou-se de uma única conexão de um único leque, em escala 1:2, totalmente feito em madeira. Uma das estratégias adotadas foi a simplificação das duas superfícies dos Blocos Sólidos que não tinham contato com os nexors (superior e inferior). Ao invés dessas superfícies serem o obtidas a partir da curvatura da geometria de entrada, elas foram simplificadas como dois planos, obtidos a partir do produto vetorial dos vetores normais dos nexors que compõem determinado leque. Isso pode ser mais facilmente compreendido ao observar as Figuras 72a e 72b.

Figura 72: Processo de simplificação de uma das superfícies do Bloco Sólido, (a) apresenta a geometria curva e (b) o preenchimento da geometria com o acabamento em um plano.



Fonte: elaborado pelo autor, 2020.

A simplificação da geometria dos Blocos Sólidos permitiu a produção das conexões de diversas maneiras, sendo até mesmo possível a produção sem o uso equipamentos de Fabricação Digital. De forma a atestar essa possibilidade, o Bloco Sólido de um único leque, contendo apenas cortes angulares nas superfícies laterais, foi produzido a partir de uma peça maciça de madeira e com o uso de uma serra circular de bancada portátil.

Se por um lado o processo de fabricação havia sido facilitado, por outro, o processo de montagem provou ser bastante desafiador. Isso porque esse sistema de conexão exigia dezesseis marcações bastante precisas para o aparafusamento dos elementos, oito nos nexors e outras oito no Bloco Sólido (Figura 73a). O posicionamento dos nexors e da conexão no ângulo correto também exigia muito esforço, e como não havia sido planejado o uso de elementos auxiliares ou guias, foi necessário improvisar um gabarito para as marcações (Figura 73b). Não obstante, o peso total do leque aumentou consideravelmente, devido às dimensões totais da conexão (Figura 73c). Essas informações indicaram a necessidade de desenvolver melhores estratégias

para a montagem e a importância de reduzir o peso e o número de elementos metálicos utilizados para fixação (CASTRIOTTO *et al,* 2021).

Figura 73: Imagens referentes à conexão de Blocos Sólidos; (a) algumas das marcações feitas nos elementos; (b) gabarito improvisado utilizado para o processo de produção e; (c) leque com as conexões entre quatro nexors.

(a) Marcações feitas a lápis nos nexors e nas conexões para posicionamento e perfuração dos elementos

(b) Gabarito improvisado utilizado para fazer todas as marcações nos nexors e nas conexões

(c) Leque em escala 1:2, montado com as conexões de Blocos Sólidos em madeira

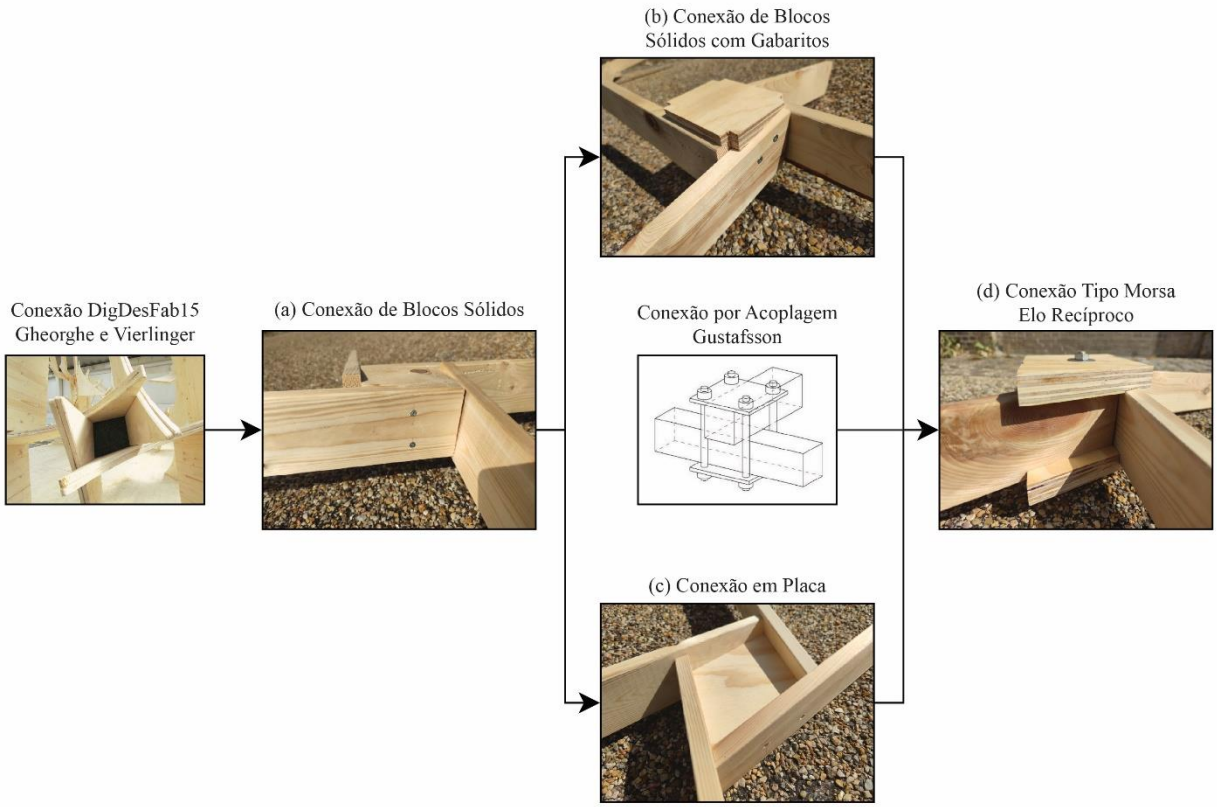
Fonte: acervo pessoal, 2020.

7.3.4. Série 4: Iterações do Bloco Sólido para o Tipo Morsa - Elo Recíproco

A partir das informações obtidas pelo desenvolvimento dos **Modelos** da Série 3, estava nítida a importância de aprimorar a ideia do uso dos Blocos Sólidos como elementos de conexão, visando um maior equilíbrio entre vantagens e desvantagens dos processos de projeto, fabricação e montagem. Considerando o Bloco Sólido como a primeira iteração da ideia de preenchimento das janelas dos leques como mecanismo de conexão, outras três foram

desenvolvidas, culminando na criação da conexão Tipo Morsa – Elo Recíproco. Cada uma foi modelada individualmente e sua viabilidade foi verificada por prototipagem e montagem (Figura 74) (CASTRIOTTO *et al,* 2021).

Figura 74: Diagrama apresentando a evolução dos protótipos, a partir da ideia de preencher o espaço vazio dos leques para (a) a criação dos Blocos Sólidos, (b) implementação dos gabaritos, (c) redução do volume em placas, e (d) desenvolvimento da conexão Tipo Morsa.



Fonte: CASTRIOTTO *et al,* 2021, p. 8. Textos traduzidos pelo autor.

7.3.4.1. Conexões em Placas e Blocos Sólidos com Gabaritos

Uma dessas iterações foi chamada de Conexão em Placas (Figura 74c), e tinha como objetivo reduzir o máximo possível de peso das conexões apenas pela redução do volume e quantidade de material. De fato, essa iteração foi a que resultou na solução mais leve, porém, provou ser a mais difícil de perfurar e fixar os nexors (Figuras 75a e 75b). A exigência do nível de precisão para posicionamento, marcação e aparafusamento era ainda maior do que no caso dos Blocos Sólidos. A redução e simplificação da geometria da conexão facilitava o transporte e parcialmente a fabricação, mas também resultou no processo de montagem mais lento dentre todas as iterações (CASTRIOTTO *et al,* 2021).

Figura 75: Imagens referentes à conexão em Placa; (a) nexors fixados no elemento central e; (b) leque completo visto de cima, com os quatro nexors.

(a) Nexors parafusados na conexão em Placa. É perceptível que o alinhamento dos parafusos é diferente do eixo dos nexor

(b) Leque em escala 1:2, montado com as conexões em placa

Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

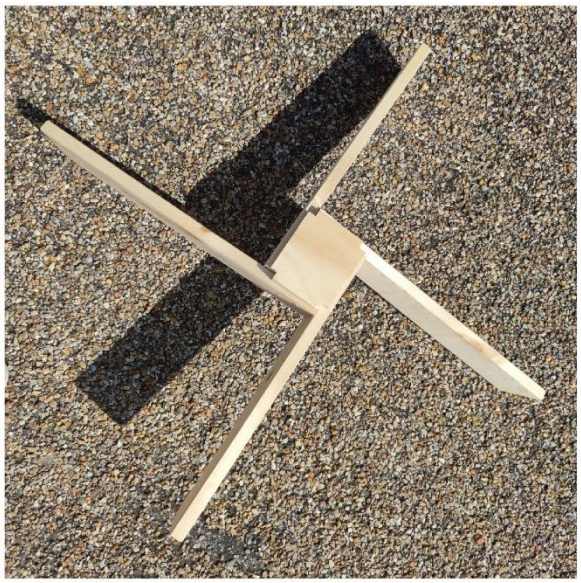
Desenvolvida simultaneamente, outra iteração foi a adição de geometrias que funcionassem como gabaritos nos Blocos Sólidos (Figura 74b), que tinham o propósito de auxiliar o alinhamento e posicionamento nexors no local correto (Figura 76a). Isso facilitava a fixação por parafusos e reduzia o tempo total de montagem de um único leque (Figuras 76b e 76c). Os gabaritos incorporados às conexões também continham o potencial de serem utilizados como elementos estruturais, impedindo ou diminuindo os esforços de rotação dos nexors. Porém, para se obter uma confirmação, seria necessário maiores estudos e desenvolvimento para compreender as relações entre forças e as dimensões dos gabaritos. Do ponto de vista estético, era necessário maior refinamento, especialmente na relação entre gabaritos e nexors.

Essa iteração aparentava solucionar, ainda que parcialmente, o processo de montagem, apresentando um melhor equilíbrio entre projeto, fabricação e montagem. Entretanto, os Blocos Sólidos com Gabaritos mantinham alguns aspectos desvantajosos: i) peso elevado por conta da quantidade de elementos metálicos; ii) o uso de parafusos resulta em altas tensões de cisalhamento nos nexors e nas conexões; iii) o processo de montagem ainda exigia perfurações e marcações precisas e; iv) o aumento no grau de complexidade geométrica, por conta da geometria dos gabaritos, implicava na produção por equipamentos de Fabricação Digital (Figura 76d) (CASTRIOTTO *et al,* 2021).

Figura 76: Imagens referentes à conexão por Blocos Sólidos com Gabaritos; (a) nexors fixados no elemento central com auxílio da geometria dos gabaritos; (b) leque completo visto de cima, com os quatro nexors; (c) Leque completo com os nexors alinhados pelos gabaritos e; (d) Produção das conexões por um equipamento CNC.

(a) Posicionamento e fixação de um nexor, com auxílio da geometria do gabarito implementado na conexão, escala 1:4

(b) Leque em escala 1:2, montado com as conexões por Blocos Sólidos com Gabaritos



(c) Nexors aparafusados na conexão por Blocos Sólidos com Gabaritos. Nota-se que a inclinação dos nexors acompanha o perfil dos gabaritos

(d) Produção de uma conexão de Bloco Sólido com Gabaritos, em escala 1:4 com uso de uma CNC Roland com três eixos. Geometria não finalizada

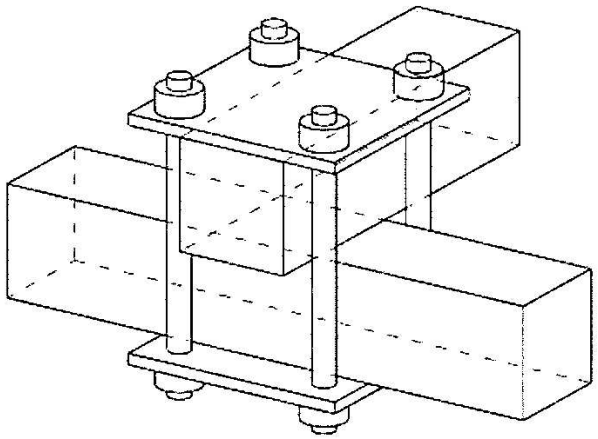
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

7.3.4.2. Implementação do conceito de conexões por acoplagem

Ao passo que essas duas iterações solucionaram alguns dos aspectos, um obstáculo no desenvolvimento e aplicação das conexões ficou cada vez mais evidente: era imprescindível encontrar uma alternativa que substituísse a exigência de marcações precisas para os furos, nos nexors e nas conexões, por algum outro sistema. Foi necessário resgatar alguns dos estudos

analisados durante a RSL, mais especificamente aqueles que apresentavam **Modelos** alternativos de conexões para ERs. Dentre eles, as conexões por acoplagem com uso de braçadeiras contráteis (Figura 77), apresentadas por Gustafsson (2016), tinham características que poderiam ser combinadas, de alguma forma, com o conceito iniciado pelos Blocos Sólidos. No caso, as braçadeiras contráteis funcionam "aumentando a aderência de fricção para transferir as cargas" (GUSTAFSSON, 2016, p. 18), ao mesmo tempo que não causam danos ou reduzem a seção transversal dos nexors e facilitam o processo de montagem e desmontagem (PUGNALE e SASSONE, 2014). No entanto, as braçadeiras utilizadas por Gustafsson (2016) só funcionam em superfícies planas. Seria necessário conduzir mais estudos para compreender sua aplicabilidade em outras geometrias (CASTRIOTTO *et al,* 2021).

Figura 77: Conexão por Acoplagem, com uso de braçadeiras contráteis, similar ao sistema de compressão por morsas.



Fonte: GUSTAFSSON, 2016, p. 18.

7.3.4.3. Conexões Tipo Morsa – Elo Recíproco

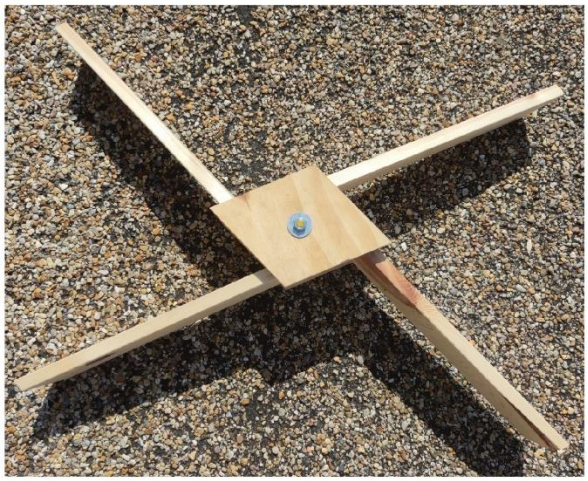
Ao combinar o conceito de Conexões por Acoplagem com o de Blocos Sólidos com Guias e as Conexões em Placas, foi desenvolvida a Conexão Tipo Morsa (Figura 74d). O princípio neste modelo foi de utilizar duas placas de compensado de madeira, uma na parte superior e outra inferior do leque, estendendo suas bordas além do limite do próprio leque – semelhantes aos gabaritos utilizados nos Blocos Sólidos. Parte do trecho estendido foi fresado com a geometria negativa da intersecção com os nexors, gerando um espaço que funcionaria como o vazio de uma gaveta, com grande área de contato (Figura 78a). Com um pino de fixação que passa pelo

centro do sistema inteiro, as placas pressionam os nexors, travando-os na posição correta, em uma combinação de atrito e um único fixador mecânico (CASTRIOTTO *et al,* 2021).

Figura 78: Imagens referentes à conexão Tipo Morsa; (a) nexors sendo alocados nas gavetas; (b) leque completo visto de cima, com os quatro nexors; (c) perspectiva da conexão, com destaque para parafuso e arruela; (d) Produção de uma parte da conexão por um equipamento CNC.

(a) Conexão Tipo Morsa ainda fixada, evidenciando o sistema interno. A barra passa por todo o sistema e a torção das porcas comprime as placas e os nexors

(b) Leque em escala 1:2, montado com as conexões tipo Morsa



(c) Nexors fixados na conexão por um sistema de compressão e atrito. Para o travamento do sistema, são usadas porcas e arruelas.

(d) Produção de uma conexão tipo Morsa, em escala 1:4, com uso de uma CNC Roland com três eixos. Geometria não finalizada

Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Uma vez que problemas de alinhamento e posicionamento foram mitigados, o processo de montagem foi facilitado (Figura 78b). Como esta iteração não utiliza parafusos nos nexors, as tensões de cisalhamento ficaram concentradas nas conexões, ao redor das barras centrais (Figura 78c). Em um primeiro momento, essas conexões também foram produzidas com uso de equipamentos de Fabricação Digital (Figura 78d). Do ponto de vista estético, a Conexão Tipo Morsa apresentou uma expressão mais distinta quando comparada com os **Modelos** anteriores,

destacando a conexão como um elemento especial na estrutura como um todo (CASTRIOTTO *et al,* 2021).

Com o intuito de obter uma comparação visual entre arranjos de ERs formados por conexões Tipo Morsa e por conexões de Blocos Sólidos com Gabaritos, dois **Modelos** em escala reduzida foram produzidos. As dimensões dos nexors e dos leques deveria ser semelhante e o mesmo processo de fabricação foi adotado em ambos os casos. Os **Modelos** podem ser visualizados nas Figuras 79a e 79b.

Figura 79: **Modelos** em escala reduzida dos arranjos de leques de ERs; (a) formados por Blocos Sólidos com Gabaritos e; (b) formados pelas conexões Tipo Morsa

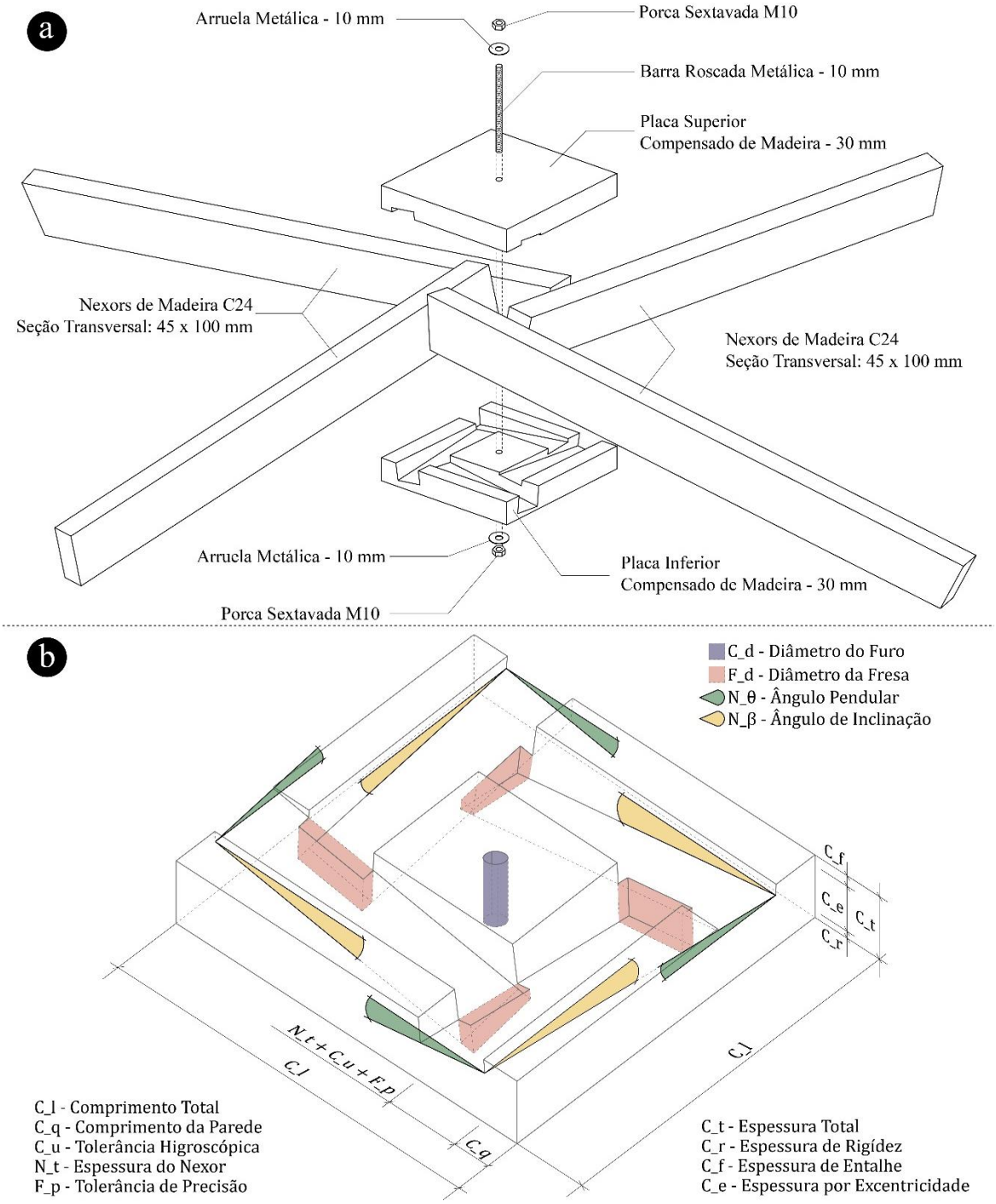
(a) Modelo em escala reduzida de um arranjo formado por quatro conexões por Blocos Sólidos com Gabaritos

(b) Modelo em escala reduzida de um arranjo formado por cinco conexões do Tipo Morsa - Elo Recíproco

Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Com base nas informações obtidas pelos **Modelos** gerados em cada uma das iterações, a conexão Tipo Morsa foi definida para constituir o algoritmo desenvolvido e, portanto, ser gerada automaticamente. Os elementos e as variáveis que compõem as conexões são apresentados nas Figuras 80a e 80b, respectivamente.

Figura 80: Apresentação do sistema de conexão; (a) perspectiva explodida mostrando os principais elementos e; (b) perspectiva da placa inferior com as variáveis que a definem.

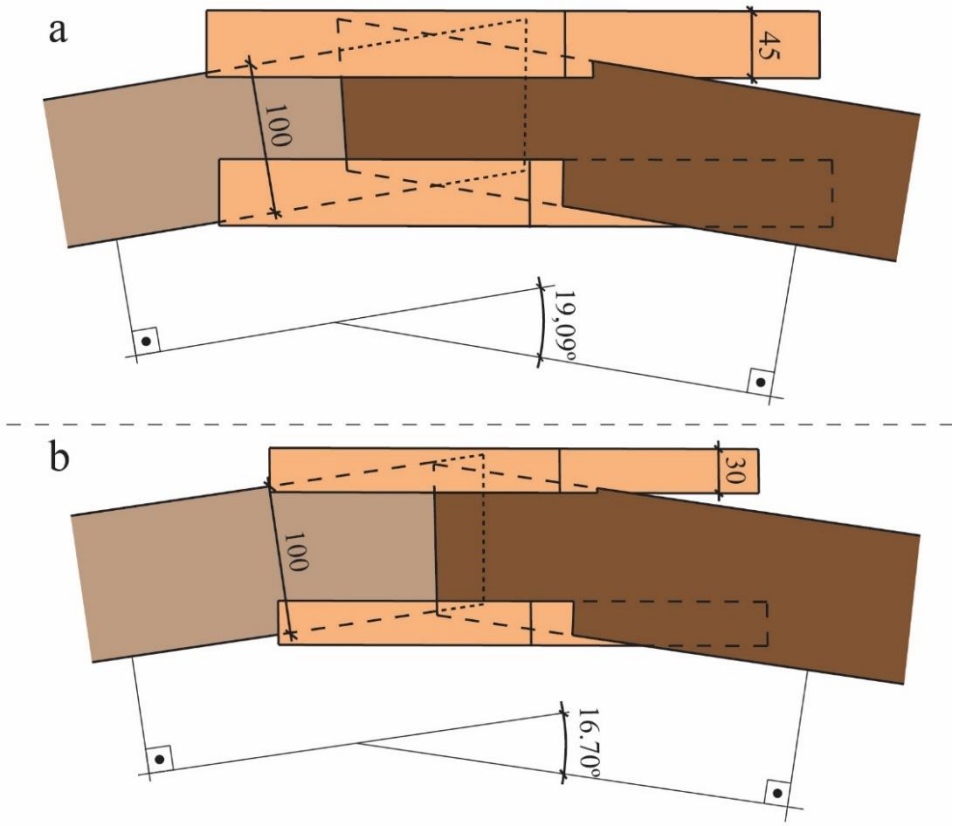


Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Neste processo de geração das conexões, os valores atribuídos às subdivisões em U ($\mathbf{M_n_U}$) e V ($\mathbf{M_n_V}$), combinados com o grau de curvatura da geometria de entrada (ângulo de inclinação $\mathbf{N_\beta}$), influenciam na definição das dimensões mínimas de cada elemento da estrutura de uma

maneira muito específica. De modo geral, a regra aplicada aos processos de discretização é: quanto maior o número de subdivisões utilizadas no processo de discretização, maior é a granularidade e a renderização da geometria original. Como a transferência da curvatura é feita pela geometria das conexões, as suas dimensões são muito dependentes do grau de granularidade. A regra aqui aplicada é: granularidades mais elevadas implicam em menores espessuras (das placas superior e inferior das conexões. Há um complexo equilíbrio entre a quantidade e o tamanho das conexões, que pode ser explorado em uma série de possibilidades estéticas e estruturais. Por exemplo, ao aumentar a subdivisão no sentido da curvatura principal de uma geometria de abóboda, a espessura total de cada placa é diminuída, ao mesmo passo que o número total de conexões é aumentado (Figuras 81a e 81b) (CASTRIOTTO *et al*, 2021).

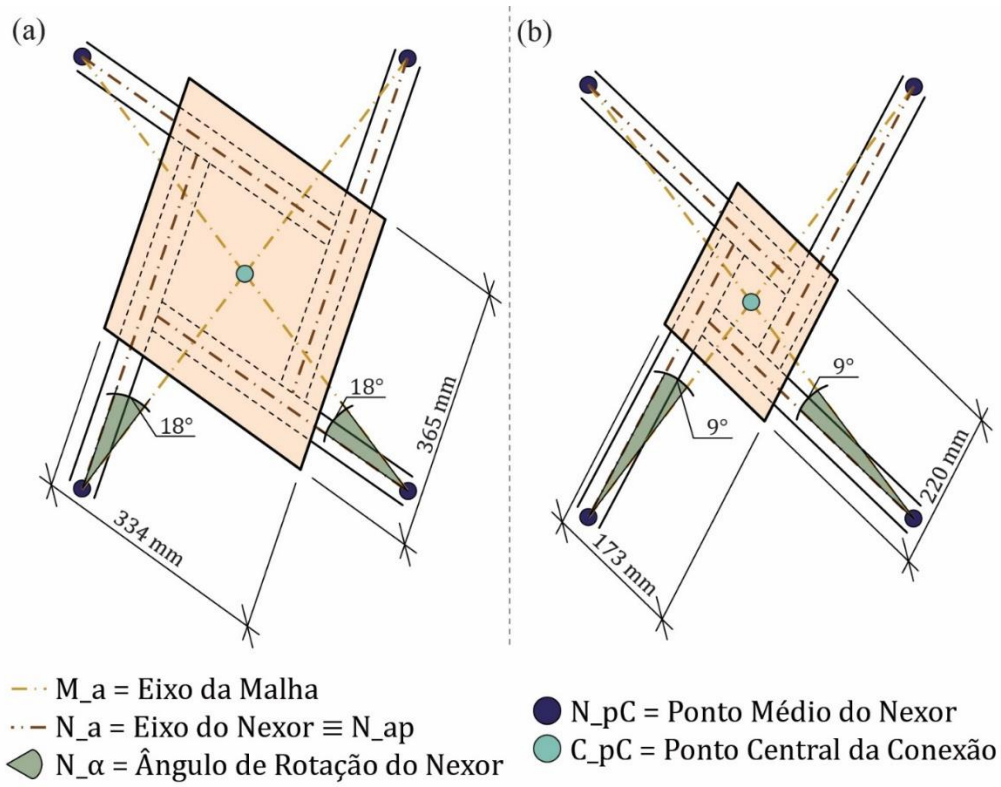
Figura 81: Vistas laterais de uma conexão, variando a conexão conforme o ângulo de inclinação; (a) Maior ângulo resulta em maior espessura e (b) ângulo com aproximadamente 2,4 graus de diferença e redução de 15mm na espessura. Medidas em milímetros e ângulos em graus.



Fonte: CASTRIOTTO *et al,* 2021, p. 15.

A complexidade estabelecida entre as variáveis e as dimensões das conexões também é válida para a definição do comprimento de cada um dos lados das conexões (**C_l**), determinados pela relação entre o número de subdivisões, o comprimento da parede da conexão (**C_q**) e, principalmente, o ângulo de rotação (**N_α**). Nesse sentido, a regra é: maiores subdivisões e menores ângulos de rotação e de dimensões do comprimento da parede implicam em comprimentos laterais menores. Por exemplo, ao variar a angulação e o número de subdivisões em uma geometria de abóboda, a geometria e as dimensões laterais da conexão são alteradas consideravelmente (Figuras 82a e 82b).

Figura 82: Vistas superiores de uma conexão, mantendo o número de subdivisões e alterando o ângulo de rotação; (a) Maior ângulo resulta em maiores comprimentos laterais e (b) metade do ângulo aplicado, diminuindo o tamanho total da conexão.

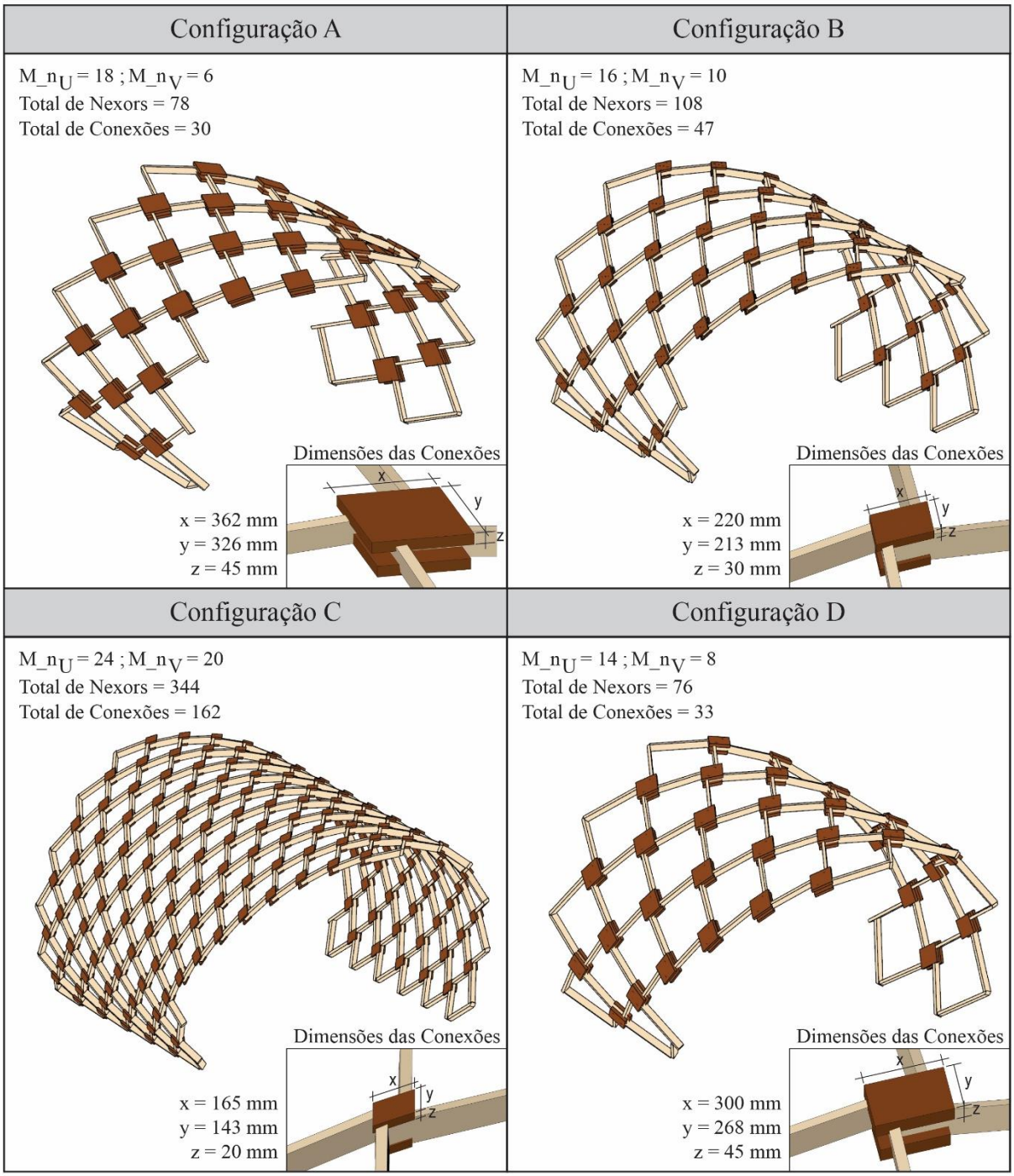


Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Considerando todos os aspectos mencionados e para demonstrar algumas das possibilidades, foram geradas quatro configurações distintas de ERs, todas tendo como base a mesma superfície de origem (Figuras 83a – 83d). Para encontrar um equilíbrio interessante entre o número e o tamanho das conexões e de nexors, cada configuração foi gerada a partir de alterações na

quantidade de subdivisões nos sentidos U e V. Os quatro **Modelos** resultantes são utilizados na definição da **Instância** (CASTRIOTTO *et al*¸ 2021).

Figura 83: Quatro configurações diferentes de ERs com a conexão Tipo Morsa (a, b, c, d), geradas pelo algoritmo. Foram alterados somente os parâmetros referentes aos números de subdivisões.



Fonte: CASTRIOTTO *et al,* 2021, p. 6. Textos traduzidos pelo autor.

7.3.5. Série Paralela: modelos estruturais digitais e físicos

Paralelamente aos desenvolvimentos dos **Modelos** citados anteriormente, havia a preocupação de compreender os impactos de uma nova conexão no desempenho estrutural de uma ER. Entretanto, conforme mencionado durante a RSL, existe uma dificuldade em prever e simular o comportamento de ERs com precisão. Isso implicava na necessidade de aplicar técnicas avançadas de cálculo, como o Método de Análise por Elementos Finitos (MEF).

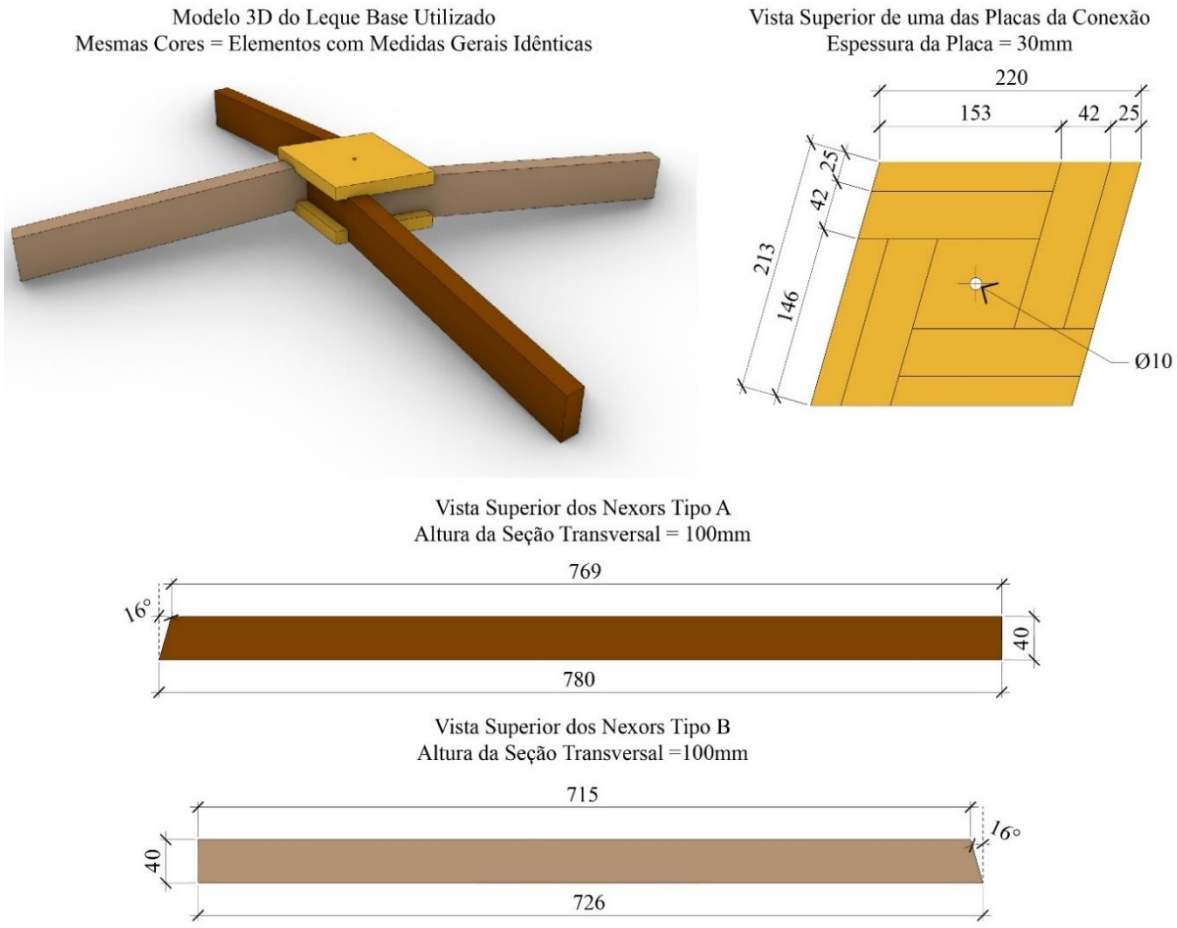
Dessa forma, o MEF foi empregado em dois grupos de **Modelos** distintos que se complementam: i) **Modelos** tridimensionais compostos por elementos tetraédricos de um único leque, com quatro nexors e a geometria complexa das conexões. Isso foi feito com uso do software ANSYS, tendo os resultados corroborados por ensaios físicos e; ii) **Modelos** tridimensionais compostos por elementos de barras lineares para os arranjos globais da estrutura, com elementos fictícios para conceber as conexões, utilizando o plugin Karamba3D para Grasshopper. O papel do primeiro grupo de **Modelos** foi de validar os elementos fictícios utilizados no segundo, que tinha o propósito de investigar as configurações gerais das ERs (CASTRIOTTO *et al,* 2021). Além disso, os **Modelos** da Série Paralela estão diretamente relacionados com as investigações e processos que embasaram a **Instância**.

A utilização de cada software foi essencial, pois o ANSYS não está integrado no processo de modelagem paramétrica-algorítmica utilizada, e requer muito processamento computacional para analisar toda uma estrutura composta por sólidos e volumes. Por outro lado, o Karamba3D está integrado ao Grasshopper, e por isso, foi incorporado ao algoritmo desenvolvido. No entanto, sua limitação é a impossibilidade de analisar geometrias tridimensionais complexas, como é o caso da conexão Tipo Morsa (CASTRIOTTO *et al,* 2021).

Conforme apresentado no capítulo 6, as bases de cálculo utilizadas para as verificações estão presentes na NBR 7190 (ABNT, 2022), no livro de Pfeil e Pfeil (2010) e no guia do Eurocode 5 (PORTEOUS e ROSS, 2013). Além disso, por conta de características específicas da **Instância**, como a aplicação de materiais de reuso, sem avaliações específicas das espécies de madeira ou do nível de manutenção das propriedades mecânicas, foram adotados valores de referência. Os valores característicos para os esforços de tração ($\mathbf{f_{t,k}}$), compressão ($\mathbf{f_{c,k}}$), cisalhamento ($\mathbf{f_{v,k}}$), constantes elásticas ($\mathbf{E_{c,0}}$ e $\mathbf{G_{c,0}}$), e a densidade aparente, a 12% de umidade ($\boldsymbol{\rho_{ap}}$) são apresentados na Tabela 8. O modelo do leque utilizado em simulações e ensaios é

apresentado na Figura 84. O peso médio da parte inferior da conexão foi de 722g e da parte superior 689g, a média do peso dos nexors foi de 1,905kg, os conjuntos de arruelas e porcas tinham 25g e as barras roscadas 60g. O peso médio de um leque isolado foi de, aproximadamente, 3,4kg.

Figura 84: Modelo tridimensional do leque e vistas superiores dos nexors e das conexões, com as dimensões gerais em milímetros.



Fonte: CASTRIOTTO *et al,* 2021, p. 11.

Tabela 8: Materiais e valores de referência das propriedades mecânicas, utilizados para as simulações dos **Modelos** da Série Paralela.

Materiais	$f_{t,k}$ **(MPa)**	$f_{c,k}$ **(MPa)**	$f_{v,k}$ **(MPa)**	$E_{c,0}$ **(MPa)**	$G_{c,0}$ **(MPa)**	ρ_{ap} **(kg/m³)**
Abeto (C24)	14,00	21,00	2,60	11000	716	350
Compensado	27,60	31,00	1,72	8200	586	400

Fonte: CASTRIOTTO *et al,* 2021, p. 9.

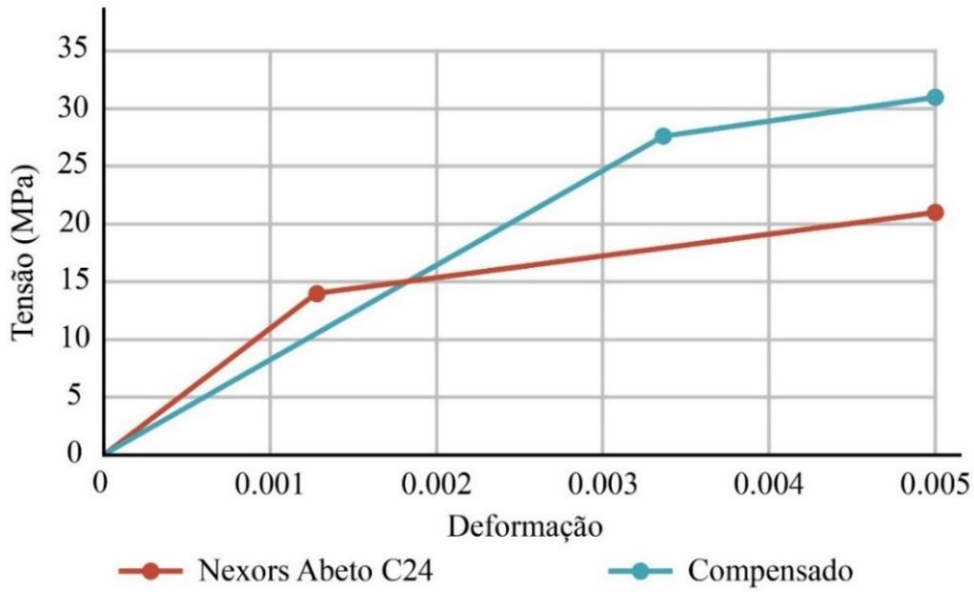
Para os coeficientes de modificação, foram adotados os valores para o caso de cargas permanentes ($\mathbf{K_{mod1} = 0,6}$) e classes de umidade 1 ou 2 ($\mathbf{K_{mod2} = 1,0}$). Isso significa que o valor de $\mathbf{K_{mod}}$, utilizado nas simulações, foi de **0,6**. Os valores dos coeficientes de minoração utilizados foram, para compressão $\boldsymbol{\gamma_c = 1,4}$ e para tração e cisalhamento $\boldsymbol{\gamma_t = \gamma_v = 1,8}$. O coeficiente de fluência adotado foi $\boldsymbol{\varphi = 0,8}$.

7.3.5.1. Modelos estruturais de um leque com as conexões Tipo Morsa

Conforme os **Modelos** da Série 4, a conexão Tipo Morsa apresentou características interessantes do ponto de vista estético, geométrico, de fabricação e de montagem. Contudo, ainda pairavam incertezas sob o ponto de vista de desempenho estrutural. Com o propósito de encontrar valores representativos das constantes elásticas a serem utilizadas pelos elementos fictícios no modelo de barras, foi adotado um processo de ajustes e refinamentos, comparando o comportamento dos elementos fictícios com os resultados obtidos pela simulação do modelo sólido das conexões. Para isso, foi aplicada uma carga de 2,0 KN (200 Kgf) transversalmente em uma janela de um leque de uma ER, para verificar os resultados de deslocamentos e tensões máximas. Este processo considerou as tensões máximas nas barras e o deslocamento vertical do leque para ajustar as constantes elásticas dos elementos fictícios. Além disso, o nível de tensão de cisalhamento e a distribuição dos esforços foram avaliados para verificar a adequabilidade estrutural da conexão (CASTRIOTTO *et al,* 2021).

A avaliação MEF dos elementos sólidos utilizou propriedades elasto-plásticas dos materiais para os nexors e para a conexão Tipo Morsa. O Gráfico 5 apresenta os diagramas de tensão de deformação da madeira, levando em consideração a menor resistência axial como limite de escoamento e a maior resistência como tensão última. A equivalência das deformações relativas à tensão de escoamento foi obtida a partir do Módulo de Young, enquanto à tensão última foi baseada em um valor de referência para madeira (CASTRIOTTO *et al,* 2021).

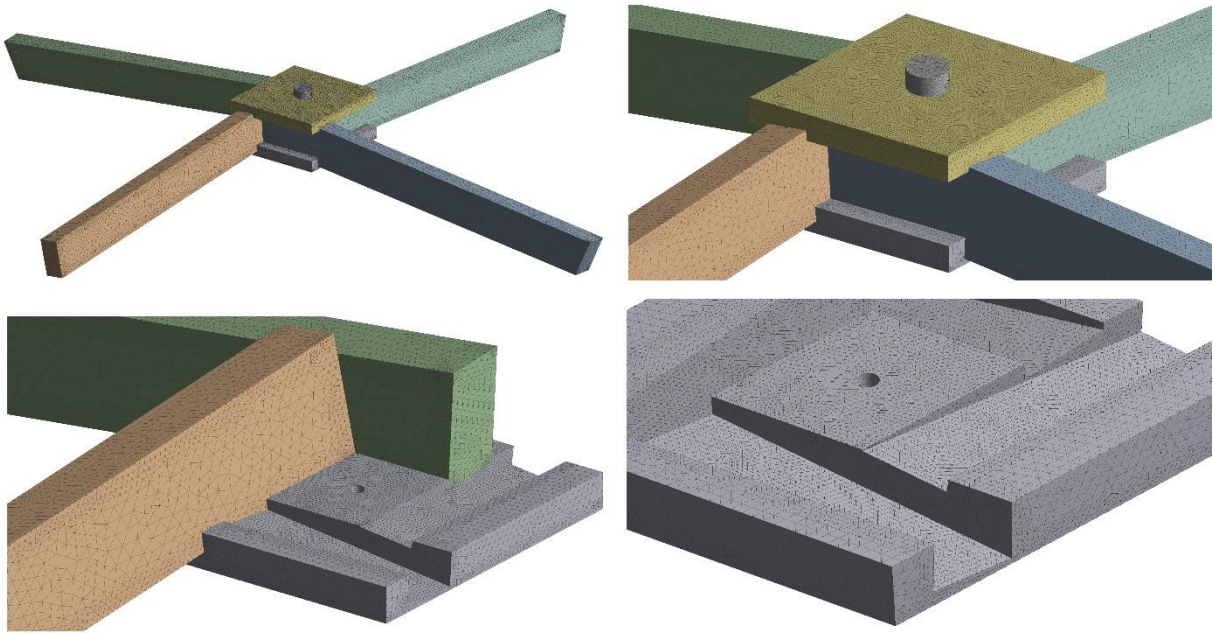
Gráfico 5: Valores de tensões e deformações elasto-plásticas dos nexors C24 e as conexões feitas em compensado de madeira.



Fonte: CASTRIOTTO *et al,* 2021, p. 10.

Ainda para a simulação MEF de sólidos, foi gerada uma malha poliédrica usando um elemento finito estrutural tetraédrico de 10-nós para discretizar a geometria (Figura 85). Esse elemento foi composto por, aproximadamente, arestas de 5mm e um total de 1.568.796 nós, o que correspondeu a 7.706.388 graus de liberdade. Refinamentos na malha foram feitos nas arestas e nas regiões de contato entre os diferentes elementos, uma vez estas poderiam ser áreas de concentração de tensões. A malha gerada considerou capacidades de contato sem atrito entre os nexors, as placas de compensado e a barra metálica, modelada por elementos de contato. As extremidades dos nexors fora da região do leque analisado foram apoiadas nas bordas inferiores. A malha poliédrica foi gerada automaticamente pelo ANSYS, utilizando como entradas o modelo geométrico do leque e informações referentes às áreas de refinamento da malha.

Figura 85: Modelo utilizado nas análises tridimensionais de um leque de uma ER com a conexão Tipo Morsa. A imagem contém quatro níveis de ampliação do leque, dando enfoque na metade inferior da conexão para demonstrar o refinamento da malha.

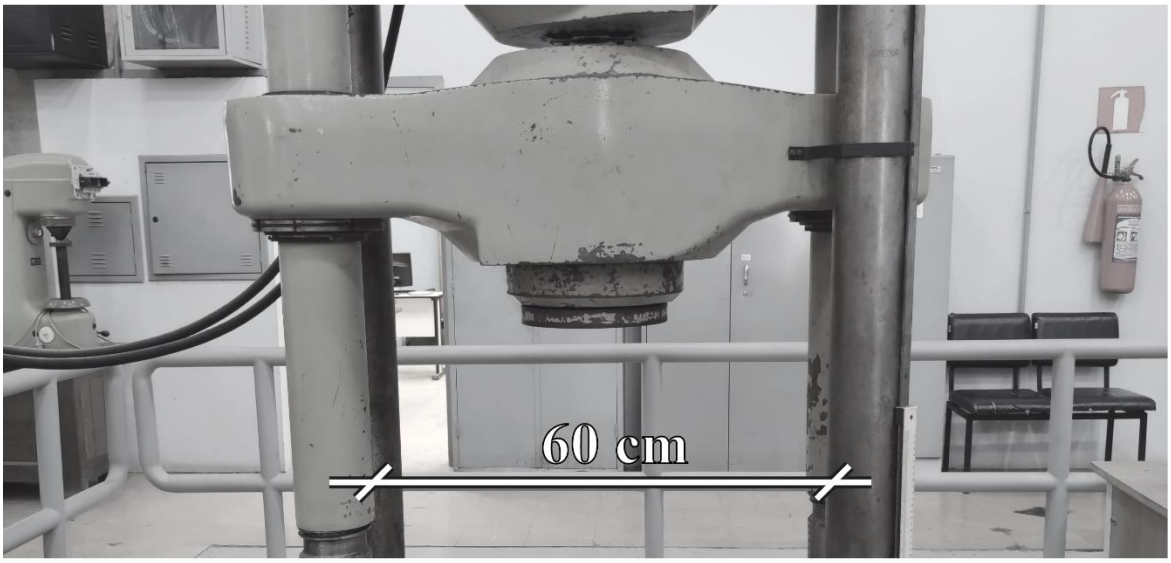


Fonte: CASTRIOTTO *et al,* 2021, p. 11.

Por se tratar do desenvolvimento de um novo sistema de conexões, era fundamental verificar a confiabilidade dos resultados virtuais em comparação com o desempenho físico. Para isso, foram feitos testes mecânicos em seis corpos de prova distintos, utilizando a Prensa Universal de Ensaios do laboratório de estruturas da FECFAU. Apesar de os resultados obtidos estarem detalhados no Capítulo 8, é importante mencionar que houve, em certos aspectos, comprovação de que as simulações virtuais correspondiam ao comportamento físico das conexões. Essa verificação é observada, principalmente, no padrão de deformação do leque e nos valores obtidos para deslocamento e resistência.

A realização dos ensaios mecânicos em um leque demandou um planejamento específico, apresentando dois obstáculos principais. A explicação de um deles é mais detalhada no próximo Capítulo (Seção 8.3.1), uma vez que está associada à forma de registro das forças aplicadas sobre a conexão e, consequentemente, tem impacto sobre os resultados obtidos. O outro era relacionado com a área de utilização da Prensa Universal, mais especificamente com a restrição de, aproximadamente, 60 centímetros entre os elementos verticais que fazem parte da estrutura do equipamento (Figura 86).

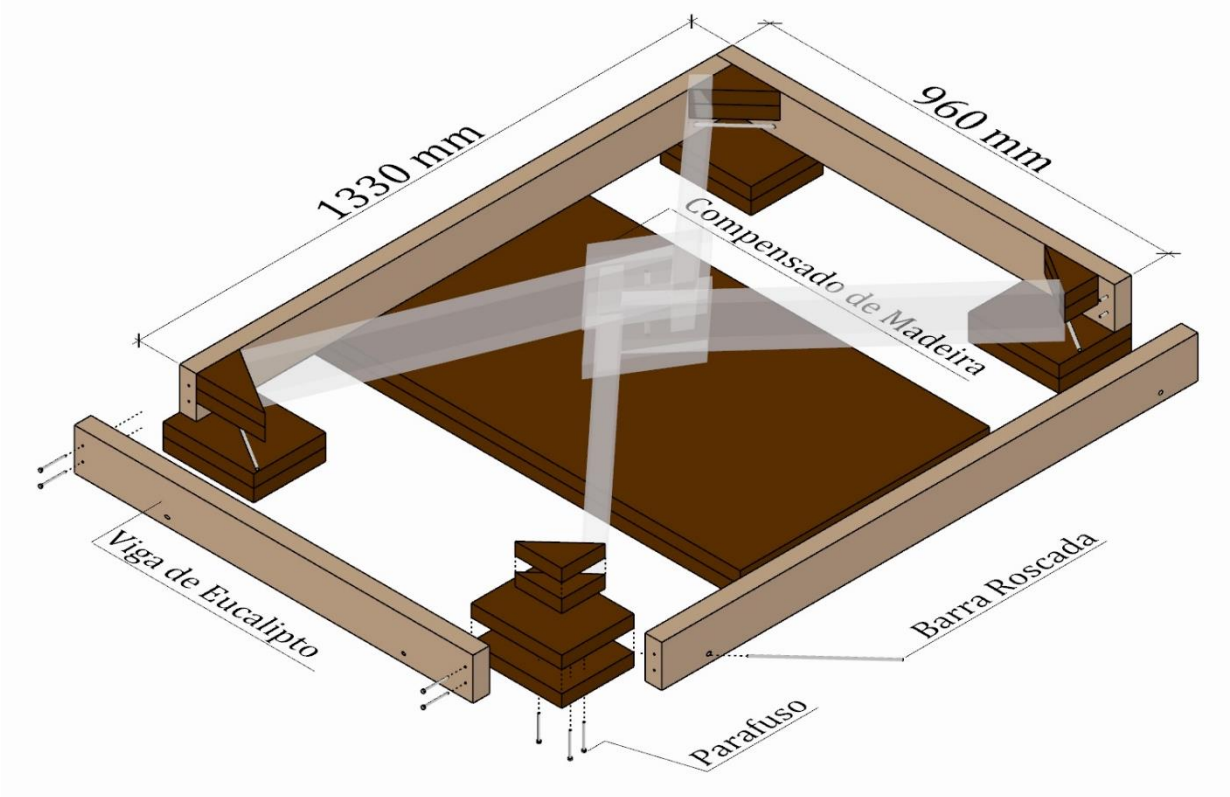
Figura 86: Vista da Prensa Universal, destacando a distância livre de 60 cm entre os elementos verticais da estrutura do equipamento.



Fonte: acervo pessoal, 2022.

Esse segundo fato indicou a impossibilidade de apoiar o leque diretamente sobre a mesa da Prensa Universal. Foi necessário criar uma estrutura secundária que pudesse ser montada e desmontada no local dos ensaios, e que auxiliasse no suporte, posicionamento e travamento do leque no local correto. Tratou-se de um quadro feito com quatro segmentos de vigas aparelhadas de eucalipto (4,5 x 10 cm de seção transversal), aparafusadas nas extremidades e com duas das vigas fixadas sobre duas placas de compensado de madeira sobrepostas, com medida equivalente à largura disponível para os ensaios e comprimento um pouco maior do que a largura do quadro (60 x 105 cm, respectivamente), também conectadas por parafusos. Nos quatro cantos do quadro foram fixadas barras roscadas diagonalmente que reforçam a conexão e o travamento das vigas. Também foram fixadas pequenas placas de compensado de madeira na parte inferior, que dão suporte para os gabaritos (Figura 87).

Figura 87: Perspectiva parcialmente explodida do quadro utilizado nos ensaios mecânicos, com as medidas gerais de comprimento e largura.



Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Para colocar o quadro na Prensa Universal, foi necessário primeiro alocar as placas centrais de compensado de madeira sobre a mesa de ensaios, fixando o conjunto de três vigas do quadro, previamente conectados. Com esse passo feito, a quarta viga foi parafusada no quadro e as barras roscadas foram inseridas e rosqueadas, completando o sistema da estrutura auxiliar. O posicionamento dos leques no quadro também foi feito em etapas. Apenas três nexors eram conectados inicialmente, com folgas nas conexões Tipo Morsa, e posicionados sobre o quadro. A partir disso, o quarto nexor era inserido no sistema de conexão, que era apertado e travado. Nos cantos entre os quadros e os nexors, foram utilizados elementos que funcionavam como gabaritos para o posicionamento do leque de forma correta. Com esse processo concluído, a Prensa Universal podia ser acionada (Figura 88). Foram aplicadas forças verticais de forma gradual sobre as conexões, até atingir o colapso. Esse processo foi repetido um total de seis vezes e os resultados estão presentes no Capítulo 8.

Figura 88: Quadro inserido na Prensa Universal para ensaios mecânicos das conexões.

Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

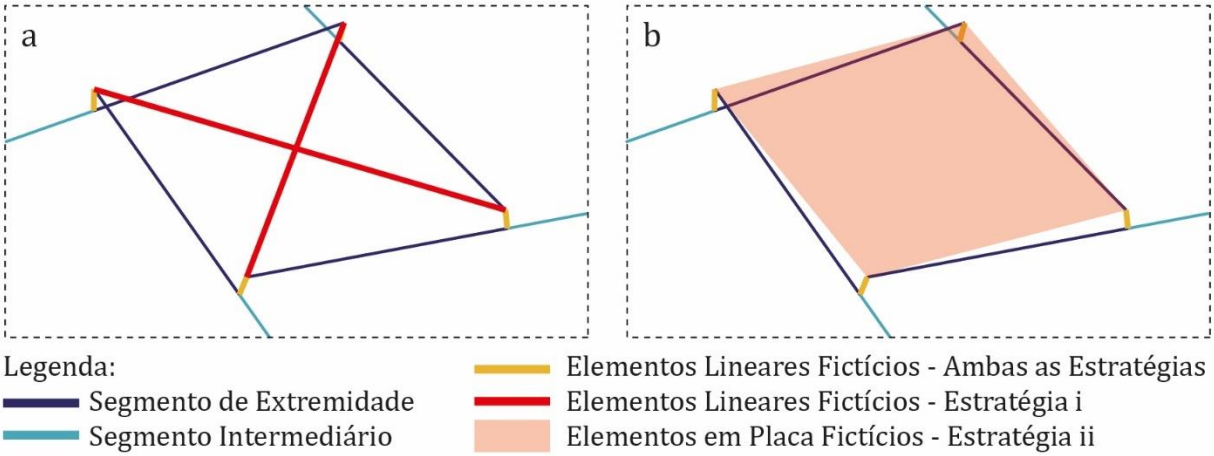
7.3.5.2. Abstração das conexões Tipo Morsa em elementos fictícios

O processo de abstração das conexões tridimensionais em elementos lineares partiu da ideia de simplificar o comportamento estrutural complexo em um comportamento de molas. Para que isso fosse viável, era necessário um conjunto de informações relativo às propriedades geométricas e mecânicas das conexões. Tendo em mente os resultados obtidos por simulação e pelos ensaios físicos, também foi possível assumir que o principal objetivo das conexões era de transferir os esforços entre nexors e que, comparativamente aos casos sem o uso das conexões, há um enrijecimento dos leques, em um comportamento similar ao de contraventamentos, mas localizados apenas nos leques.

Do ponto de vista geométrico, o principal desafio era o de encontrar uma estratégia que funcionasse para os dois pressupostos mencionados. Em um primeiro momento, foram exploradas duas abordagens distintas: i) somente com o uso de elementos lineares de barras, conectando as extremidades dos nexors posicionados no mesmo sentido com uma linha (Figura 89a) e; ii) o uso combinado de elementos lineares com um elemento em placa, com uma malha

simples (uma única célula) fazendo a ligação entre as extremidades dos nexors (Figura 89b). Em ambos os casos, cada um dos quatro nexors foi modelado a partir da linha que representava o respectivo eixo longitudinal, enquanto outras quatro linhas foram utilizadas para conectar pares de nexors distintos e que estivessem posicionados ortogonalmente. Essas linhas foram admitidas como elementos fictícios lineares nos dois casos.

Figura 89: Estratégias de abstração das conexões em elementos fictícios, compostas por i) apenas elementos lineares e ii) combinação de elementos lineares com placas.



Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

As simulações MEF dos elementos lineares foram consideradas de comportamento elástico, com o mesmo módulo de Young da madeira. Para isso, os nexors foram considerados como idênticos aos utilizados nos testes físicos e nas simulações. Isto é, foram imbuídos com as mesmas propriedades de material, dimensões de seção transversal e de comprimento. As linhas que representam os eixos foram subdivididas em vários segmentos, com o intuito de melhorar a precisão dos elementos finitos. Os elementos fictícios lineares foram imbuídos com propriedades de mola em todos os seis graus de liberdade (três translações e três rotações), com valores ajustados numericamente. Os elementos fictícios em placa utilizaram constantes elásticas do compensado de madeira e o ajuste numérico foi utilizado para definir a espessura do elemento. Os processos de ajustes numéricos de rigidez e espessura foram feitos a partir dos resultados de tensões e deslocamentos máximos obtidos pelo MEF do modelo sólido tridimensional, feito no ANSYS (CASTRIOTTO *et al,* 2021).

Com base nos resultados obtidos pelas duas simulações (apresentados no próximo capítulo), ficou evidente que o comportamento do leque constituído somente por elementos fictícios lineares com comportamento de mola (primeira estratégia) era mais próximo do comportamento simulado no ANSYS. Com as constantes dos elementos fictícios calibradas, foi possível realizar simulações de desempenho e comportamento estrutural com diferentes arranjos globais de ERs.

7.3.5.3. Modelos estruturais de barras dos arranjos globais

Os **Modelos** compostos por elementos lineares, processados pelo Karamba3D, podem ser separados em dois estágios distintos: pré-simulação e pós-simulação. Um é referente à combinação das informações geométricas, propriedades dos materiais e aplicação de equações definidas na literatura para ajuste de tensões e valores de resistência. O outro é relacionado com os resultados obtidos e, portanto, é apresentado no próximo capítulo. Resumidamente, esse estágio contém dados visuais e numéricos providos pela simulação, além do processamento dessas informações por equações de verificação de tensões limites e por Índices de Projeto.

Com relação ao estágio pré-simulação, foram utilizados componentes do próprio Karamba3D, definindo as seguintes variáveis de entrada para as simulações: a) materialidade, b) seção transversal; c) conversão de linhas em barras; d) pontos e tipos de apoio e; e) forças externas. Além disso, os dados foram associados às equações 1 a 15, também implementadas no algoritmo, para a definição das tensões resistentes.

a) Os mesmos dados utilizados para as simulações MEF dos sólidos foram inseridos no ambiente do Grasshopper, conforme a Tabela 8. Como foi adotada a estratégia de abstração das conexões, o único material considerado foi a madeira da classe C24 para os nexors. Neste caso, foram considerados os valores efetivos dos módulos de elasticidade nos sentidos paralelo ($\mathbf{E_{ef}}$) e transversal ($\mathbf{G_{ef}}$) às fibras;

b) Com base na Saída A do algoritmo, as dimensões de altura e largura foram definidas pelas variáveis **N_h** e **N_t**. A orientação das seções transversais foi estabelecida pelos vetores correspondentes aos eixos de rotação dos nexors (**N_ar**);

c) Foram utilizadas as linhas que conformam os eixos nos nexors ($\mathbf{L_U.lf_{TU}}$ e $\mathbf{L_V.lf_{TV}}$) como vigas e as linhas que constroem os elementos fictícios que representam as conexões como molas, ambas definidas pela Saída A do algoritmo (modelo de barras). As linhas dos eixos dos nexors foram subdivididas em diversos segmentos (até 20), para aumentar o grau de refinamento do modelo estrutural;

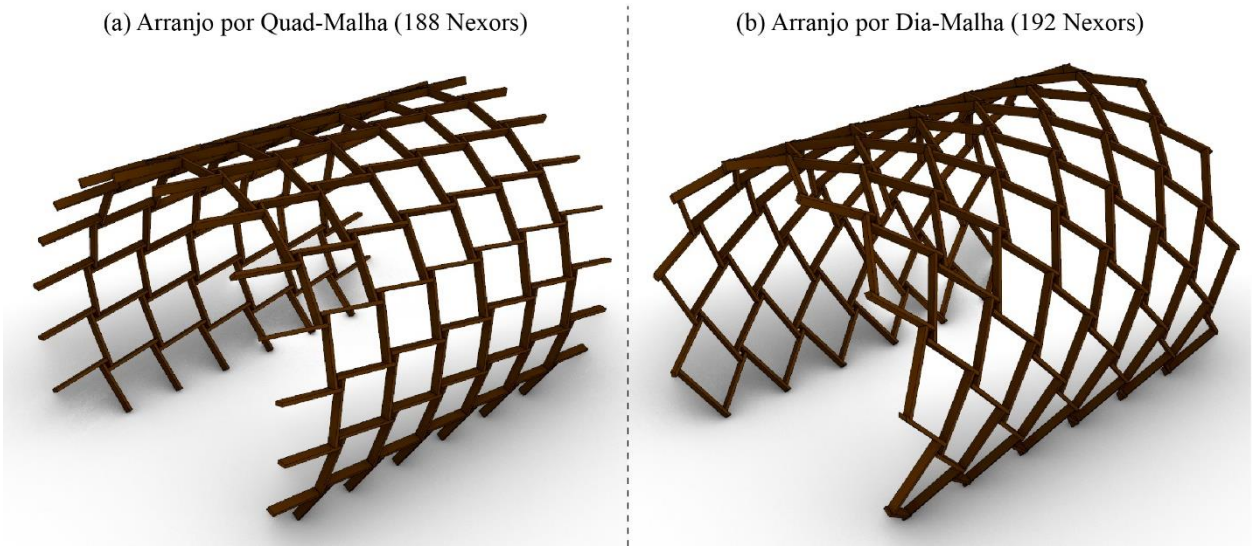
d) Os pontos de suporte da estrutura foram definidos como as extremidades dos nexors que estão mais próximas da superfície que representa o relevo. Os apoios foram considerados como rotulados, isto é, impedindo a translação e liberando a rotação em todas as direções;

e) Com relação aos esforços, inicialmente foi considerado apenas o efeito da gravidade (peso próprio). Contudo, também é possível inserir cargas pontuais ou distribuídas sobre as conexões ou nexors.

Com cada uma das variáveis definidas e com as constantes elásticas dos elementos fictícios calibradas, um dos primeiros **Modelos** gerados explorou o comportamento das ERs geradas a partir do processo de discretização da geometria de entrada em quad-malhas. Foi notado que alguns aspectos não estavam bem resolvidos, especialmente com relação à disposição dos nexors das bordas. Resultados preliminares indicavam problemas de desempenho estrutural, que poderiam ser solucionados com uma viga que conectasse os nexors com extremidades livres. Outra possibilidade para solucionar esse aspecto seria alterar o processo de discretização das superfícies de entrada, pela introdução de dia-malhas. De modo geral, essa implementação exigiu modificações simples no algoritmo e a diferença de arranjos gerados é exemplificada pelas Figuras 90a e 90b. Os impactos dos aspectos estruturais, de fabricação e montagem são mais detalhados no próximo Capítulo e pela **Instância**.

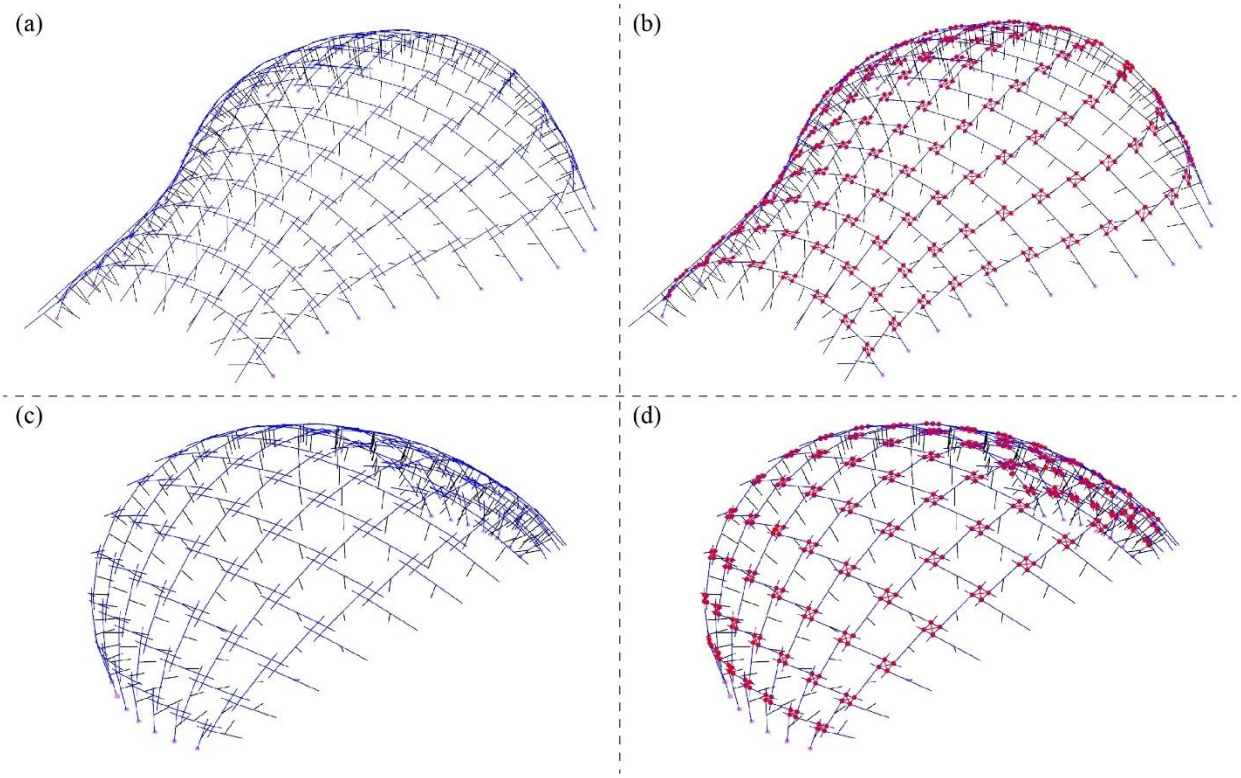
Outro aspecto que foi possível de analisar com os **Modelos** estruturais compostos por barras foi o comportamento e desempenho de arranjos com e sem as conexões. Como base, foram usadas duas das ERs desenvolvidas durante a disciplina AU 254. Em uma versão foi considerado o sistema de encaixes utilizados na oficina e na outra usando a abstração por elementos fictícios. Em ambas, a excentricidade entre os nexors foi desconsiderada, tendo como base as geometrias segmentadas adotadas para os nexors na Série 2 (vistas anteriormente na Figura 63). Os **Modelos** utilizados para as comparações são ilustrados pelas Figuras 91a – 91d.

Figura 90: ERs geradas a partir de arranjos por (a) quad-malhas e (b) dia-malhas. Foram mantidos os valores de ângulos de rotação, nexors das bases e dimensões das seções transversais.



Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

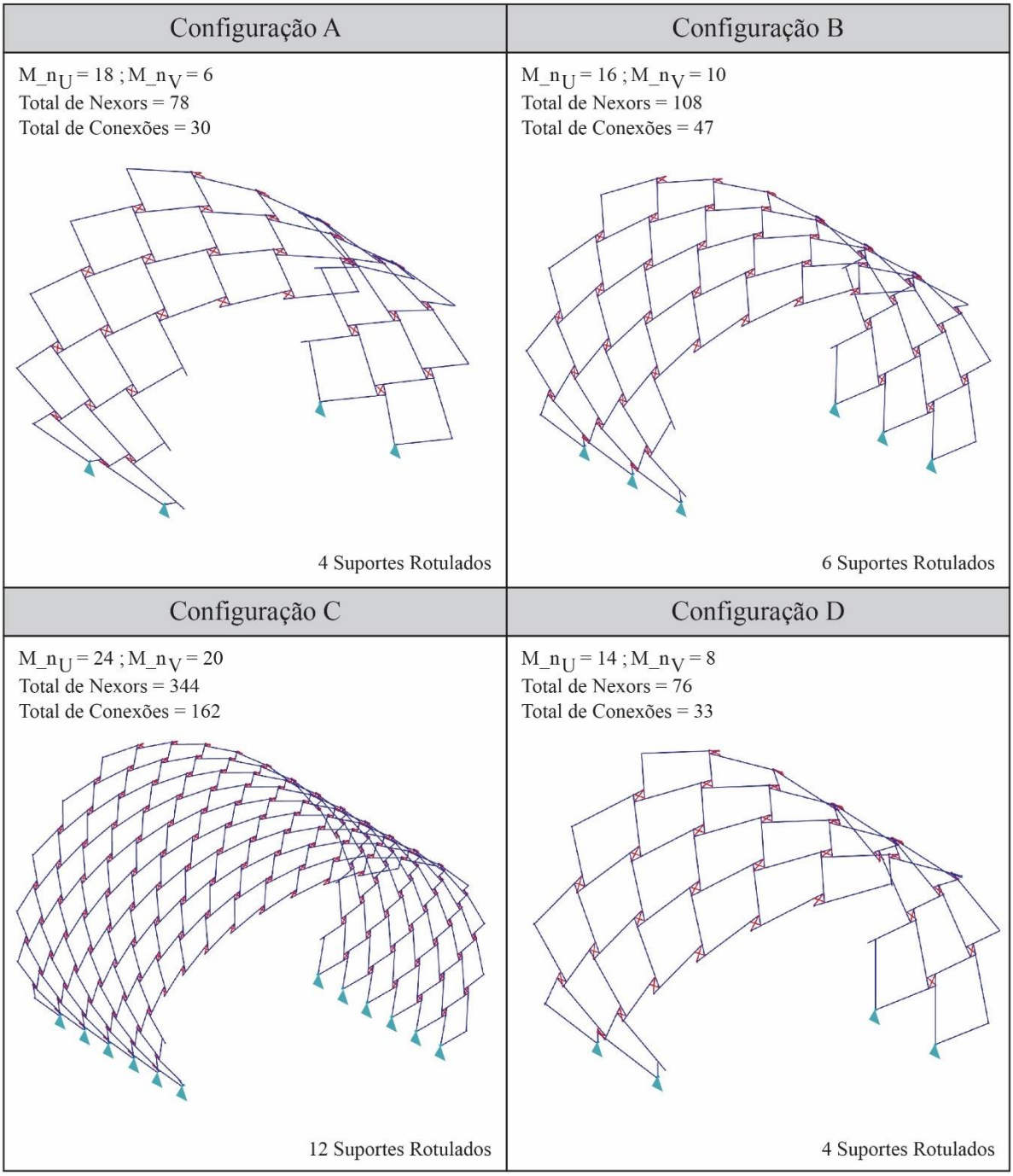
Figura 91: ERs avaliadas com base em dois **Modelos** gerados na disciplina AU 254; (a) modelo do grupo 2 com encaixes e (b) com elementos fictícios; (c) modelo do grupo 3 com encaixes e (d) com elementos fictícios.



Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Por fim, foram gerados quatro **Modelos** de barras (Figuras 92a - 92d) para serem simulados no Karamba3D. Esses **Modelos** estão relacionados com o desenvolvimento da **Instância** e tem como base as geometrias apresentadas anteriormente, na Figura 83.

Figura 92: Quatro configurações diferentes de ERs em **Modelos** de barras (a, b, c, d), geradas pelo algoritmo. As geometrias são baseadas nos **Modelos** geométricos do final da Série 4.



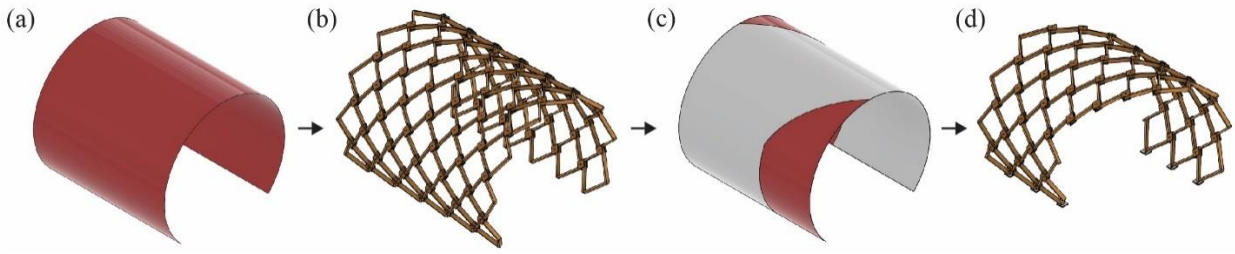
Fonte: CASTRIOTTO *et al,* 2021, p. 12. Textos traduzidos pelo autor.

7.4. INSTÂNCIA: FACILIDADE DE FABRICAÇÃO E MONTAGEM

A **Instância** foi fundamentada pelo **Construto**, gerada pelo **Método** e embasada nos **Modelos**. Tratou-se da construção de uma ER como prova de conceito para verificar processos e viabilidade de fabricação e montagem, além de testar as conexões, tendo como principais objetivos explorar e compreender: i) o uso de resíduos de madeira como variável de projeto; ii) a funcionalidade do algoritmo; iii) a produção das conexões e nexors; iv) o comportamento físico-estrutural em uma estrutura em escala real e; v) os processos de montagem e desmontagem. Devido ao amplo número de variáveis relacionadas com o projeto, foi necessário estabelecer um conjunto objetivo de condicionantes. Isto foi definido como: a) o tamanho do pavilhão não deveria ser muito grande devido à limitação de pessoas para montagem e desmontagem; b) a geometria não deveria ser muito complexa, pois seria a primeira estrutura em escala 1:1 gerada pelo algoritmo e, ao mesmo tempo, construída com o novo tipo de conexão desenvolvido nesta tese, além da aplicação com material de reuso; c) a quantidade de material disponível deveria ser levada em consideração e; d) as conexões deveriam ser geometricamente iguais, pois seriam fabricadas manualmente (mais detalhes acerca desse ponto são apresentados durante a explicação do processo de fabricação das conexões) (CASTRIOTTO *et al*, 2021).

Para atender a todos esses requisitos, a superfície de entrada do algoritmo (**G**) foi definida como uma abóboda estendida, com raio de curvatura fixo em um único sentido (Figura 93a). A partir disso, foram gerados arranjos de ERs sobre toda a superfície, com a variação de parâmetros como o número de subdivisões e ângulo de rotação, exemplificado pela Figura 93b. Em seguida, foram definidas regiões de subtração (Figura 93c), nas quais os nexors e conexões foram removidos de forma iterativa, conforme o exemplo da Figura 93d.

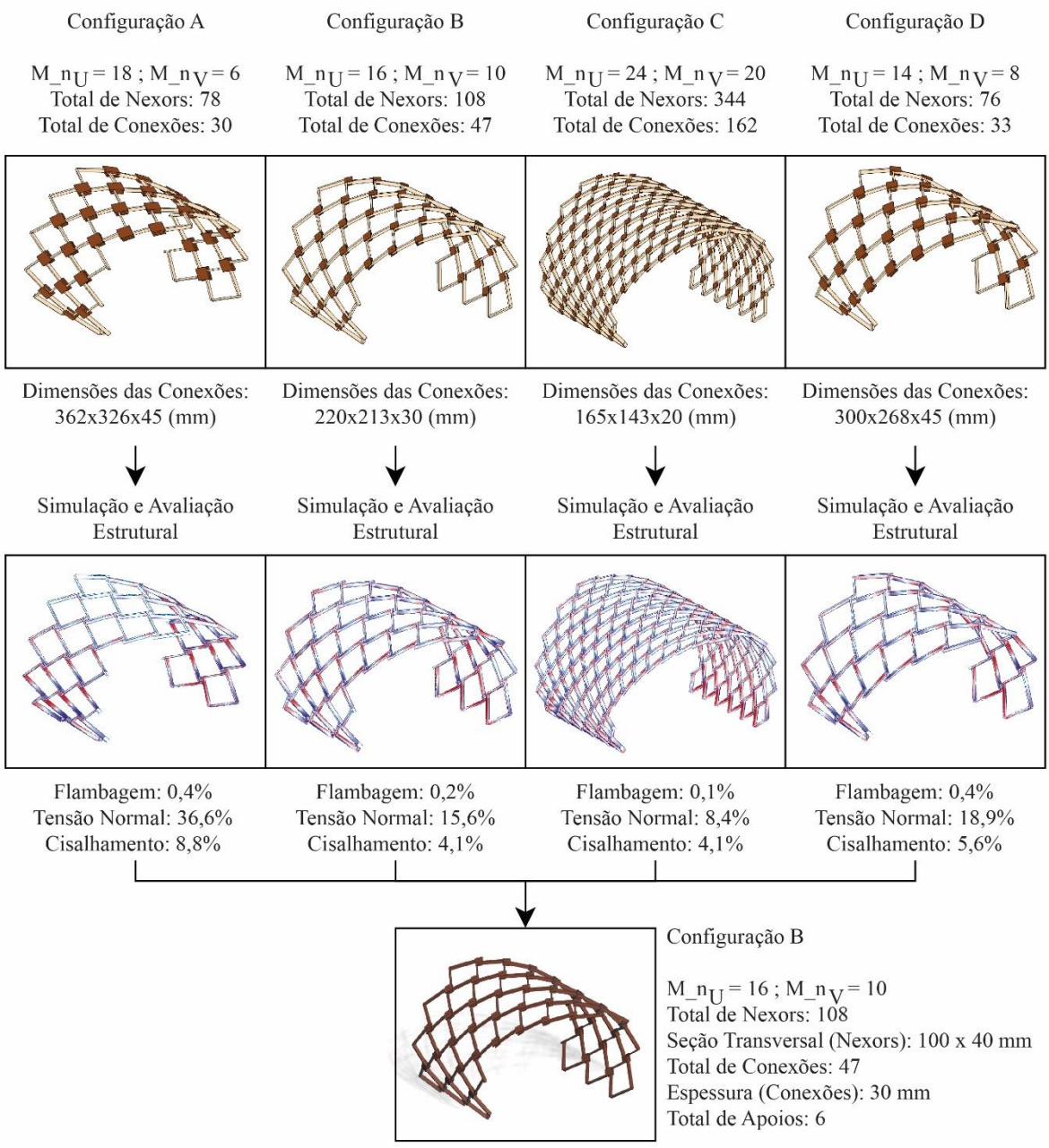
Figura 93: Diagrama do processo de geração das ERs utilizadas nos estudos da **Instância**. (a) geometria base; (b) ER inicial; (c) geometria de subtração e; (d) ER final.



Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Esse processo foi utilizado para a definição das quatro configurações apresentadas no final da Série 4. Estas foram transformadas em **Modelos** de barras (conforme apresentado no final da Série Paralela) e combinadas com o Karamba3D para as simulações e avaliações estruturais, com o intuito de estabelecer qual das variações apresentava melhor desempenho. Isto (Figura 94) resultou em uma ER com geometria esteticamente apelativa, e que, ao mesmo tempo, apresentou uma solução estruturalmente eficiente (CASTRIOTTO *et al*, 2021).

Figura 94: Diagrama com as etapas de desenvolvimento do projeto da **Instância**.



Fonte: CASTRIOTTO *et al,* 2021, p. 17. Textos traduzidos pelo autor.

O projeto definido para a execução da **Instância** foi o da Configuração B, com um total de 108 nexors, com apenas duas geometrias distintas (nexors tipo A e tipo B, conforme apresentado anteriormente pela Figura 84), e 47 conexões idênticas, cada uma composta por duas placas (superior e inferior), barras roscadas metálicas (M10), duas arruelas e duas porcas. A etapa seguinte da **Instância** foi a reivindicação e preparo do material que foi utilizado para a fabricação de todos os componentes. Foram necessários métodos de produção diferentes para cada tipo de elemento, realizados em duas frentes: uma relacionada aos 108 nexors e outra às 47 conexões (CASTRIOTTO *et al,* 2021).

7.4.1. Reivindicação do material

Antes de apresentar os aspectos diretamente relacionados com os processos de fabricação, é fundamental explicitar o tipo de material utilizado na **Instância**. Como explicado no capítulo de revisão da madeira, duas das vantagens é a ciclagem e a possibilidade de aplicação dos 3Rs. Apesar do sistema algorítmico e das conexões aceitarem madeiras de qualquer origem, no momento de desenvolvimento da **Instância** houve a oportunidade de aplicação de madeiras de reuso. Por um lado, isso respondia a demanda que surgiu pela parceria com os pesquisadores da Dinamarca. Por outro, atendia aos pressupostos ambientais e a lógica de reutilização era reforçada pela possibilidade das ERs serem construídas com elementos relativamente curtos, que podem ser, até mesmo, retalhos ou sobras da Indústria.

Dessa forma, foram considerados dois estoques com produtos distintos. Um continha diversos painéis de compensado de madeira, com 15 milímetros de espessura, previamente utilizados como prateleiras de lojas para materiais de arte. Outro era relativo a uma série de colunas-sanduíche de madeira classe C24 (de abeto), com aproximadamente 4,8 metros de comprimento e com seção transversal original de 100 x 42 milímetros, aparafusadas entre si com oito blocos espaçadores. Essas colunas continham diversos furos e elementos metálicos enferrujados, pois foram utilizadas para estruturar um pavilhão, cerca de oito meses antes do início do processo de fabricação da **Instância**. O material estava disposto em caçambas abertas, próprias para descarte de resíduos de construção. Isso significa que a madeira ficou exposta às intempéries por diversos meses, em especial ao tempo úmido e às chuvas frequentes de Copenhague, na Dinamarca (Figura 95a) (BROWNE, LARSEN e CASTRIOTTO, 2021).

Para aproveitar o máximo possível do estoque de madeira proveniente das colunas, foi decidido segmentar o comprimento total, removendo as regiões que faziam interface com os espaçadores, devido à dificuldade de remover os fixadores (Figura 95b). Foram obtidos cerca de 120 elementos mais curtos, com comprimentos variáveis, que foram colocados sobre paletes (Figura 95c), cobertos com um material plástico e deixados ao ar livre para secagem. Em seguida, parafusos e pregos que ainda estavam presentes foram retirados, e a sujeira, os fungos e outros agentes presentes foram removidos. Com isso, foi possível iniciar o processo de fabricação dos 108 nexors que compunham a **Instância** (BROWNE, LARSEN e CASTRIOTTO, 2021).

Figura 95: Estoque de madeira C24 utilizado para produção dos Nexors: a) material encontrado em caçambas; b) segmentação das colunas e; c) estocagem das peças sobre paletes.

(a) Último conjunto de colunas-sanduíche encontradas nas caçambas de resíduos de construção

(b) Coluna-sanduíche colocada sobre cavaletes para a segmentação em peças menores

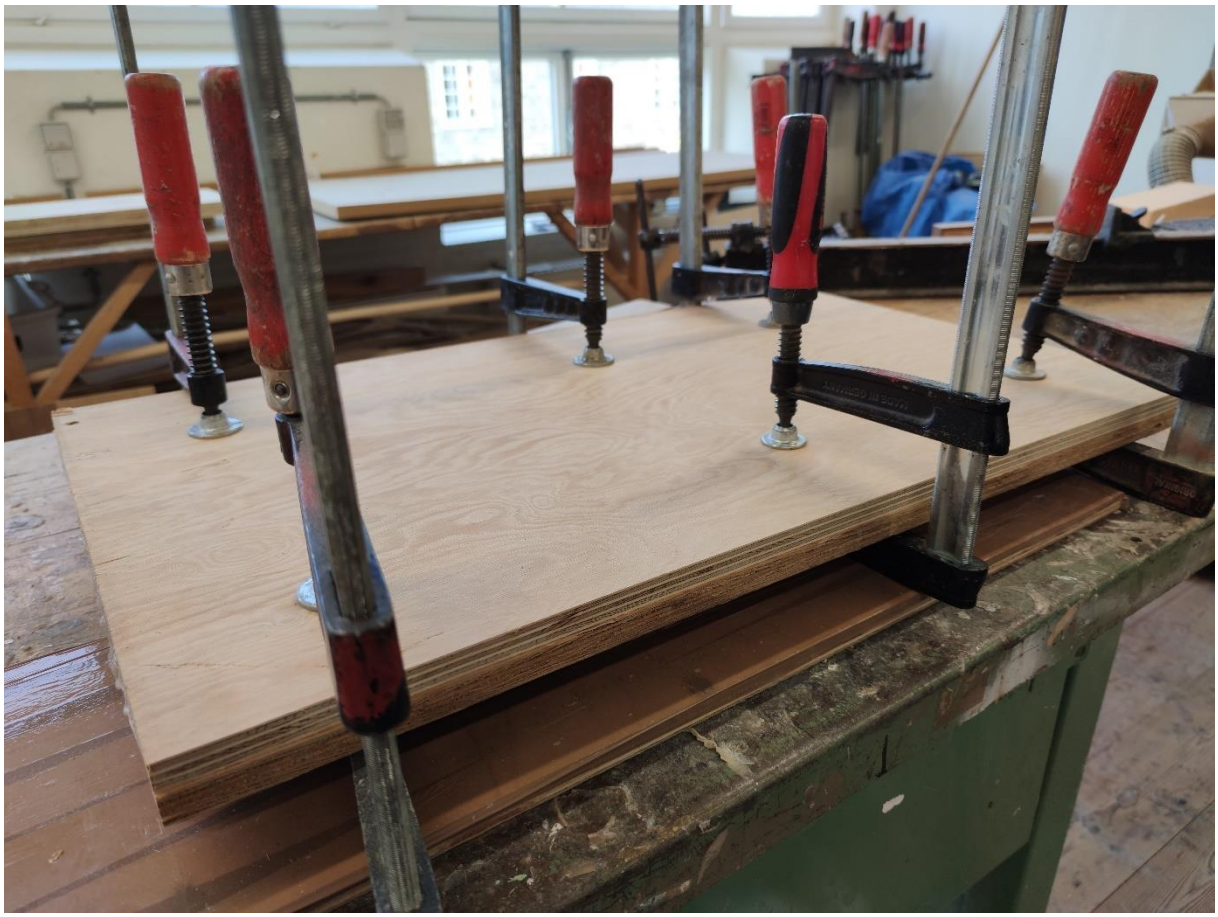
(c) Elementos obtidos a partir dos cortes feitos nas colunas, empilhados sobre um palete

Fonte: acervo pessoal, 2022.

Com relação ao estoque de compensado de madeira disponível, também foram necessários preparos antes de iniciar o processo de fabricação das conexões. Algumas partes, localizadas principalmente nas bordas dos painéis, estavam muito deterioradas e foram removidas. Além disso, a espessura definida em projeto para as placas das conexões era de 30 milímetros, e cada painel tinha apenas 15 milímetros. Por conta disso, pares de painéis foram colados e mantidos

sob pressão com grampos de marcenaria, por pelo menos um dia, para garantir a penetração, fixação e secagem da cola (Figura 96). Esse processo foi repetido algumas vezes, até se obter material suficiente para a produção das 94 placas (superior e inferior) que conformaram as 47 conexões utilizadas no pavilhão.

Figura 96: Processo de colagem de dois painéis de compensado de madeira para conseguir a espessura de 30 milímetros para a produção das conexões.



Fonte: acervo pessoal, 2022.

7.4.2. Fabricação dos componentes

Após o processo de limpeza e secagem da madeira de abeto, o material foi levado para a oficina de carpintaria da KADK para a produção dos nexors. O processo de fabricação foi bastante direto: primeiro, os elementos foram processados por uma aplainadora industrial, para remover as camadas mais externas (mais deterioradas por conta das intempéries), e uniformizar a espessura dos elementos em 40 milímetros. Em seguida, foi utilizada uma serra industrial de mesa, capaz de fazer cortes angulares em dois sentidos (um garantido pela inclinação da própria

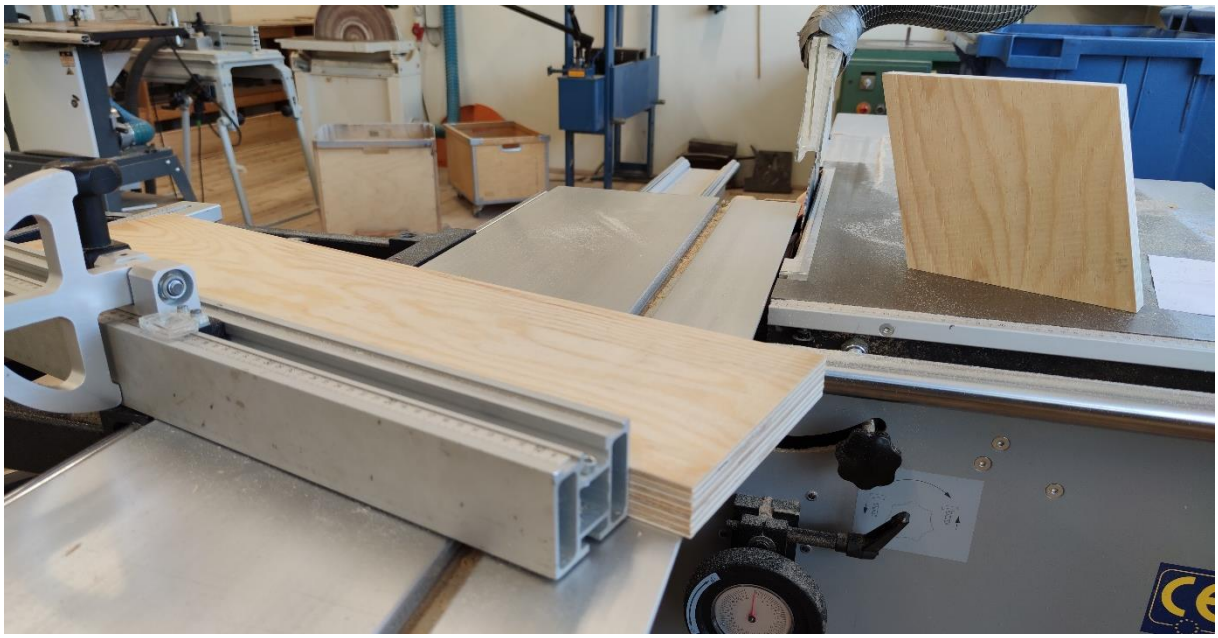
serra e outro pelo posicionamento do material), definindo a forma final dos Nexors tipo A e B (Figura 97). Cada elemento produzido foi comparado com um gabarito mestre, que continha todas as medidas de projeto dos nexors.

Figura 97: Nexors tipo A e B empilhados sobre um carrinho para serem transportados para a área de montagem da estrutura.

Fonte: acervo pessoal, 2022.

O processo de fabricação das placas das conexões foi mais complexo. Os painéis de compensado de madeira colados foram cortados por uma serra industrial, resultando nas 94 placas em formato de losango (Figura 98). Essas placas foram levadas para uma furadeira de bancada, realizando os furos centrais usados para a passagem das barras roscadas. A etapa seguinte foi a fresagem dos entalhes, com os ângulos e dimensões corretas para a acomodação dos nexors (CASTRIOTTO *et al*, 2021). Contudo, conforme mencionado nas condicionantes da **Instância**, este último processo teve de ser feito manualmente, com o uso de uma tupia.

Figura 98: Corte dos painéis de compensado de madeira, utilizando a serra industrial disponível na oficina de carpintaria da KADK.



Fonte: acervo pessoal, 2022.

Na realidade, a produção de forma manual foi consequência de alguns aspectos interrelacionados; a complexa geometria dos entalhes das conexões, especialmente em decorrência dos ângulos pendulares (**N_θ**), implicava no uso de equipamentos CNC com quatro eixos (presença de um eixo rotacional[19]) ou cinco eixos. Nessas condições, a solução ideal para a produção era a utilização de uma CNC de escala industrial, disponível na oficina de carpintaria da KADK. Para o uso deste equipamento e pelas normas da instituição, era imprescindível a presença de um técnico que auxiliasse no processo. Entretanto, este plano foi sumariamente descartado, uma vez que o contexto de trabalho estava limitado da pandemia de Covid-19; seguindo as recomendações adotadas pela instituição e pela Organização Mundial da Saúde, os técnicos foram temporariamente dispensados do trabalho presencial, logo, não seria possível utilizar o equipamento em questão.

Para emular a produção das conexões por um equipamento de controle numérico, foi encontrada uma alternativa na combinação de tecnologias digitais (impressão 3D) com o esforço manual

[19] Em geral, os softwares CAM restringem a rotação da peça em ângulos específicos, e o eixo é acionado antes do início da fresagem (como é o caso do SRP Player, software CAM da CNC MDX 540). Para criar ângulos complexos, seria necessário um grau de liberdade maior do que esse, possivelmente com alterações feitas diretamente no G-Code.

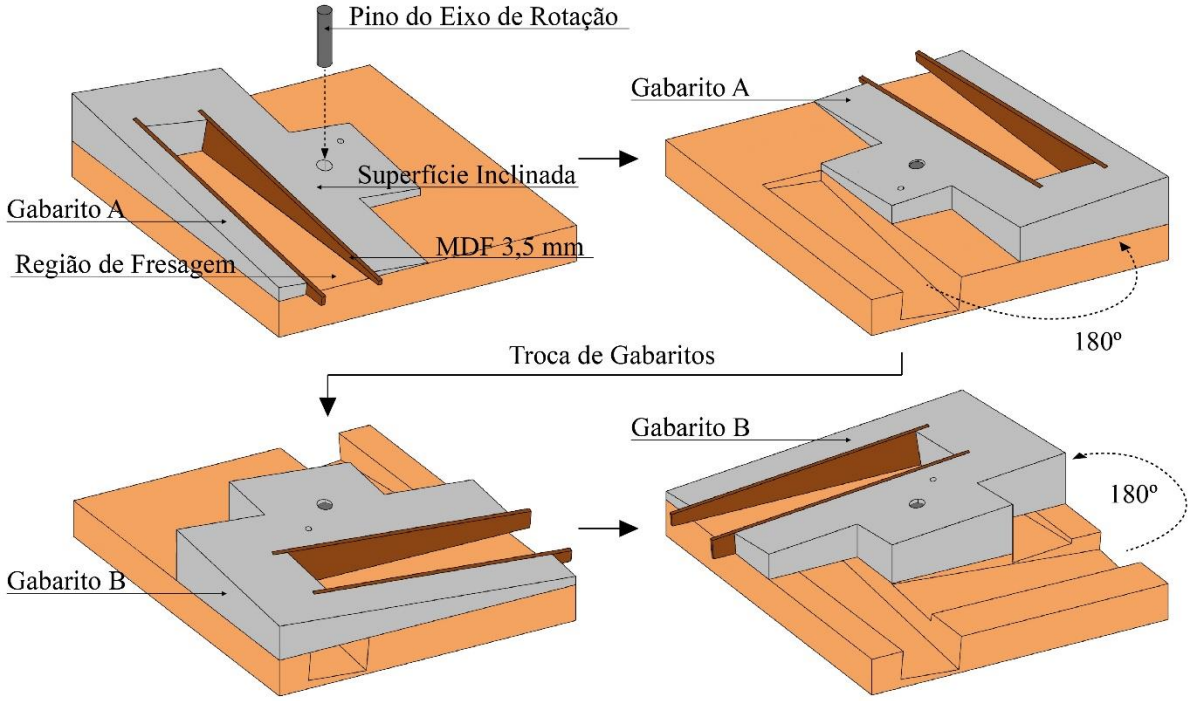
(tupia manual). Para isso, quatro gabaritos foram projetados e confeccionados, tendo a função de realizar a interface entre o modelo digital e o processo de fabricação manual. Esses gabaritos foram impressos em poliácido láctico (PLA), e suas geometrias foram a chave para se obter os ângulos e dimensões de fresagem de forma correta e precisa. Dois gabaritos foram utilizados para a fresagem da placa superior e outros dois para a placa inferior da conexão, sendo que essa possibilidade só existiu pelo fato de todas as conexões serem geometricamente idênticas. Ao mesmo tempo, cada gabarito era utilizado para a fresagem de dois entalhes em uma mesma placa (CASTRIOTTO *et al*, 2021).

O projeto dos gabaritos seguiu seis princípios básicos:

i. A geometria global era correspondente ao negativo dos entalhes das conexões;
ii. A parte inferior deveria ser plana e facear a superfície do compensado de madeira;
iii. A parte superior deveria ser uma superfície angular e inclinada, servindo como suporte para a tupia manual;
iv. As faces internas eram angulares e serviam como guias para a fresa; como o PLA é um material frágil, o processo de fresagem poderia destruir parte dos gabaritos. Para resolver isso, peças descartáveis de MDF, com 3,5 milímetros de espessura, foram inseridas nas paredes internas dos gabaritos, nas quais a fresa se apoiaria;
v. As faces externas eram planas e a sua geometria auxiliaria no processo de posicionamento dos gabaritos;
vi. Um furo central e um pino metálico foram usados para posicionar e girar os gabaritos em 180 graus.

O diagrama a seguir (Figura 99) mostra como os gabaritos foram utilizados na produção de uma placa inferior da conexão. A mesma lógica foi utilizada para as placas superiores (CASTRIOTTO *et al*, 2021).

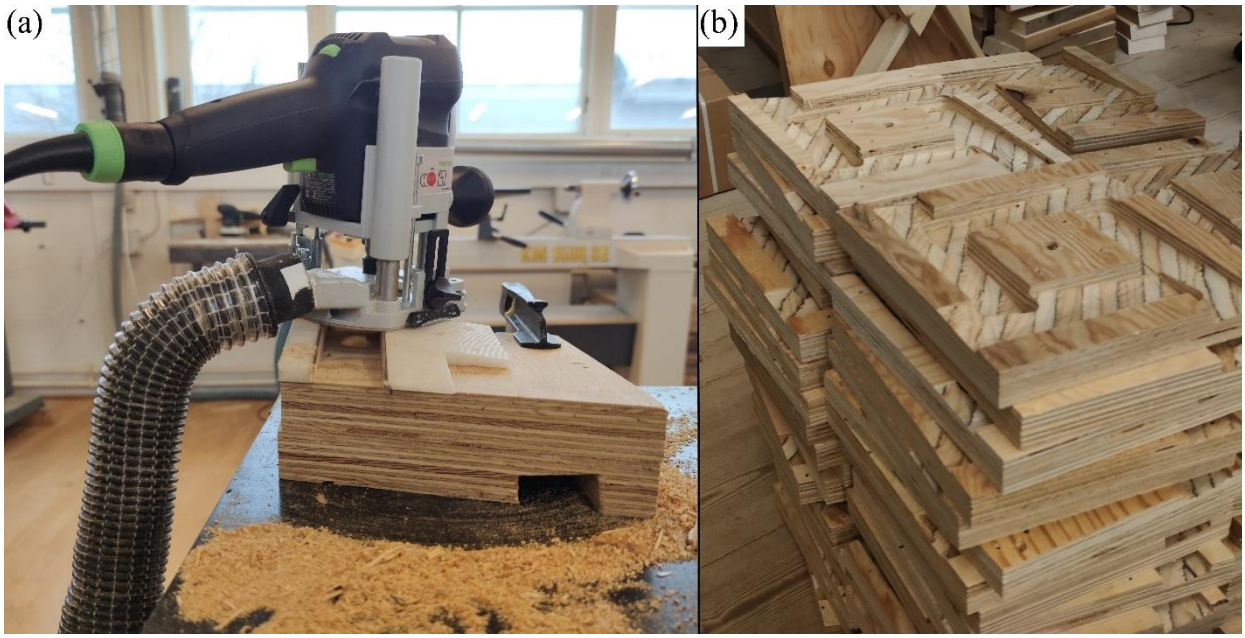
Figura 99: Diagrama de posicionamento e rotação dos gabaritos sobre as placas das conexões.



Fonte: Fonte: CASTRIOTTO *et al,* 2021, p. 18. Textos traduzidos pelo autor

A tupia era posicionada sobre os gabaritos (Figura 100a), removendo o material em níveis, entre 5 e 10 milímetros. Durante esse processo, foi utilizada uma única fresa com um rolamento para a conformação da geometria das 47 conexões (Figura 100b). Ainda durante as etapas de fabricação, mais especificamente após a produção de cinco conexões e 16 nexors, foram iniciados os primeiros estudos e verificações sobre o processo de montagem. Por fim, após a produção de todos os elementos, a estrutura foi montada.

Figura 100: Processo de produção dos entalhes das conexões. (a) Posicionamento da tupia manual sobre um dos os gabaritos e (b) estoque de placas produzidas.

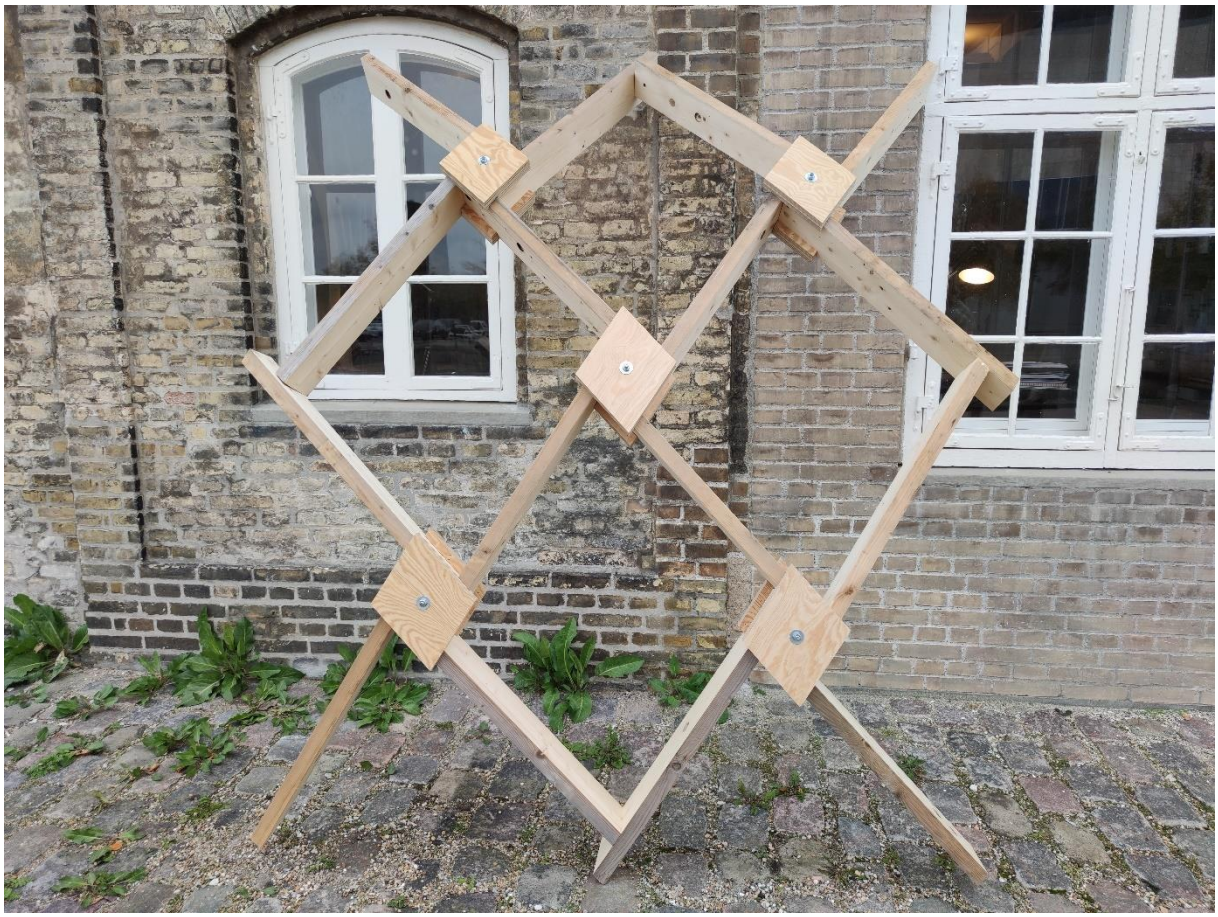


Fonte: acervo pessoal, 2022.

7.4.3. Montagem da estrutura

Um teste inicial foi realizado com a montagem de apenas cinco leques (Figura 101). O objetivo era de ter uma compreensão sobre as abordagens para a construção de toda a estrutura. Foram testadas algumas possibilidades: i) a montagem de leques de forma independente, deixando livre o espaço de um nexor, para a união dos leques posteriormente; ii) posicionamento dos nexors no local correto e fixação das conexões diretamente no local, travando totalmente o sistema e iii) um método incremental, fixando os leques em fileiras, de um lado da estrutura para o outro. Quando uma fileira era concluída, a estrutura inteira deveria ser levantada para a montagem dos próximos leques e assim por diante. Essa terceira estratégia foi a mais bem sucedida em termos de rapidez e facilidade de montagem (CASTRIOTTO *et al*, 2021).

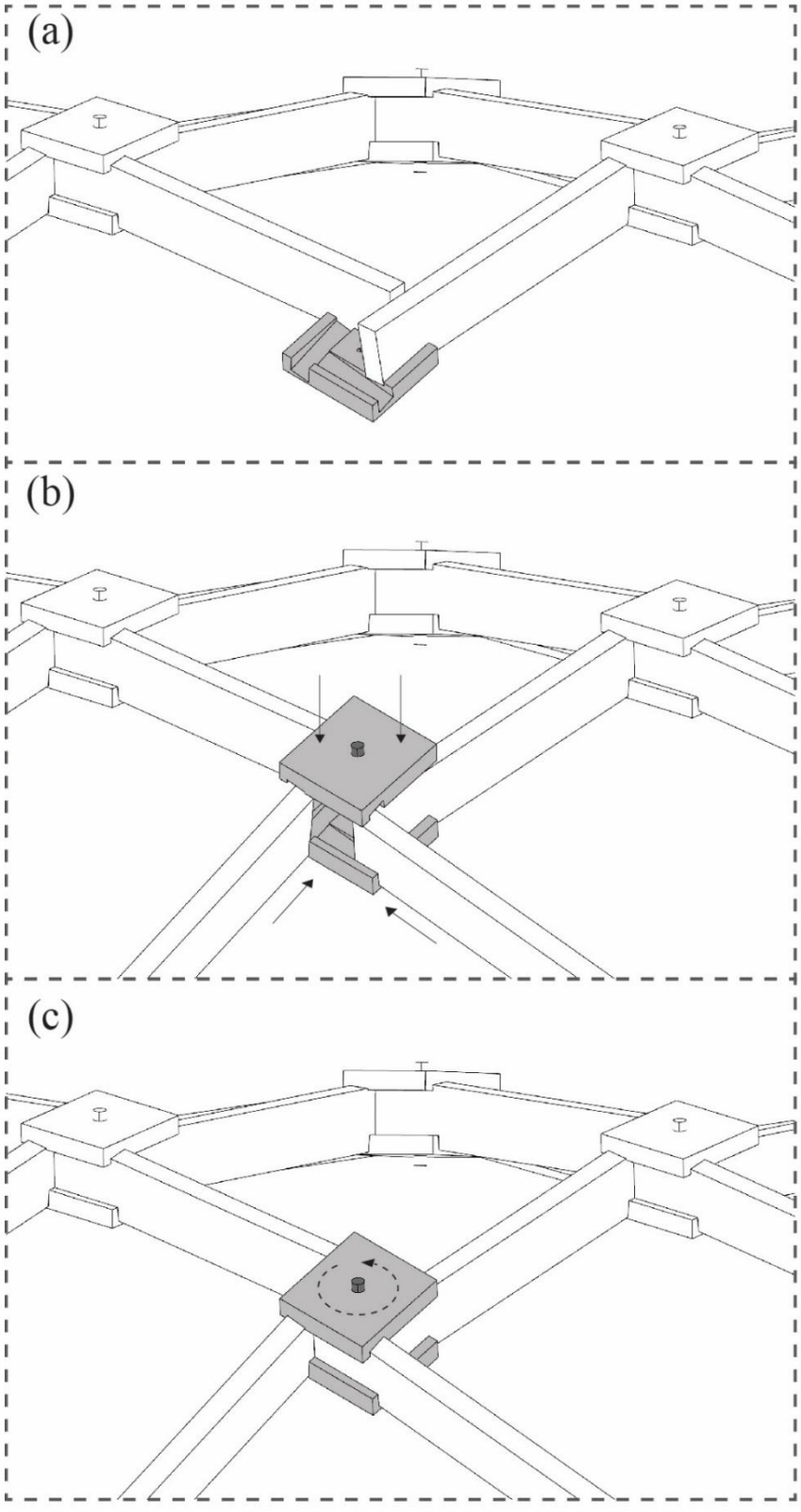
Figura 101: Ensaio de montagem com cinco leques pertencentes à estrutura.



Fonte: acervo pessoal, 2022.

As conexões desempenharam um papel importante para viabilizar essa terceira opção. Com a primeira fileira concluída, cada novo leque que seria montado era composto por dois nexors que já estavam fixados a uma conexão da fileira anterior e outros dois que estavam completamente livres. Para montar o leque, foi necessário certo grau de liberdade de movimento. As placas inferiores das conexões funcionaram como guias, fixando os dois nexors que já faziam parte da estrutura e estavam na posição correta (Figura 102a). Em seguida, a placa superior era colocada no sistema, mas deixando folgas para a movimentação. Dessa forma, os outros dois nexors que estavam livres podiam deslizar para dentro da conexão (Figura 102b). Quando todos os quatro nexors estavam nas posições corretas dos entalhes, a barra roscada era apertada até que nenhuma folga pudesse ser notada (Figura 102c). Foi exatamente essa relação entre liberdade e travamento que viabilizou o processo de montagem (CASTRIOTTO *et al*, 2021).

Figura 102: Diagrama do processo de montagem da estrutura: (a) placa inferior da conexão posicionada abaixo de dois nexors já montados; (b) colocação da parte superior da conexão e fixação de outros dois nexors, utilizando as placas como guias e; (c) a conexão é pressionada e o sistema todo é travado no local.



Fonte: CASTRIOTTO *et al,* 2021, p. 19.

A montagem da estrutura foi feita por apenas duas pessoas, com uso de ferramentas comuns, como chaves de fenda e alicates. Em princípio, isso foi facilitado pelo fato de todos os elementos serem relativamente pequenos e leves, de forma que podiam ser manuseados por uma única pessoa. As fileiras completadas funcionavam como uma estrutura independente (Figura 103a). A cada etapa, era necessário elevar a estrutura alguns centímetros do chão, para que fosse possível montar os próximos leques. Para tentar facilitar o processo, foi introduzido um sistema de alavancas, utilizando um tubo metálico apoiado sobre paletes (Figura 103b). Em uma das extremidades era apoiada a estrutura, enquanto na outra um dos pesquisadores envolvidos no processo fazia o esforço necessário para mover as fileiras montadas. Com isso, era possível alocar alguns paletes sob a estrutura, criando o vão necessário para a trabalhar nos nexors da fileira seguinte (BROWNE, LARSEN e CASTRIOTTO, 2021).

Figura 103: Processo de montagem do pavilhão; (a) início da montagem com a estrutura independente e; (b) sistema de alavanca adotado com um tubo metálico

Fonte: acervo pessoal, 2022.

A finalização da construção foi bastante desafiadora, mesmo com a adoção do sistema de alavanca. Ao todo, foram montadas 15 fileiras de nexors, em um período de, aproximadamente, 30 horas. As conexões funcionaram bem e o resultado foi uma estrutura com quase 3,8 metros de altura e 5,6 x 3,2 metros de comprimento. O pavilhão ficou montado por 10 dias, em uma área a céu aberto da KADK (Figura 104).

Figura 104: **Instância** montada com as conexões Tipo Morsa. Ao fundo está o prédio do Instituto de Arquitetura e Tecnologia da KADK.

Fonte: acervo pessoal, 2022.

De forma simplificada, a desmontagem da ER seguiu as etapas inversas da montagem, demandando apenas algumas poucas horas para ser finalizada. Em seguida, todos os elementos foram colocados sobre um palete e levados para uma área interna para armazenamento (Figura 105). Estes elementos foram utilizados, novamente, para a remontagem da estrutura durante a exposição 70% Less CO2, em 2021.

Figura 105: Todos os elementos da **Instância** armazenados em um prédio da KADK

Fonte: acervo pessoal, 2022.

8. RESULTADOS: CONSOLIDAÇÃO DO ARTEFATO

> *Como tentei enfatizar, no coração da ciência há um equilíbrio essencial entre duas atitudes aparentemente contraditórias – uma abertura a novas ideias, não importando quão bizarras ou contraintuitivas, e o escrutínio mais impiedosamente cético de todas as ideias, velhas e novas. É assim que as profundas verdades são peneiradas do profundo absurdo. O empreendimento coletivo do pensamento criativo e do pensamento cético, trabalhando juntos, mantém o campo (científico) no caminho certo.*
>
> *SAGAN, Carl*[20].

Conforme apresentado no método científico adotado para o desenvolvimento desta tese, existem duas esferas de resultados extraídos a partir do desenvolvimento – os resultados de projeto e a **Teoria Emergente**. Sendo assim, o foco deste capítulo é de apresentar os resultados de projeto, tanto qualitativos como quantitativos, desde o estabelecimento do **Construto** até a finalização da **Instância**. Também são apontadas as principais contribuições científicas, profundamente relacionadas com as temáticas das ERs e suas conexões e do uso de algoritmos em arquitetura, como um método com o potencial de solucionar problemas complexos.

8.1. FUNCIONAMENTO DO ALGORITMO

A criação do algoritmo como **Método** de geração das conexões e das ERs de forma automatizada não só foi fundamental para a obtenção da solução das conexões, mas também é uma parte do que foi definido como o Elo Recíproco. De certo modo, isso indica que parte dos resultados obtidos pelo **Método** foram demonstrados no desenvolvimento dos **Modelos** e da **Instância**. Contudo, há outros aspectos que devem ser aprofundados e apresentados com relação ao funcionamento do algoritmo.

---

[20] SAGAN, Carl. **The Demon-Haunted World**: Science as a Candle in the Dark. 1 ed. Londres: Headline PLC. 1996, p. 287.

O desenvolvimento iterativo e incremental foi importante para encontrar melhores soluções para o funcionamento do **Método**. Nesse sentido, a trifurcação do algoritmo em três saídas distintas permitiu um processo de projeto mais dinâmico, rápido e organizado. Cada uma das saídas pode ser ativada ou desativada de acordo com necessidades específicas, garantindo a possibilidade de uso do algoritmo desde as etapas iniciais do projeto de uma ER e não só para gerar uma solução final dos nexors e das conexões. Por exemplo, a Saída B pode ser utilizada para explorar arranjos geométricos gerais, enquanto as outras duas saídas podem estar desativadas. Já a Saída A pode ser ativada somente quando são almejadas simulações de desempenho estrutural, sem depender do processamento das Saídas B e C.

Conforme descrito na subseção 7.2.5, uma estratégia adotada para reduzir o tempo de processamento foi converter o maior número possível de operações geométricas com BReps ou Malhas para linhas, planos e pontos. Apesar da profunda relação com a geometria de entrada e com os parâmetros de controle, é possível estimar que essa estratégia reduziu em até oito vezes o tempo total para se obter as Saídas A e B. No caso da Saída C, há um elevado grau de dificuldade em adotar estratégias que não utilizem BReps, que está diretamente associado com a própria complexidade geométrica das conexões. Isso porque a geometria de cada parte da conexão depende da orientação e do posicionamento de cada um dos quatro nexors, que por sua vez apresentam ângulos de inclinação e pendular específicos, seguindo a complexidade da geometria de entrada.

De modo geral, é possível afirmar o sucesso de aplicação do algoritmo em diversas geometrias de entrada, com a geração automática de diferentes conexões. Isso é garantido pelo amplo controle sobre a quantidade, as dimensões e o posicionamento de todos os elementos que constituem as ERs geradas desta forma. As Saídas B e C comprovam o controle das geometrias e das propriedades dos nexors e das conexões. Juntas, conformam o modelo virtual da ER, levando em conta materialidade e posicionamento de cada elemento, o que pode ser utilizado para nortear o processo de montagem. Simultaneamente, os elementos gerados pelas duas saídas servem como base para processos file-to-factory, podendo ser enviados para diversos softwares CAM para a usinagem dos materiais.

A integração do algoritmo com o plug-in de simulação estrutural (Karamba3D), pela Saída A, permitiu a geração de respostas rápidas e automatizadas sobre o comportamento de diferentes configurações geométricas de ERs. Essa incorporação facilita análises e comparações entre

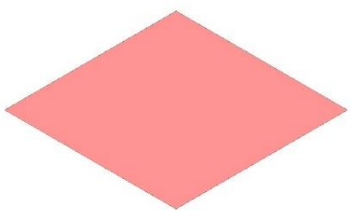
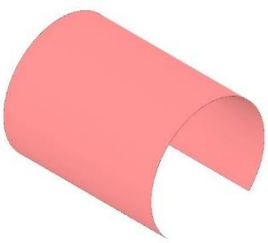
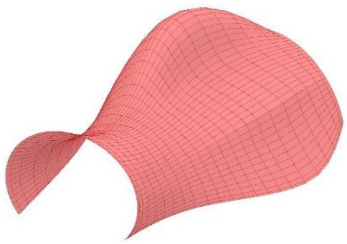
diferentes propostas, a fim de explorar e definir soluções mais adequadas para cada caso. Mais do que isso, as simulações feitas dessa forma foram corroboradas pelos ensaios físicos das conexões, pelas simulações tridimensionais dos leques feitas com o Ansys e pela construção da **Instância**.

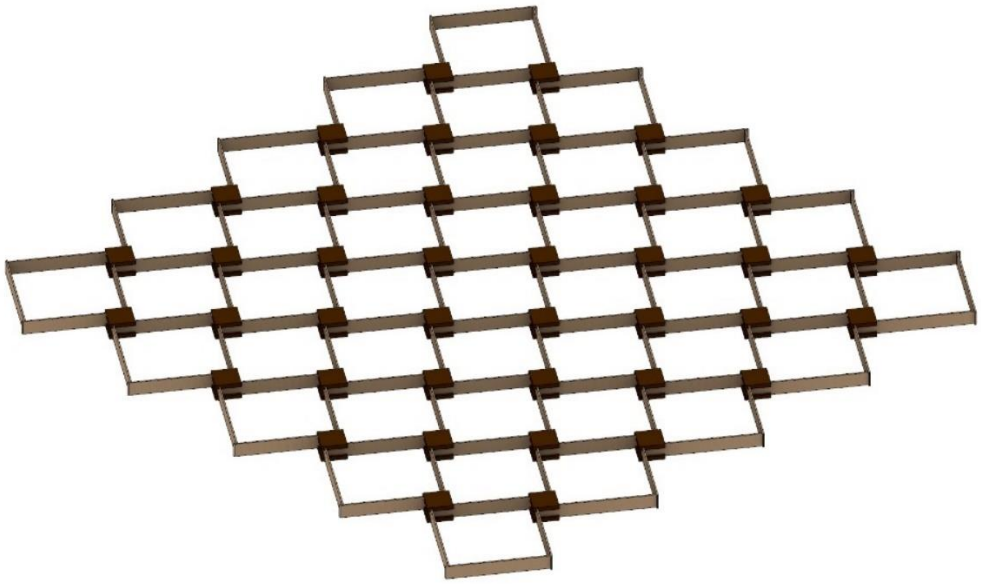
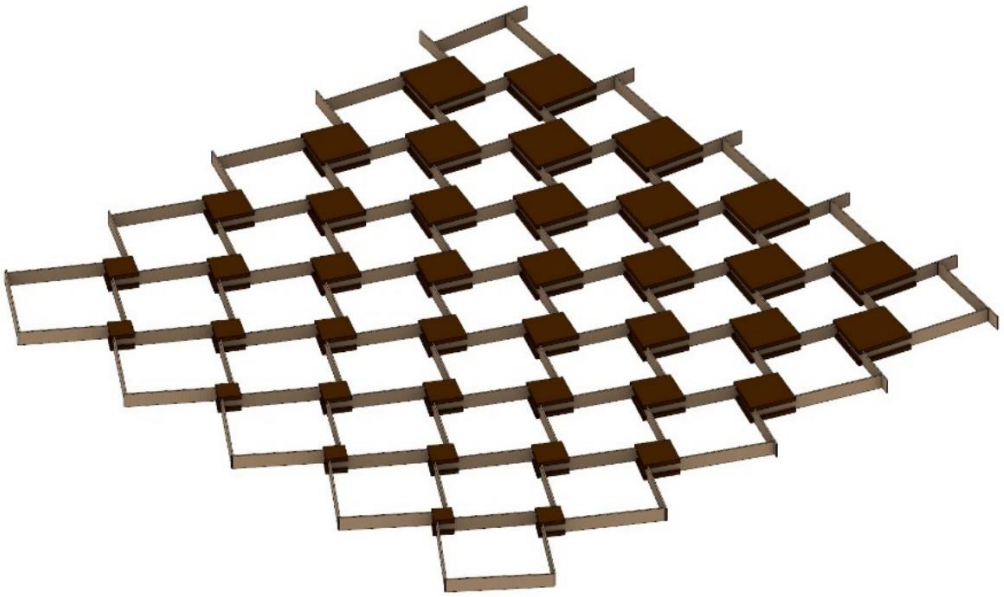
As catorze variáveis de entrada do algoritmo garantem elevado nível de adaptabilidade e de personalização em diferentes escalas da estrutura, tais como: a) inúmeras possibilidades de geometrias de entrada; b) uma mesma geometria pode ser estruturada com diferentes quantidades de nexors; c) a disposição dos nexors segue a variação dos ângulos de rotação; d) a seção transversal pode ser alterada de acordo com o material disponível ou por demandas projetuais e; e) a dimensão das conexões pode ser controlada pelo tamanho das paredes e da espessura das placas superior e inferior.

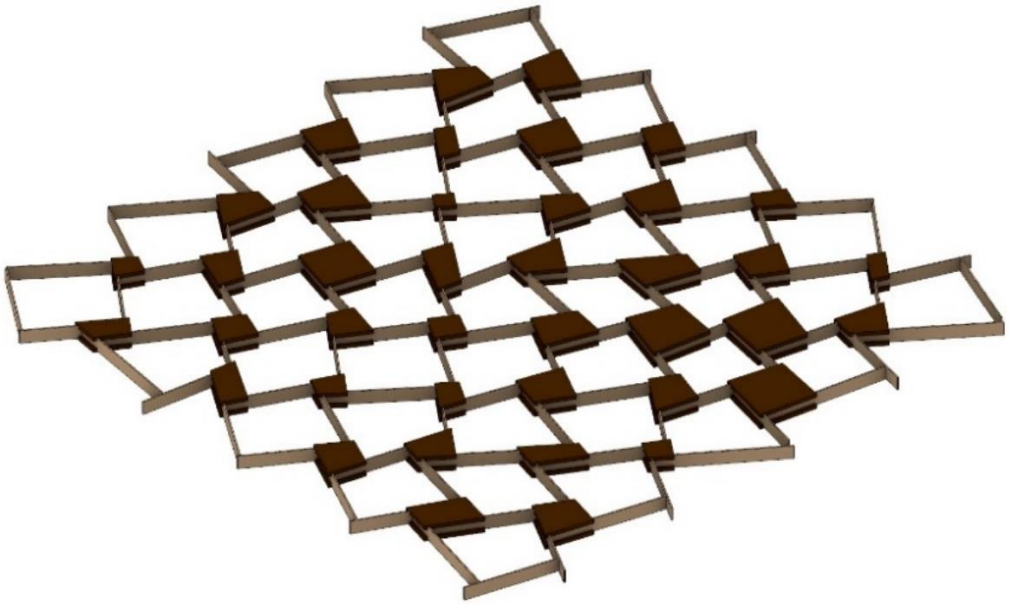
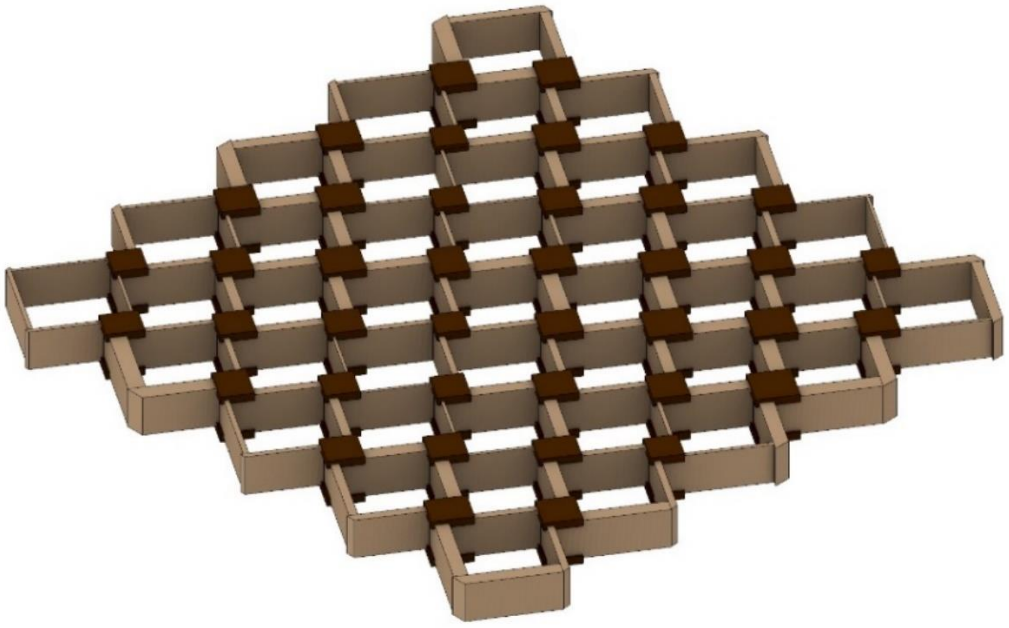
Do ponto de vista geométrico, ainda existem outros aspectos que exercem um impacto menor, mas que são igualmente importantes para atender as demandas de projeto, fabricação e montagem. Esse é o caso da variação do diâmetro da barra roscada ou do controle sobre a parcela do entalhe das conexões que depende das propriedades do material disponível (dilatação higroscópica).

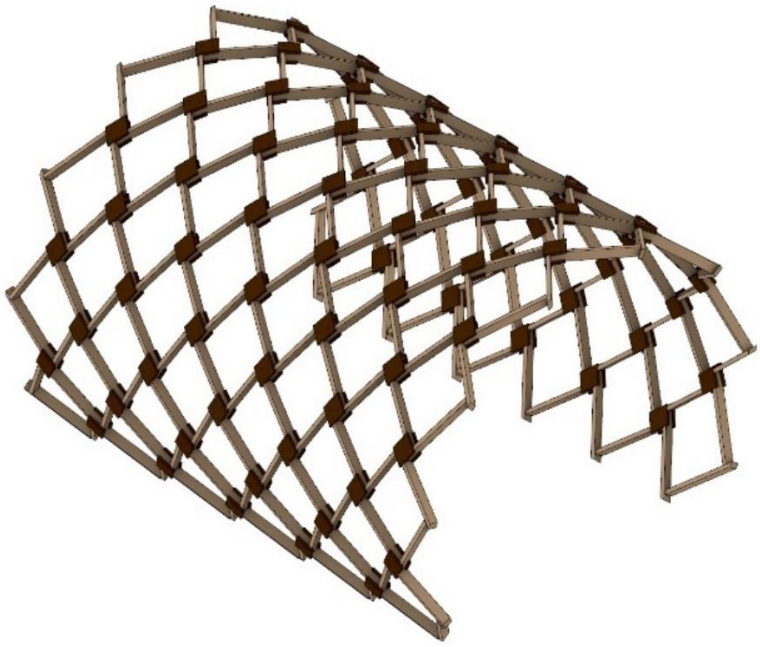
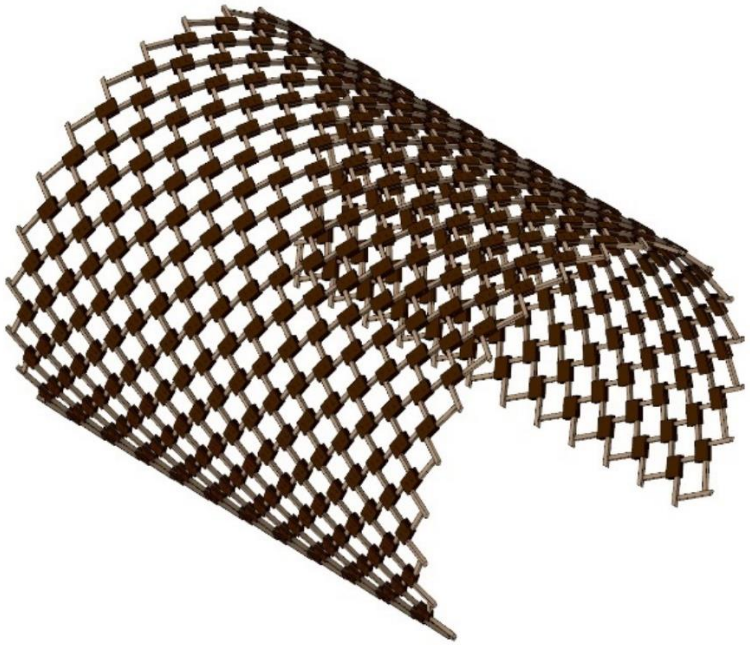
O Quadro 5 demonstra como alguns dos aspectos citados influenciam na definição das ERs e das respectivas conexões, bem como o potencial de personalização e de adaptabilidade do algoritmo para gerar diferentes configurações de ERs. Algumas variáveis, como a espessura ou o ângulo de rotação, aceitam intervalos de valores (um para cada nexor), que podem ser aplicados de forma ordenada ou aleatória para a geração das ERs.

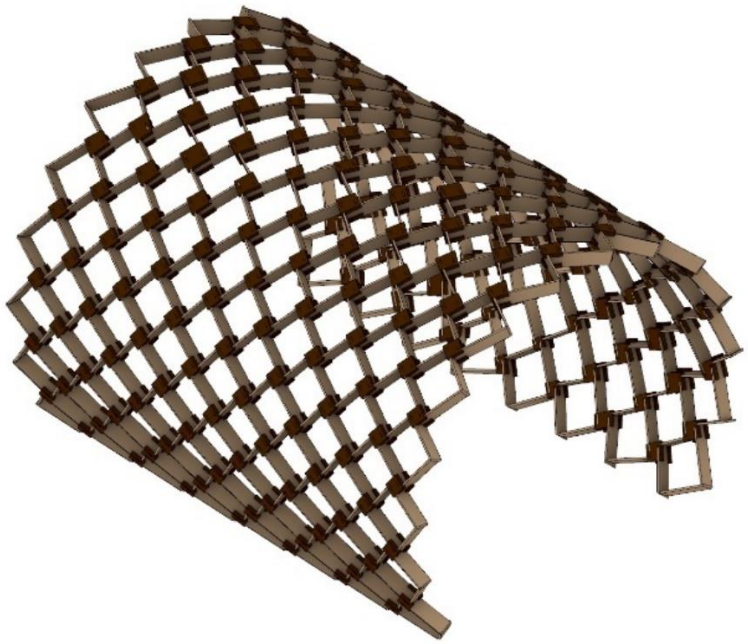
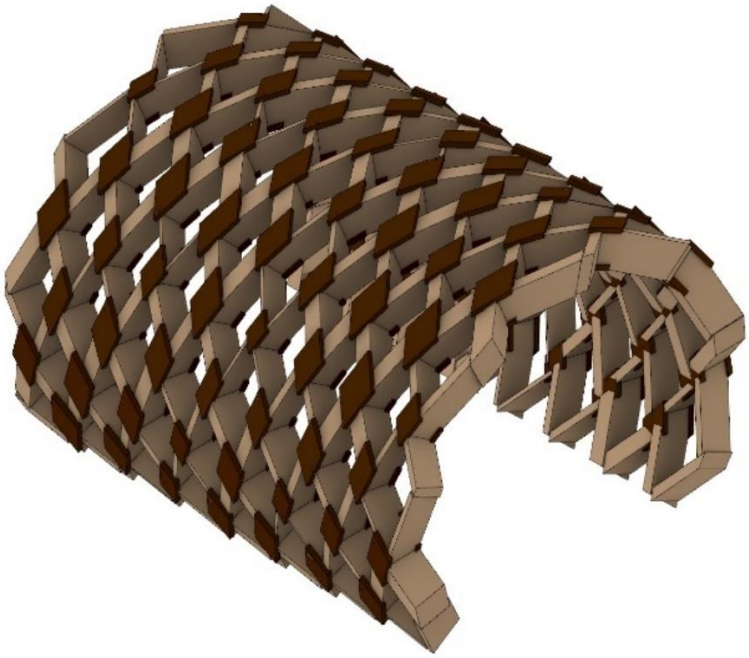
Quadro 5: Demonstração do funcionamento e da adaptabilidade do algoritmo, com a variação dos valores de entrada e aplicação em três geometrias distintas.

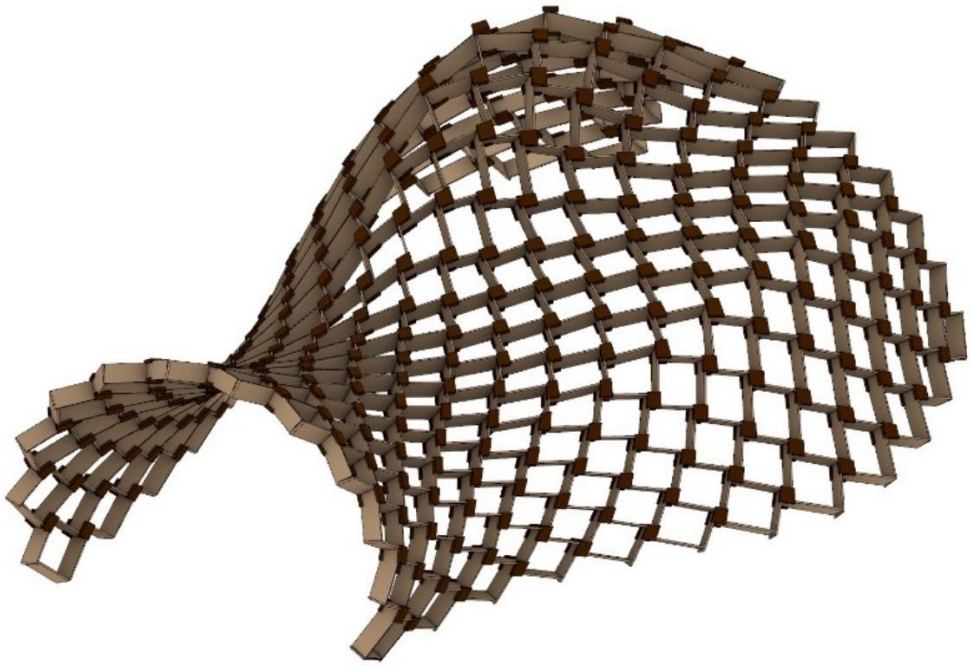
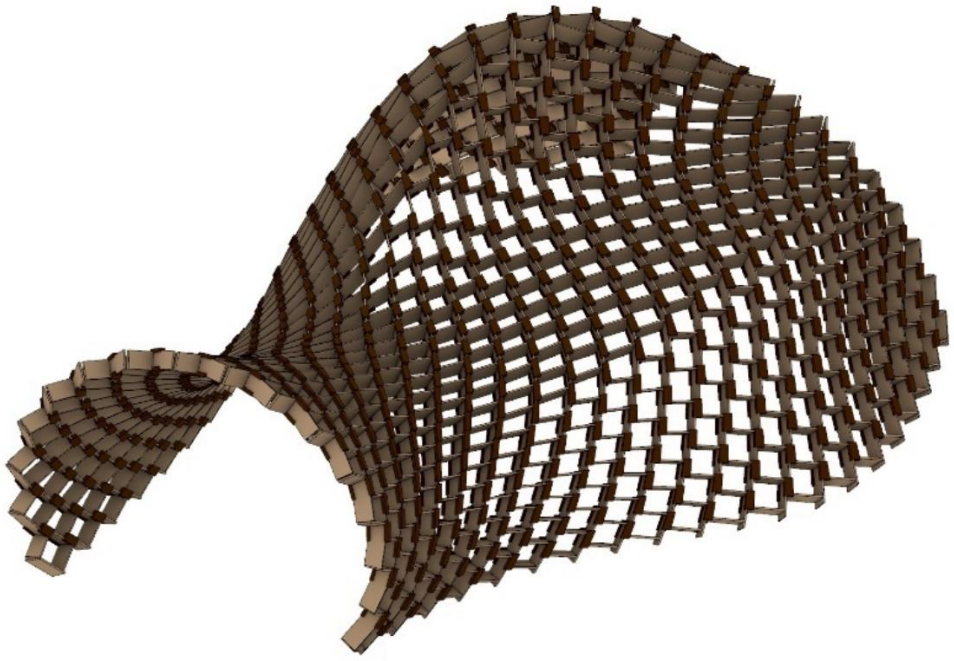
Geometria Plana	Geometria Instância	Geometria Complexa
		

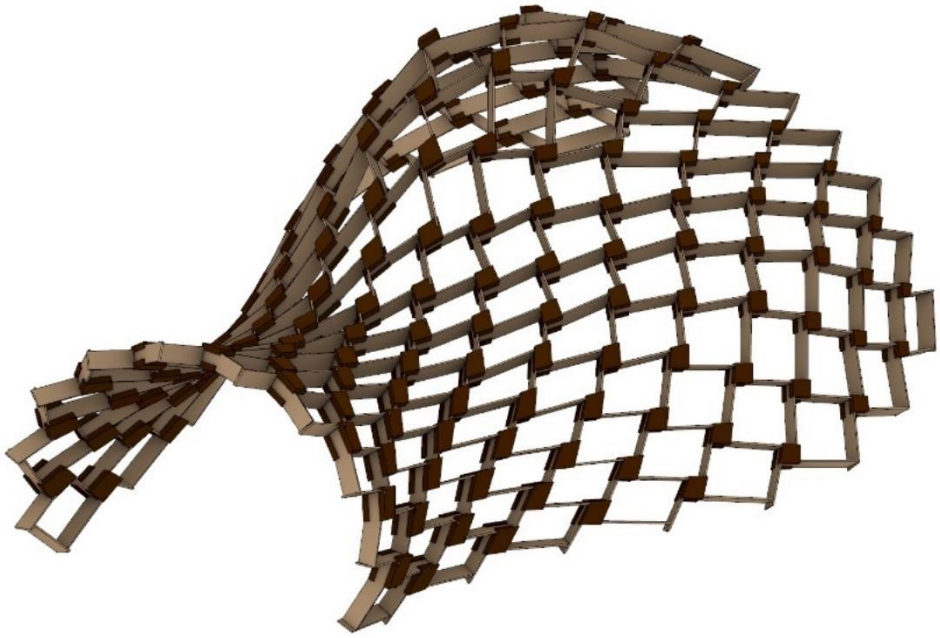
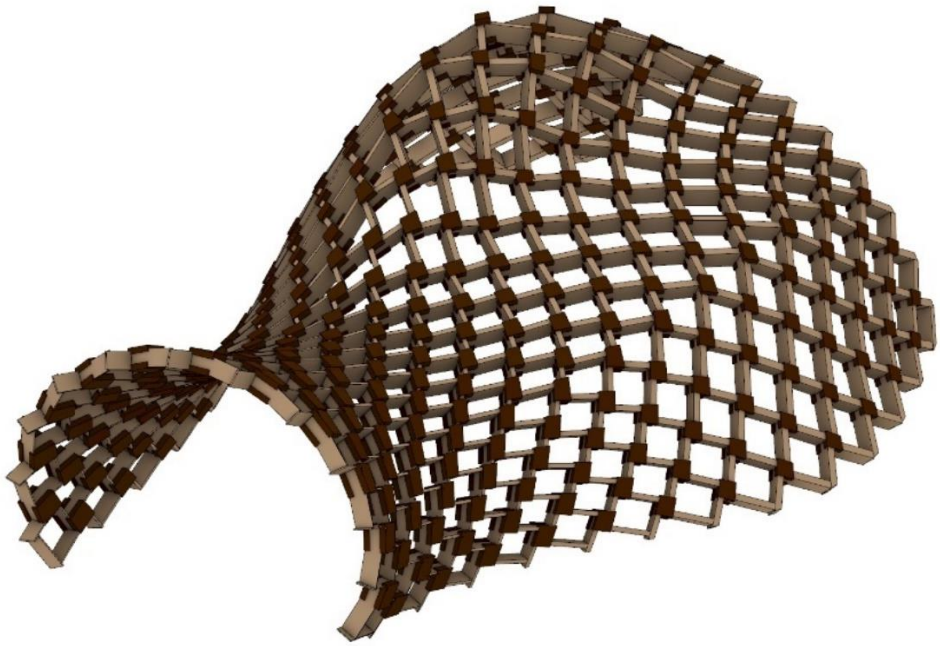
Geometria Plana: Variação 1 (intervalo de valores: fixos)
$M_n_U = M_n_V = 10$; $N_\alpha = 10°$; $N_t = 1$ cm; $N_h = 10$ cm; $C_t = 3$ cm; $C_q = 2$ cm

Geometria Plana: Variação 2 (intervalos de valores: crescentes)
$M_n_U = M_n_V = 10$; $5° < N_\alpha < 35°$; $N_t = 1$ cm; $N_h = 10$ cm; $C_t = 3$ cm; $0{,}5$ cm $< C_q <$ $2{,}5$ cm


Geometria Plana: Variação 3 (intervalos de valores: aleatórios)
$M_n_U = M_n_V = 10$; $5° < N_\alpha < 35°$; $N_t = 1$ cm; $N_h = 10$ cm; $C_t = 3$ cm; $0{,}5$ cm $< C_q <$ $2{,}5$ cm

Geometria Plana: Variação 4 (intervalos de valores: aleatórios)
$M_n_U = M_n_V = 10$; $N_\alpha = 10°$; 2 cm $< N_t <$ 12 cm; $N_h = 30$ cm; $C_t = 6$ cm; $C_q = 2$ cm


Geometria Instância: Variação 1 (intervalos de valores: fixos)
$M_n_U = 16$; $M_n_V = 12$; $N_\alpha = 9°$; $N_t = 4$ cm; $N_h = 10$ cm; $C_t = 3$ cm; $C_q = 0{,}5$ cm

Geometria Instância: Variação 2 (intervalos de valores: fixos)
$M_n_U = 44$; $M_n_V = 24$; $N_\alpha_U = 14°$; $N_\alpha_V = 18°$; $N_t = 4$ cm; $N_h = 4$ cm; $C_t = 2{,}5$ cm; $C_q = 0{,}2$ cm


Geometria Instância: Variação 3 (intervalos de valores: aleatórios)
$M_n_U = 28$; $M_n_V = 16$; $5° < N_\alpha < 22°$; $N_t = 2$ cm; $N_h = 15$ cm; $2{,}5 < C_t < 4{,}5$ cm; $0{,}2$ cm $< C_q < 0{,}7$ cm

Geometria Instância: Variação 4 (intervalos de valores: aleatórios)
$M_n_U = 14$; $M_n_V = 16$; $N_\alpha = 9°$; 2 cm $< N_t < 20$ cm; $N_h = 40$ cm; $C_t = 6$ cm; $0{,}3$ cm $< C_q < 1{,}5$ cm


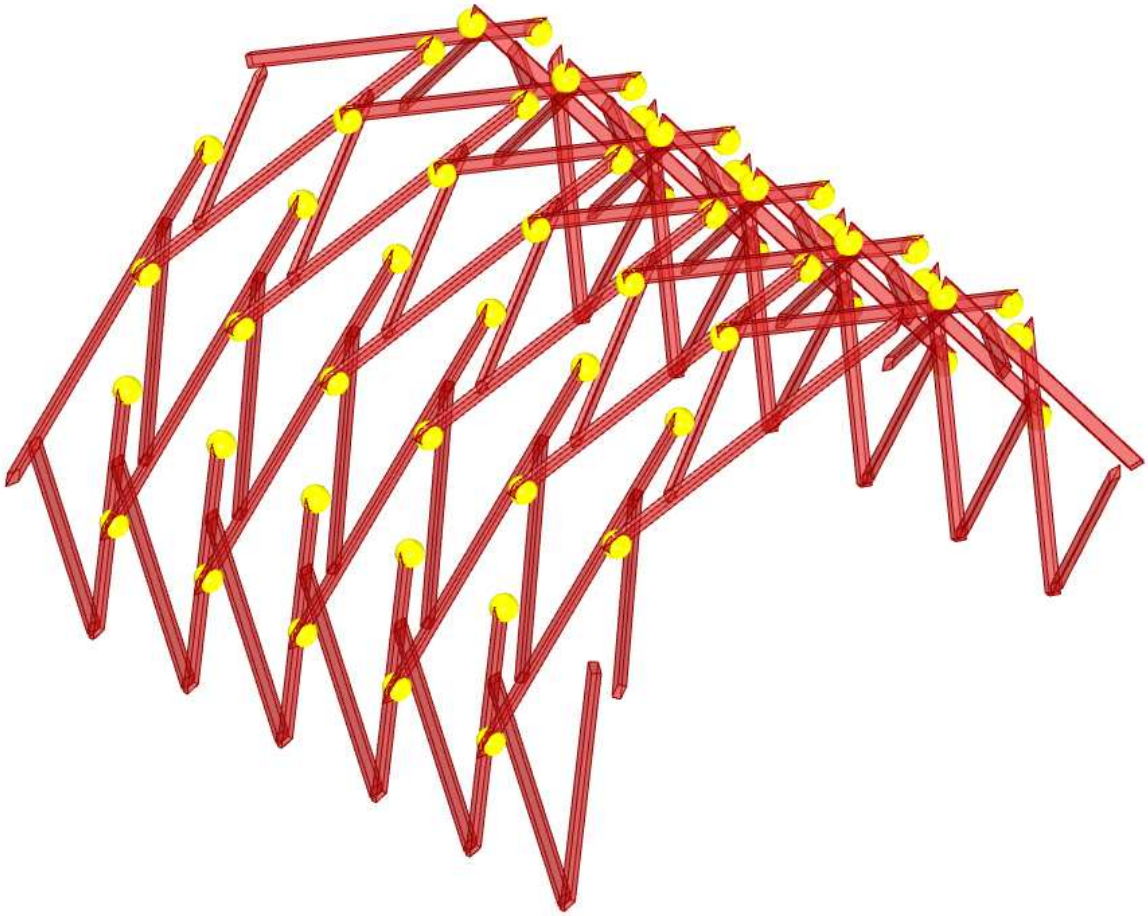
Geometria Complexa: Variação 1 (intervalos de valores: fixos)
$M_n_U = M_n_V = 24$; $N_\alpha = 12°$; $N_t = 3$ cm; $N_h = 30$ cm; $C_t = 6$ cm; $C_q = 1{,}5$ cm

Geometria Complexa: Variação 2 (intervalos de valores: fixos)
$M_n_U = 40$; $M_n_V = 32$; $N_\alpha_U = 23°$; $N_\alpha_V = 7°$; $N_t = 3$ cm; $N_h = 30$ cm; $C_t = 6$ cm; $C_q = 0{,}5$ cm


Geometria Complexa: Variação 3 (intervalos de valores: crescentes)
$M_n_U = 16$; $M_n_V = 20$; $7° < N_\alpha < 21°$; $N_t = 3$ cm; $N_h = 30$ cm; $C_t = 6$ cm; $0{,}3$ cm $< C_q <$ $2{,}8$ cm

Geometria Complexa: Variação 4 (intervalos de valores: crescentes)
$M_n_U = 16$; $M_n_V = 20$; $7° < N_\alpha < 28°$; 2 cm $< N_t <$ 12 cm; $N_h = 30$ cm; $C_t = 6$ cm; $0{,}3$ cm $< C_q <$ $3{,}5$ cm


Fonte: todas as informações, inclusive as figuras, foram elaboradas pelo autor, 2022.

Além da versatilidade do funcionamento do algoritmo, nas explicações da Saída C são mencionadas algumas restrições dimensionais que dependem das relações geométricas entre as placas das conexões, nexors e superfície de entrada. Por exemplo, se o valor somado das espessuras de entalhe das placas de uma conexão for maior do que a altura da seção transversal do nexor, as geometrias das placas ficariam virtualmente sobrepostas, inviabilizando o funcionamento daquela conexão. Quando os valores dos parâmetros desobedecem às regras definidas no algoritmo, são exibidos erros visuais no modelo virtual, conforme o exemplo da Figura 106. Quando isso ocorre, é necessário rever a intenção de projeto, com alterações na superfície de entrada ou na altura da seção transversal dos nexors.

Figura 106: Exemplo de avisos visuais que indicam que algumas das regras estabelecidas no algoritmo não foram respeitadas. Nesse caso, os valores que definem a curvatura, o número de subdivisões e a altura da seção transversal não são compatíveis e não é possível fazer a intersecção entre os nexors. As esferas em amarelo indicam as regiões com problemas.



Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

8.2. IMPACTO DAS VARIÁVEIS DAS CONEXÕES

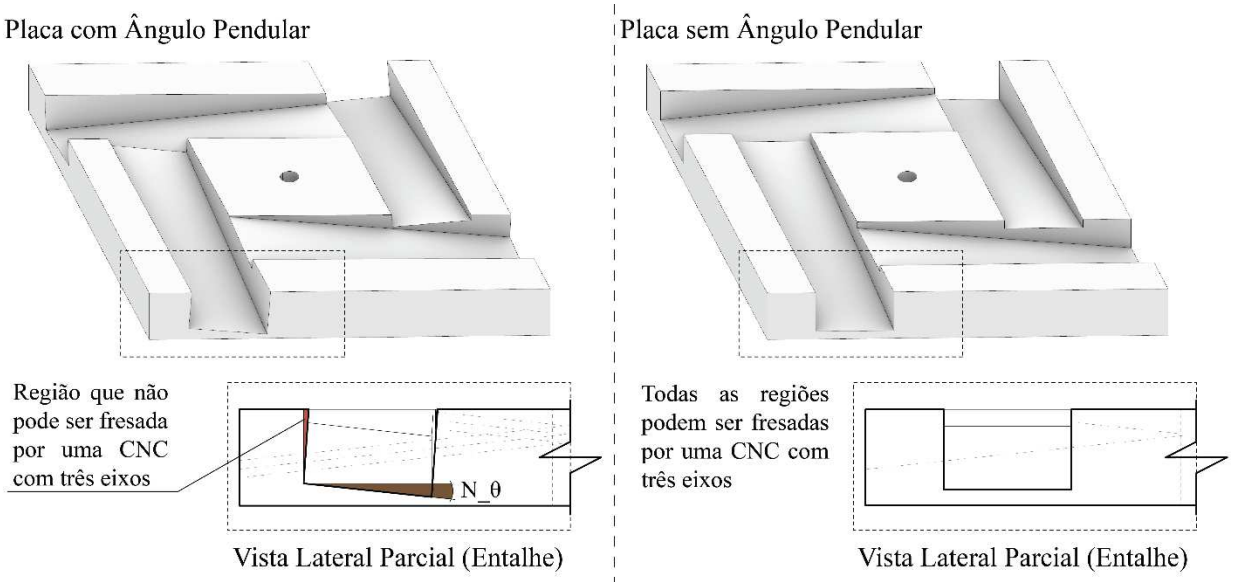
O desenvolvimento de diversos **Modelos** e protótipos, físicos ou virtuais, foi essencial para a concepção e refinamento de ideias e conceitos. A evolução das séries de **Modelos** descritas na seção 7.4 reforça essa afirmação, dado o fato que a conexão Tipo Morsa é, em si, um dos resultados obtidos. Com isso em mente, esta seção concentra a apresentação de resultados mais específicos, focados nos aspectos geométricos e de produção das conexões.

8.2.1. Flexibilidade no processo de fabricação das conexões

Um dos principais aspectos das conexões Tipo Morsa é o elevado grau de controle e adaptação para múltiplas composições de ERs. Mais especificamente, a distinção de cada uma das variáveis que conforma a complexidade das placas inferior e superior garante a possibilidade de adaptar as geometrias conforme o método de fabricação adotado; reforçando o aspecto de Flexibilidade de Produção. Isso está associado com alterações nos valores dos ângulos pendulares (N_θ), diâmetro do furo (C_d), espessura total (C_t) e comprimento total (C_l).

Conforme mencionado no desenvolvimento, os ângulos pendulares (N_θ) implicam no uso de equipamentos de Fabricação Digital com maior nível de Flexibilidade (CNCs de cinco eixos ou braços robóticos, por exemplo), uma vez que os ângulos estabelecidos com o eixo Z do equipamento são obtusos ou agudos. Dado o fato de que os ângulos pendulares (N_θ) são resultados da relação entre o posicionamento dos Nexors no espaço tridimensional e o Vetor Normal da conexão, a solução para reduzir a complexidade geométrica está na reorientação dos elementos. Algumas das alternativas que podem ser adotadas são: (a) a adoção de um único Vetor Normal universal; (b) a adoção de um Vetor Normal para o conjunto de algumas conexões, gerando um sistema híbrido (com conexões mais e outras menos complexas) ou; (c) a decomposição dos Vetores Normais locais em suas três direções e adotando a direção principal para a reorientação de cada Nexor. De forma mais simplificada, é necessário adotar uma estratégia que remova N_θ como uma das variáveis geométricas. Em termos de equipamentos para fabricação, isso possibilita o uso de CNCs menos flexíveis, com apenas os eixos X, Y e Z parcial (apenas fresagem descendente, ou 2,5 eixos). Isso é melhor apresentado pelas adaptações de uma placa das conexões (Figura 107).

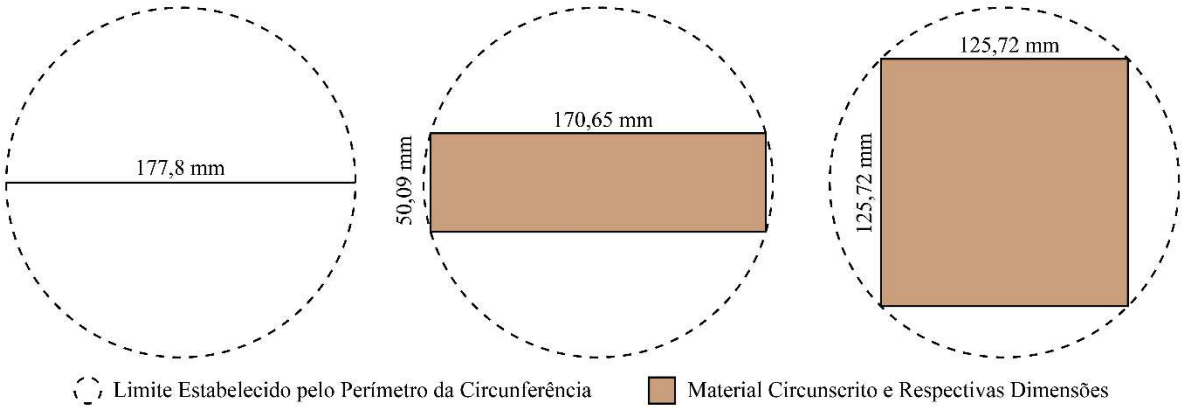
Figura 107: Ajuste do Ângulo Pendular na placa inferior de uma conexão com as mesmas medidas gerais, visando a produção por CNCs de três eixos.



Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Por sua vez, a espessura total (**C_t**) e o comprimento total (**C_l**) das conexões devem ser orientadas pelo limite de trabalho dos equipamentos de produção utilizados. Os dois equipamentos CNCs usados durante esta tese podem servir para ilustrar a explicação. No caso da MDX 540, a presença do eixo rotacional restringe as dimensões gerais do material, que deve estar circunscrito a um círculo de diâmetro de 177,8mm, ter o comprimento máximo de 370,8mm. Dentre essas, a primeira dimensão é a principal limitante, pois estabelece uma relação indesejável entre espessura total e, pelo menos, dois dos comprimentos laterais da conexão, em que o aumento de uma variável implica na diminuição da outra (Figura 108). Isso significa que, apesar do elevado grau de flexibilidade de produção do equipamento, as dimensões máximas delimitam um universo de conexões possíveis; muitas vezes resultando em protótipos em escala reduzida.

Figura 108: Geometrias circunscritas no círculo de diâmetro 177,8mm. Exemplos de como o aumento de uma dimensão implica na diminuição de outra.



Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

As dimensões de trabalho da CNC Vitor Ciola são muito mais expressivas, sendo que o material deve respeitar os limites de 1000x2000x300mm. Neste caso, a limitação está muito mais relacionada com a produtividade e com o desperdício de material do que com as variáveis de uma placa isolada de uma conexão. Isso porque é possível produzir diversas conexões utilizando um único arquivo digital, dada a distribuição das geometrias sobre a área de usinagem. Nessa situação, há diversas estratégias que podem ser adotadas para otimizar o gasto de material, como a adoção de técnicas de *nesting* (conforme explicado anteriormente) e o projeto do produto com medidas direcionadas para a fabricação. Pequenas reduções ou aumentos nas dimensões do produto podem causar desperdícios expressivos.

O diâmetro do furo (**C_d**) também tem relação com os limites das ferramentas. Por exemplo, sua dimensão não pode ser menor do que a das fresas disponíveis. Mais do que isso, o valor adotado não pode ser menor ou muito maior do que o diâmetro da barra metálica que passa pelo furo e faz o travamento do sistema de conexão. Nesse sentido, as dimensões do furo são muito mais limitadas pelas dimensões de barras disponíveis no mercado do que por um equipamento ou ferramenta específica.

Uma outra opção que também deve ser mencionada é a produção de pequenas séries, como foi feito no caso da **Instância**. Ao invés de flexibilizar a geometria das conexões, as restrições ficam concentradas no método de produção dos gabaritos e na demanda de um sistema complementar analógico e, provavelmente, manual (como o uso de uma Tupia, por exemplo).

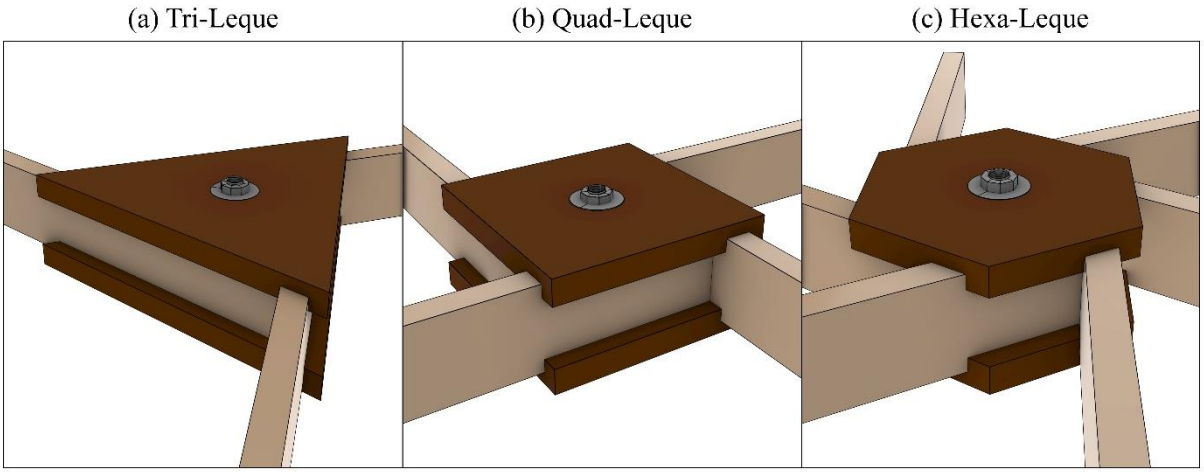
De modo geral, é intrínseco à impressão 3D o excesso de tempo despendido e custos relativamente altos para a produção de elementos. Por isso, a viabilidade dessa abordagem é encontrada na reutilização de um mesmo gabarito (ou combinações de gabaritos) para a produção de uma série de conexões com as geometrias de entalhe idênticas.

8.2.2. Derivações do método de geração das conexões

Um dos principais resultados obtidos a partir do algoritmo, mais especificamente para a geração das conexões, foi o pedido de patente (Apêndice V). A invenção se refere a um **Método** para determinação das conexões de ERs e as conexões das ERs como um produto. Essa invenção está inserida no campo da arquitetura, mais especificamente no desenho e detalhamento de ERs.

O pedido de patente segue a lógica apresentada no Quadro 3, da subseção 7.2.8. Saída C. Porém, ao invés de considerar somente os casos de conexões geradas no encontro de quatro nexors, o **Método** descrito generaliza o processo de geração para as regiões de encontro entre "n" nexors. Nesse sentido, a recomendação geral estipulada no pedido é de que "n" assuma os valores três, quatro ou seis (Figuras 109a, 109b e 109c, respectivamente), levando em conta os casos mais tradicionais, ou doze para configurações especiais. Esses valores foram definidos tendo como base o estudo feito com os grupos de simetria de papel de parede (CASTRIOTTO, CELANI e TAVARES, 2021) e alguns casos específicos apresentados na literatura. Esse aspecto também reforça a importância do estudo teórico e da importância de se definir o **Construto**.

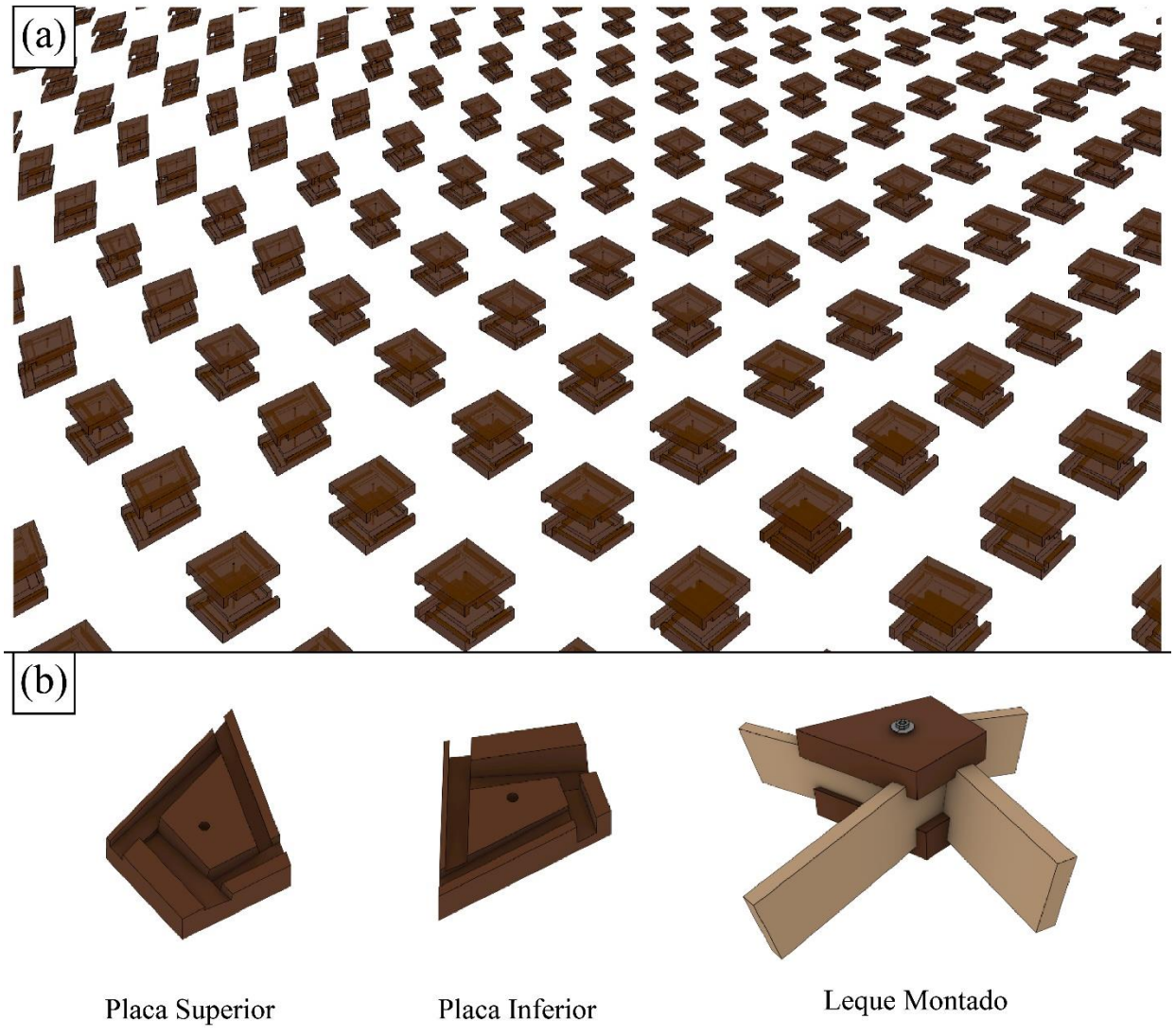
Figura 109: Variações da geometria das conexões conforme o número de elementos, seguindo os mesmos princípios do método de geração; (a) Três nexors; (b) quatro nexors e; (c) seis nexors.



Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Além disso, as reivindicações apresentadas no pedido de patente englobam todas as variáveis que controlam a geometria das conexões. Isso significa que o **Método** descrito no pedido engloba uma família de conexões personalizáveis e não apenas o processo de geração de uma conexão específica. Foram estipulados valores máximos e mínimos para cada um dos parâmetros de controle, com o intuito de determinar um universo de possibilidades. Exemplos de variações das geometrias das conexões e de um leque distinto são apresentados nas Figuras 110a e 110b, respectivamente. Esse resultado demonstra, mesmo que apenas virtualmente, o potencial de Personalização em Massa das conexões, sendo necessário aprofundar estudos no processo de fabricação destes elementos.

Figura 110: Exemplos de conexões geradas pelo **Método**. (a) diversas geometrias distintas e (b) ampliação das placas superior e inferior e de um leque montado dessa família.



Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

8.3. AVALIAÇÃO EXPLORATÓRIA DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL

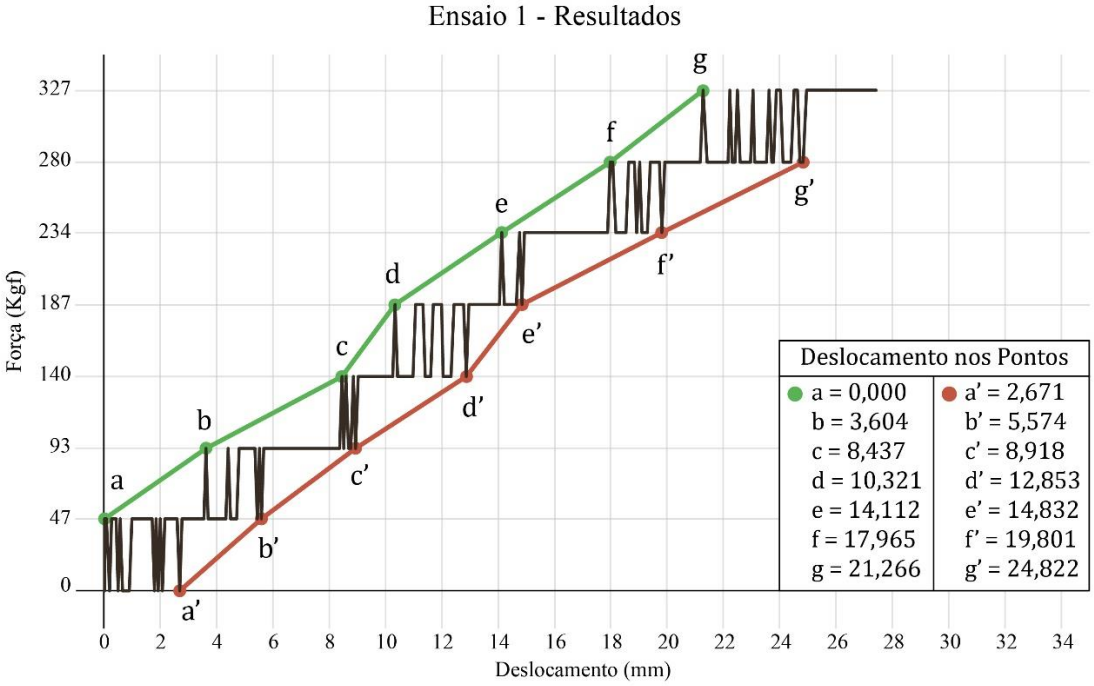
Com o intuito de explicar determinados aspectos e decisões acerca do desenvolvimento do **Artefato**, alguns dos resultados relacionados com o desempenho estrutural, tanto do ponto de vista do arranjo global da ER como das conexões, foram previamente mencionados. Também deve ser ressaltado o fato de que esta não é uma tese que se propõe a comprovar, de forma definitiva, o desempenho das conexões ou das ERs como um todo. As simulações, análises e ensaios estruturais realizados são preliminares, mas foram de fundamental importância para uma compreensão inicial acerca do comportamento e da viabilidade das conexões desenvolvidas. Por esse motivo, esta seção tem como foco a exposição mais detalhada dos dados obtidos a partir dos ensaios físicos e das simulações.

8.3.1. Ensaios físicos de desempenho estrutural das conexões

Ainda durante o desenvolvimento, foi apresentada a existência de dois obstáculos principais para a realização dos ensaios físicos das conexões em leques individuais. Um deles já foi explicado, sendo a dificuldade de alocar o leque na área de trabalho da prensa, exigindo uma estrutura auxiliar desmontável. O outro é relacionado com o registro dos esforços aplicados pelo equipamento sobre as conexões. A Prensa Universal do Laboratório de Estruturas é utilizada, geralmente, para avaliar elementos feitos com materiais com resistência característica mais elevada, como o CLT, o MLC, o concreto armado ou o aço. Por isso, a precisão de registro das forças aplicadas não é muito elevada e está associada a uma escala com intervalos relativamente grandes, com variações marcadas a cada 0,5 KN (50 Kgf), aproximadamente.

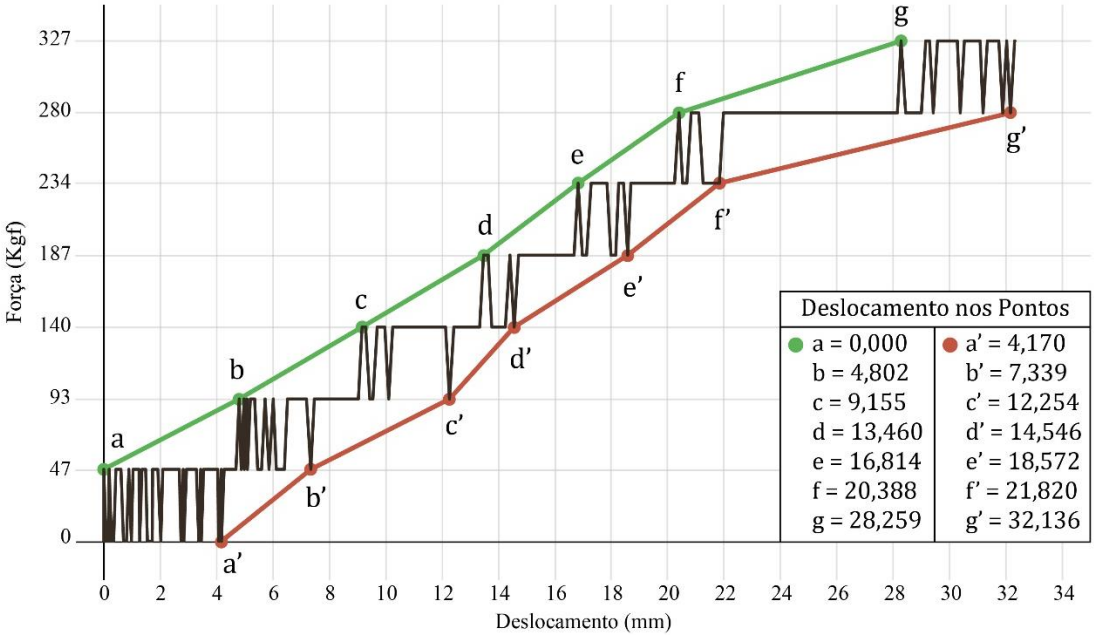
Por sua vez, as conexões ensaiadas foram feitas de compensado de madeira, um material com resistência característica menor e que não é produzido para ser utilizado em estruturas. Logo, variações de esforços que estão em marcos intermediários da escala de força aplicada (da Prensa Universal) podem implicar em deslocamentos ou deformações mais consideráveis. De um ponto de vista mais visual, os gráficos extraídos a partir dos ensaios físicos apresentam períodos de deformação mais longos, distribuídos em faixas que apresentam oscilações da força aplicada entre dois marcos da escala registrada pelo equipamento. Os Gráficos 6 a 11 são referentes aos seis testes físicos realizados, relacionando a força aplicada (em Kgf) com o deslocamento vertical (em milímetros) das conexões, em um leque isolado.

Gráfico 6: Ensaio 1 - Valores de força e deslocamento obtidos pelo ensaio do corpo de prova e definição das curvas superior e inferior.



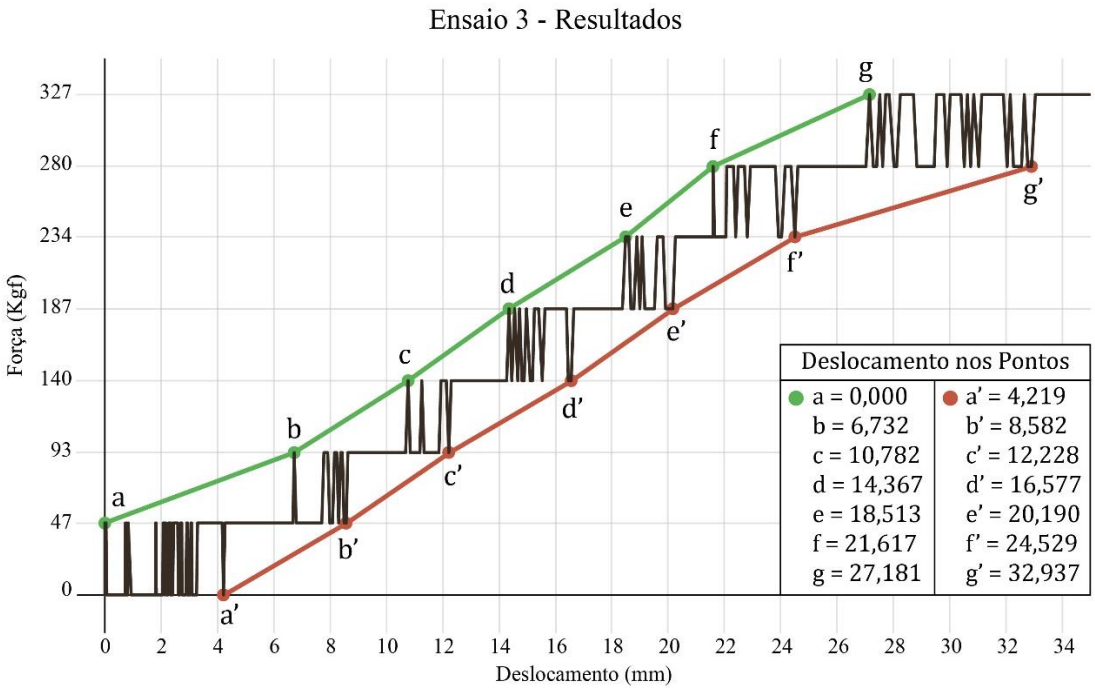
Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Gráfico 7: Ensaio 2 - Valores de força e deslocamento obtidos pelo ensaio do corpo de prova e definição das curvas superior e inferior.



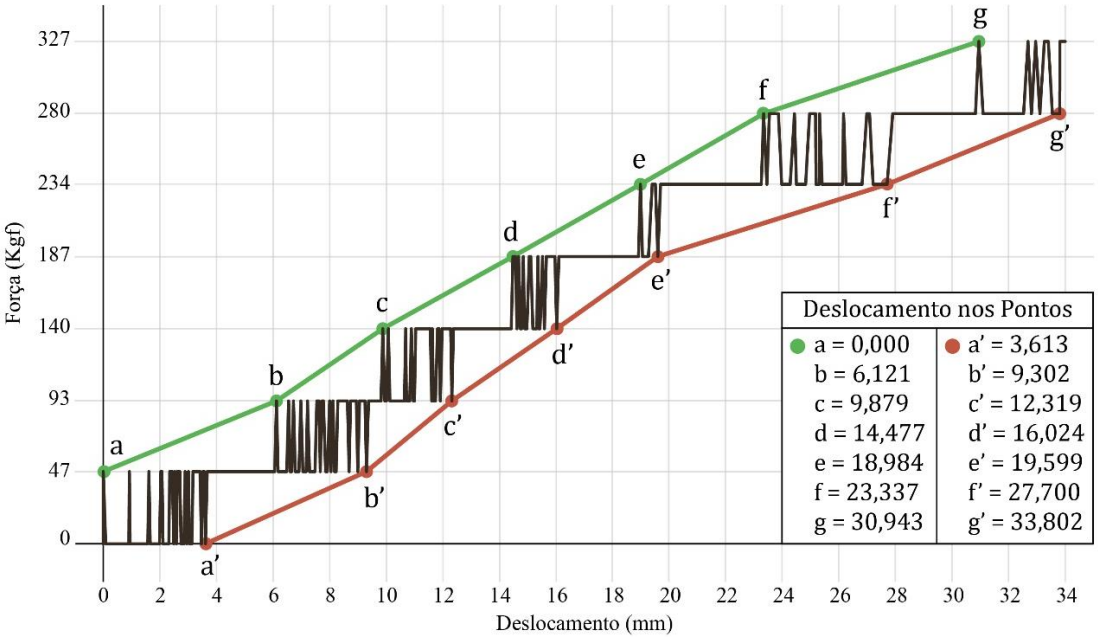
Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Gráfico 8: Ensaio 3 - Valores de força e deslocamento obtidos pelo ensaio do corpo de prova e definição das curvas superior e inferior.



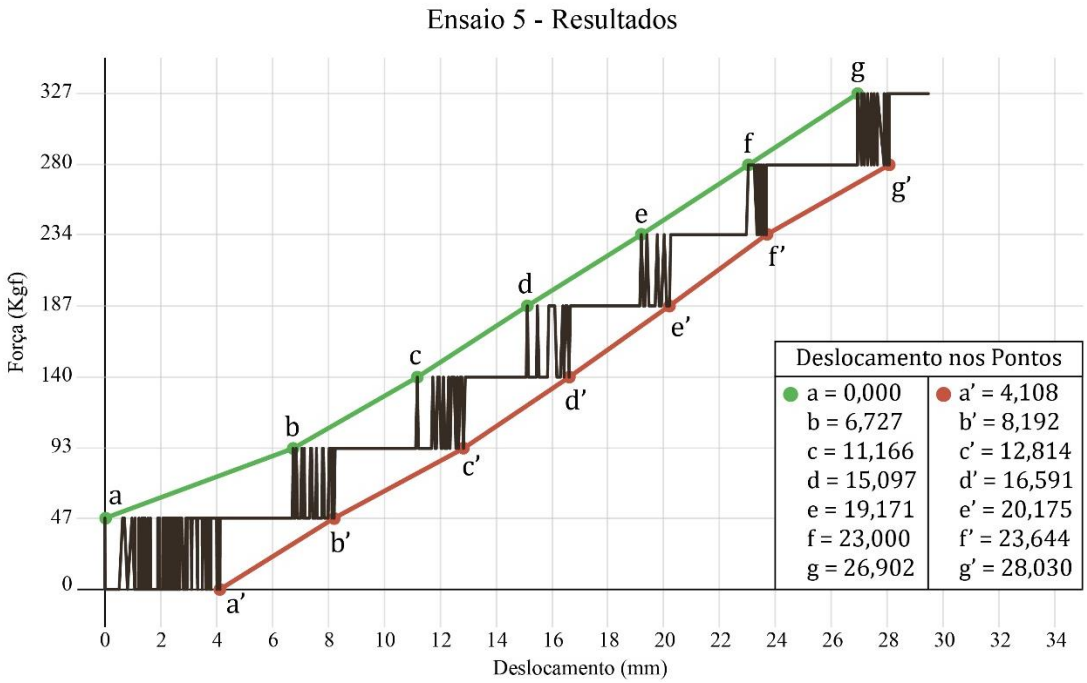
Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Gráfico 9: Ensaio 4 - Valores de força e deslocamento obtidos pelo ensaio do corpo de prova e definição das curvas superior e inferior.



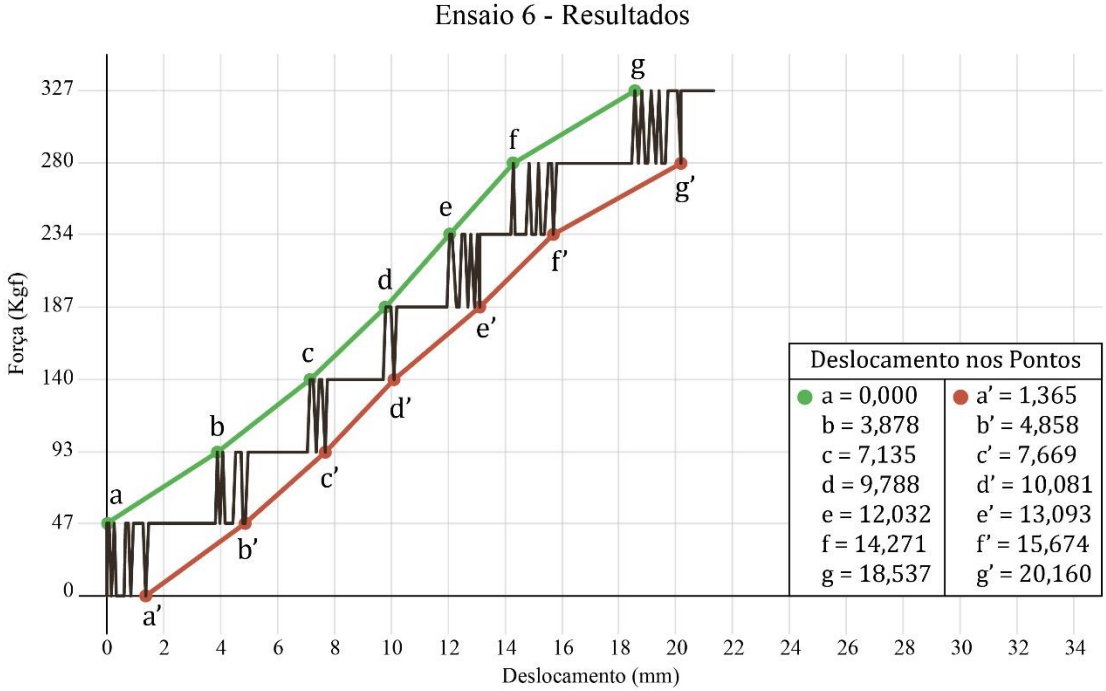
Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Gráfico 10: Ensaio 5 - Valores de força e deslocamento obtidos pelo ensaio do corpo de prova e definição das curvas superior e inferior.



Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Gráfico 11: Ensaio 6 - Valores de força e deslocamento obtidos pelo ensaio do corpo de prova e definição das curvas superior e inferior.

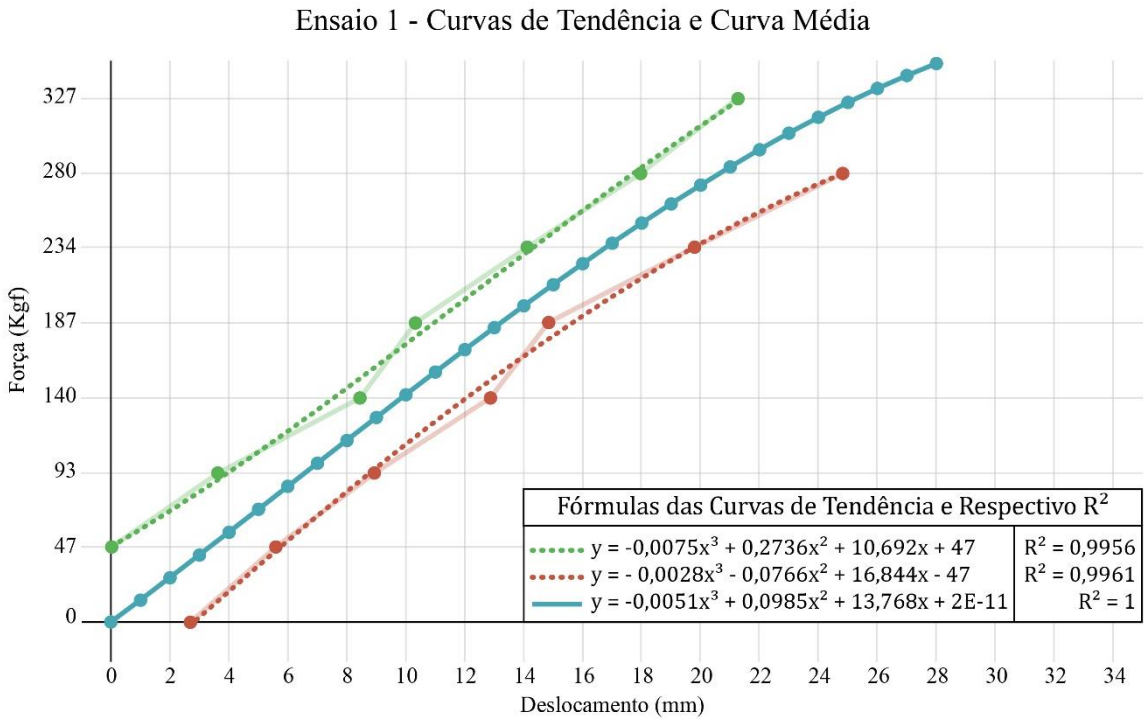


Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Devido às oscilações da força aplicada, foram definidas duas curvas: a de limite superior (verde), e a de limite inferior (laranja), que são conformadas, respectivamente, pelos primeiros e últimos pontos de deslocamento registrado em determinada faixa de variação de força. Com base nas curvas de cada um dos ensaios, foram definidas as Curvas de Tendência Superior e Inferior, descritas por equações polinomiais de terceiro grau. Em todos os casos o coeficiente de determinação (R^2) ficou acima 0,99, indicando um ajuste satisfatório entre as Curvas de Tendência e a respectiva curva de limite (Gráficos 12 a 17).

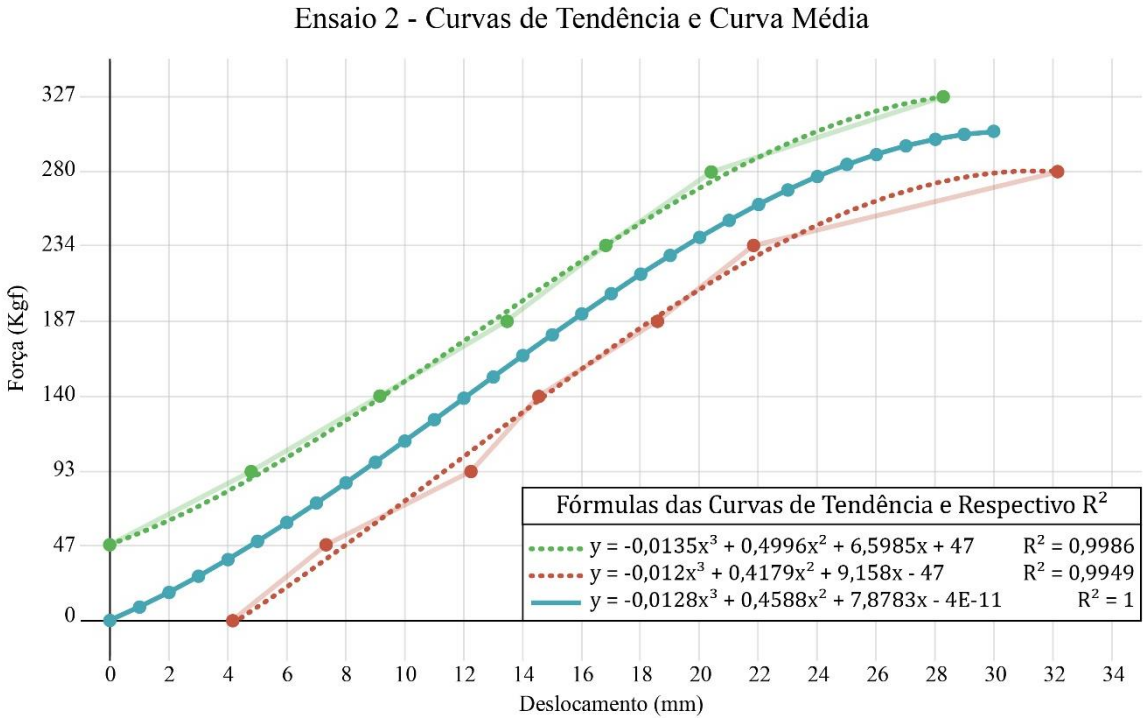
Para a determinação da Curva de Tendência Média de cada um dos ensaios, foram calculados os resultados das equações das Curvas de Tendência Superior e Inferior, assumindo valores inteiros (entre 0 e 34) para x. Em seguida, foram calculadas as médias dos resultados para um mesmo valor de x, conforme as Tabelas A – F do Apêndice VI. A Curva de Tendência Média foi construída a partir de uma terceira função polinomial, com $R^2 = 1$, que relaciona os valores de x (entre 0 e 34) com o resultado médio obtido (Gráficos 12 a 17).

Gráfico 12: Ensaio 1 – Curvas de Tendência Superior e Inferior e Curva Média de Tendência.



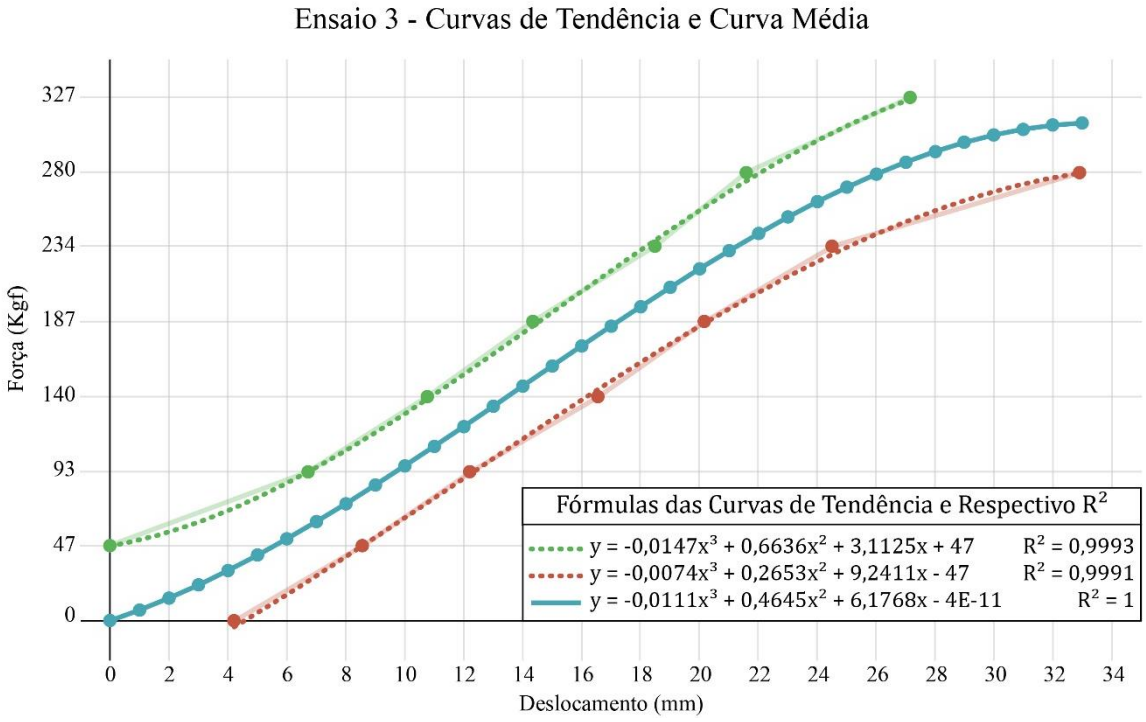
Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Gráfico 13: Ensaio 2 – Curvas de Tendência Superior e Inferior e Curva Média de Tendência.



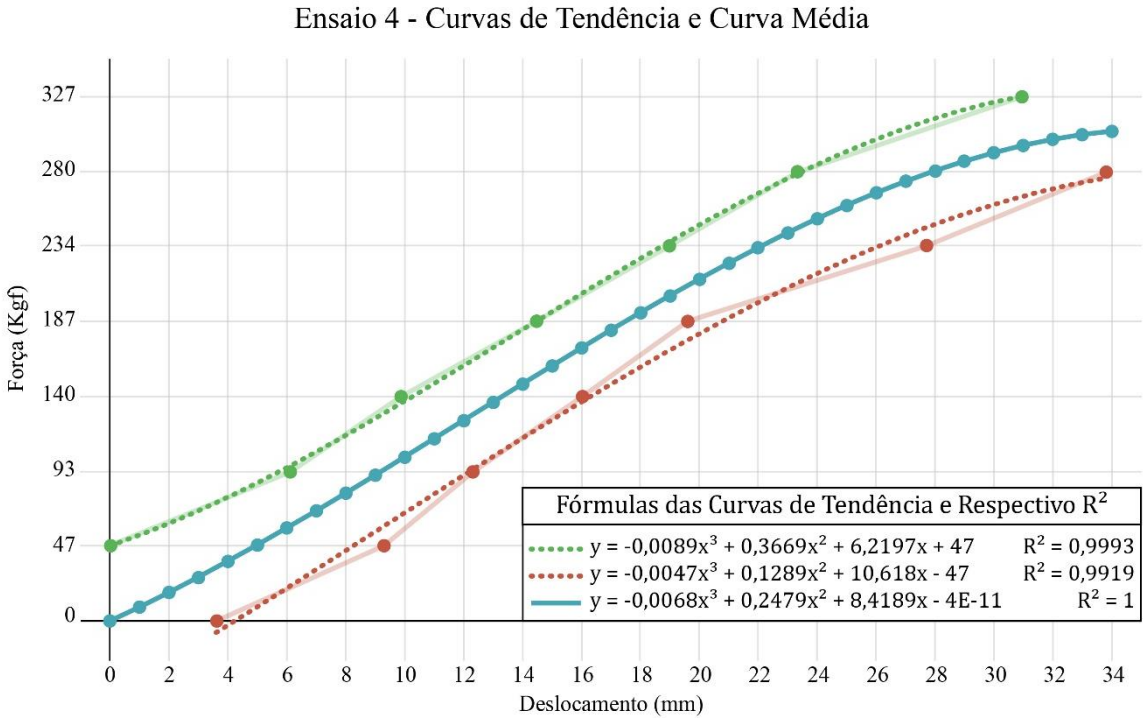
Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Gráfico 14: Ensaio 3 – Curvas de Tendência Superior e Inferior e Curva Média de Tendência.



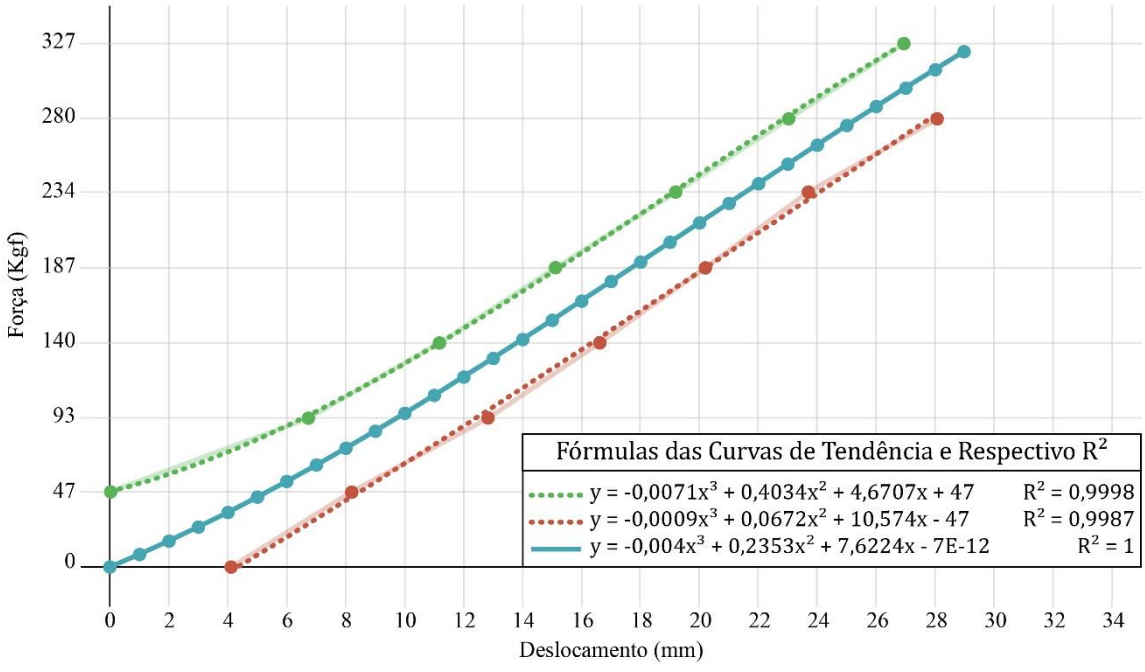
Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Gráfico 15: Ensaio 4 – Curvas de Tendência Superior e Inferior e Curva Média de Tendência.



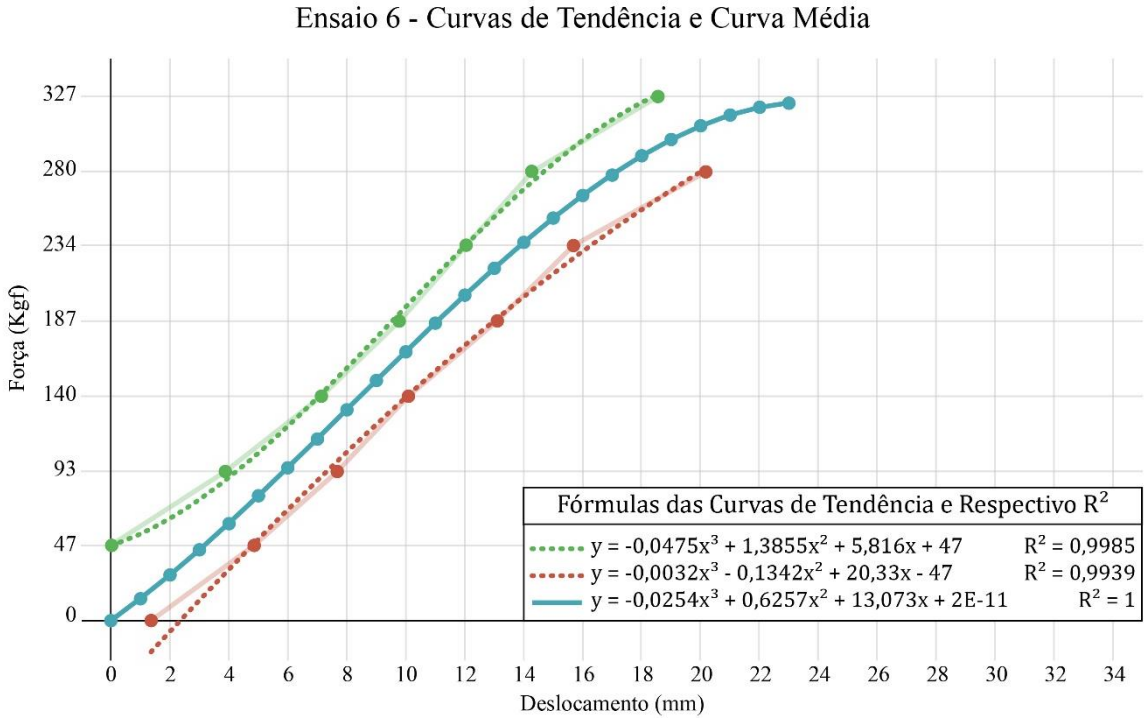
Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Gráfico 16: Ensaio 5 – Curvas de Tendência Superior e Inferior e Curva Média de Tendência.



Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Gráfico 17: Ensaio 6 – Curvas de Tendência Superior e Inferior e Curva Média de Tendência.



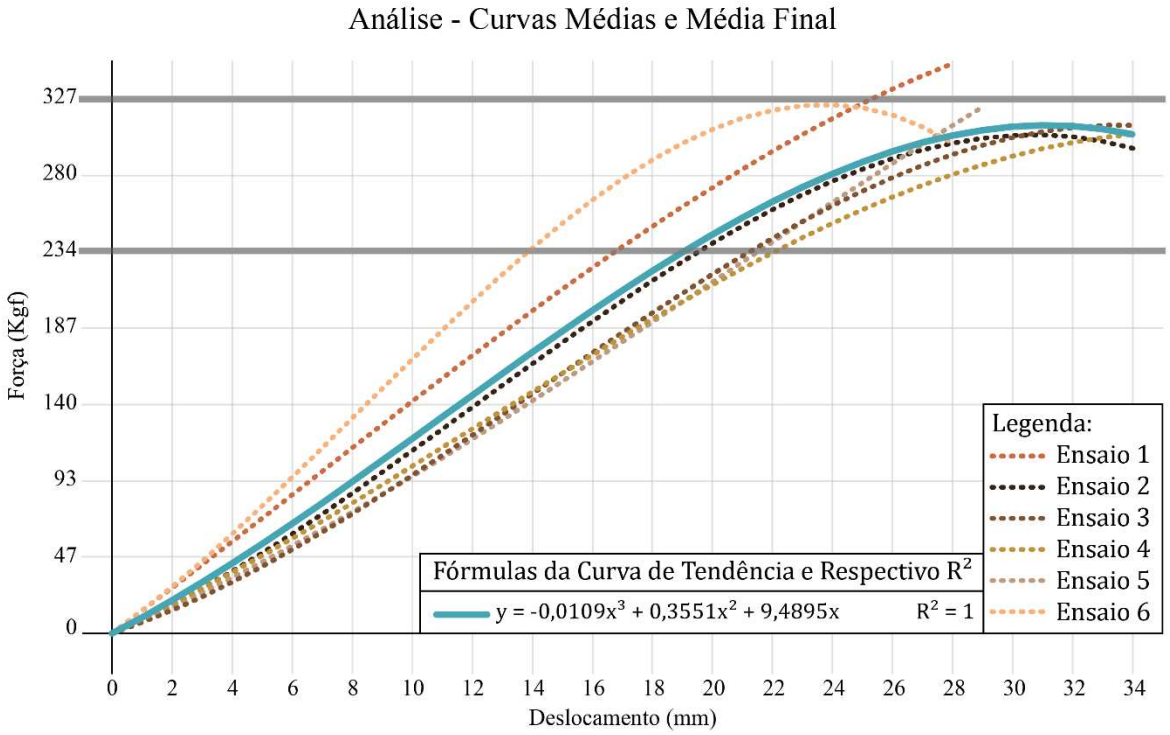
Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Com a definição das Curvas de Tendência Média para cada um dos ensaios realizados, foi possível determinar a Curva de Tendência Média Final. Esta foi definida pela média entre os resultados de cada uma das Curvas de Tendência Média, assumindo, mais uma vez, os valores de x entre 0 e 34 (conforme os valores do Apêndice IV, Tabela G) e visualizada no Gráfico 18. Essa curva é descrita pela função polinomial de terceiro grau, com $R^2 = 1$ (equação 26).

$$\mathbf{y = -0,0109 * x^3 + 0,3551 * x^2 + 9,4895 * x} \qquad \text{(eq. 26)}$$

O Gráfico 18 contém algumas informações importantes, sobretudo para as comparações com as simulações virtuais. Nota-se que todas as Curvas de Tendência apresentam dois padrões de crescimento; um semi linear, até a força aplicada alcançar 234 Kgf (indicando um regime elástico), e outro não-linear, entre 234 Kgf e 327 Kgf (sugerindo um regime plástico). Considerando a equação 26, o valor máximo de y é, aproximadamente 310 Kgf. Dessa forma, é possível assumir (em um primeiro momento) que o limite de resistência de projeto de um leque utilizando essas conexões é de 234 Kgf e a resistência última é de 310 Kgf.

Gráfico 18: Análise das Curvas de Tendência Médias e Média Final das Curvas de Tendência.

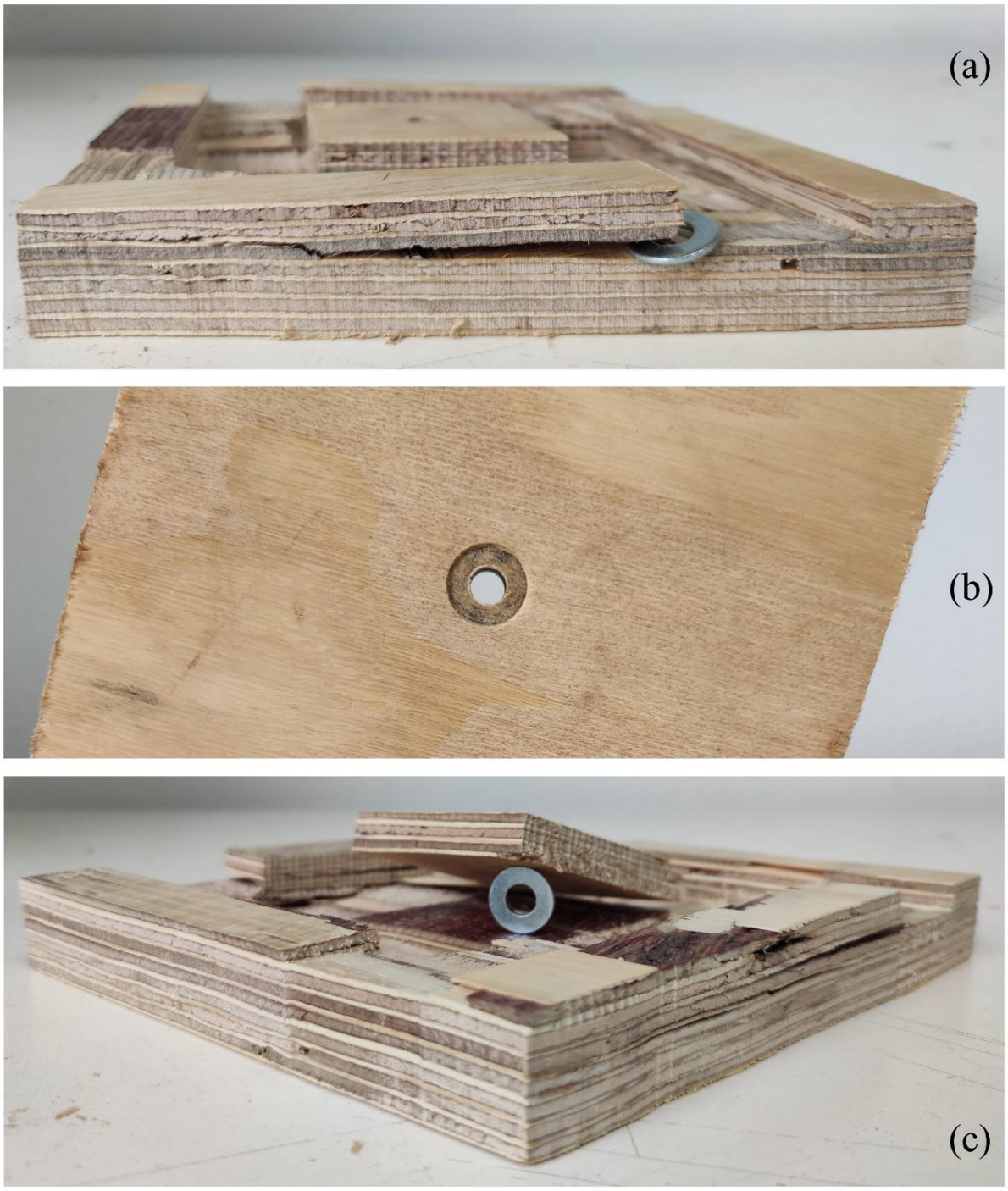


Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Ainda assim, é importante ressaltar que esses valores e a equação 26 não são resultados definitivos, mas sim indicativos do desempenho estrutural de um leque de uma ER utilizando as conexões desenvolvidas. Para se obter resultados mais conclusivos, é necessário realizar ensaios com outras geometrias, aumentar a precisão de registro de forças aplicadas e reformular o quadro inserido na prensa universal, aumentando o grau de travamento do leque. Esses pontos são discutidos com mais profundidade no Capítulo 10.

Com relação ao padrão de deformação das conexões, todos os ensaios apresentaram resultados bastante similares. Rachaduras e quebras foram notadas na região intermediária das placas, principalmente no elemento chamado de Parede da Conexão (Figura 111a), e esmagamento provocado pela pressão da arruela sobre a placa (Figura 111b) em todas as conexões. Em um ensaio específico, também houve ruptura em uma região interna da conexão (Figura 111c). Todos os elementos metálicos e as regiões de entalhe ficaram intactas.

Figura 111: Deformações das placas das conexões. As arruelas foram inseridas nas rachaduras para facilitar a visualização. (a) Rachadura na Parede da Conexão; (b) Esmagamento causado pela pressão da arruela e; (c) Ruptura interna da conexão.



Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

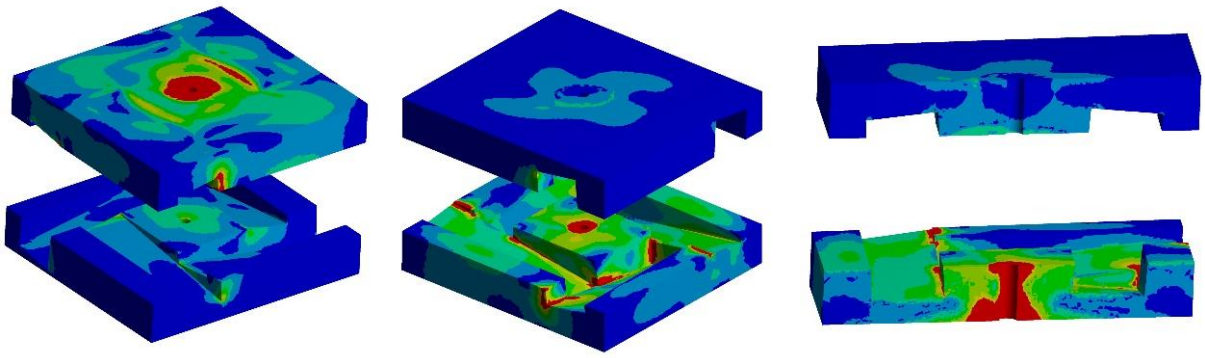
Essas informações sugerem que os principais problemas estão nas dimensões dos elementos e na tendência de rotação dos leques (comportamento relativamente comum em ERs). Algumas possíveis soluções, caso esses comportamentos sejam comprovados como obstáculos reais para o uso das conexões, são o aumento da área de contato entre os elementos metálicos e as conexões e o reforço ou aumento das dimensões das Paredes das Conexões.

8.3.2. Simulações virtuais de comportamento estrutural das conexões

O conjunto de resultados apresentados nessa subseção é focado nos **Modelos** digitais das conexões. São especificados os dados obtidos a partir do modelo tridimensional, feito no Ansys e, do modelo de barras com elementos fictícios, feito no Karamba3D. Também são apontadas as relações entre os resultados obtidos pelos ensaios físicos com os modelos do Ansys e com a calibragem inicial do modelo do Karamba3D. Parte desses resultados faz parte do artigo publicado no periódico IJAC.

No caso da análise por MEF do sólido tridimensional, feita no Ansys, a conexão em um leque isolado apresentou um deslocamento máximo de 0,08087mm e, aproximadamente, -4,51 MPa (compressão) e 4,42 MPa (tração) para as tensões normais principais. A Figura 112 apresenta o resultado visual obtido nesta simulação, sendo que os valores mais significativos foram para as tensões de cisalhamento. As regiões em vermelho indicam valores de concentrações de tensão acima do valor característico de resistência ao cisalhamento do material, enquanto as demais regiões e cores sugerem tensões abaixo do valor característico (CASTRIOTTO *et al*. 2021. Traduzido pelo autor).

Figura 112: Resultado visual da distribuição das tensões de cisalhamento na Conexão Tipo Morsa simulada no Ansys.



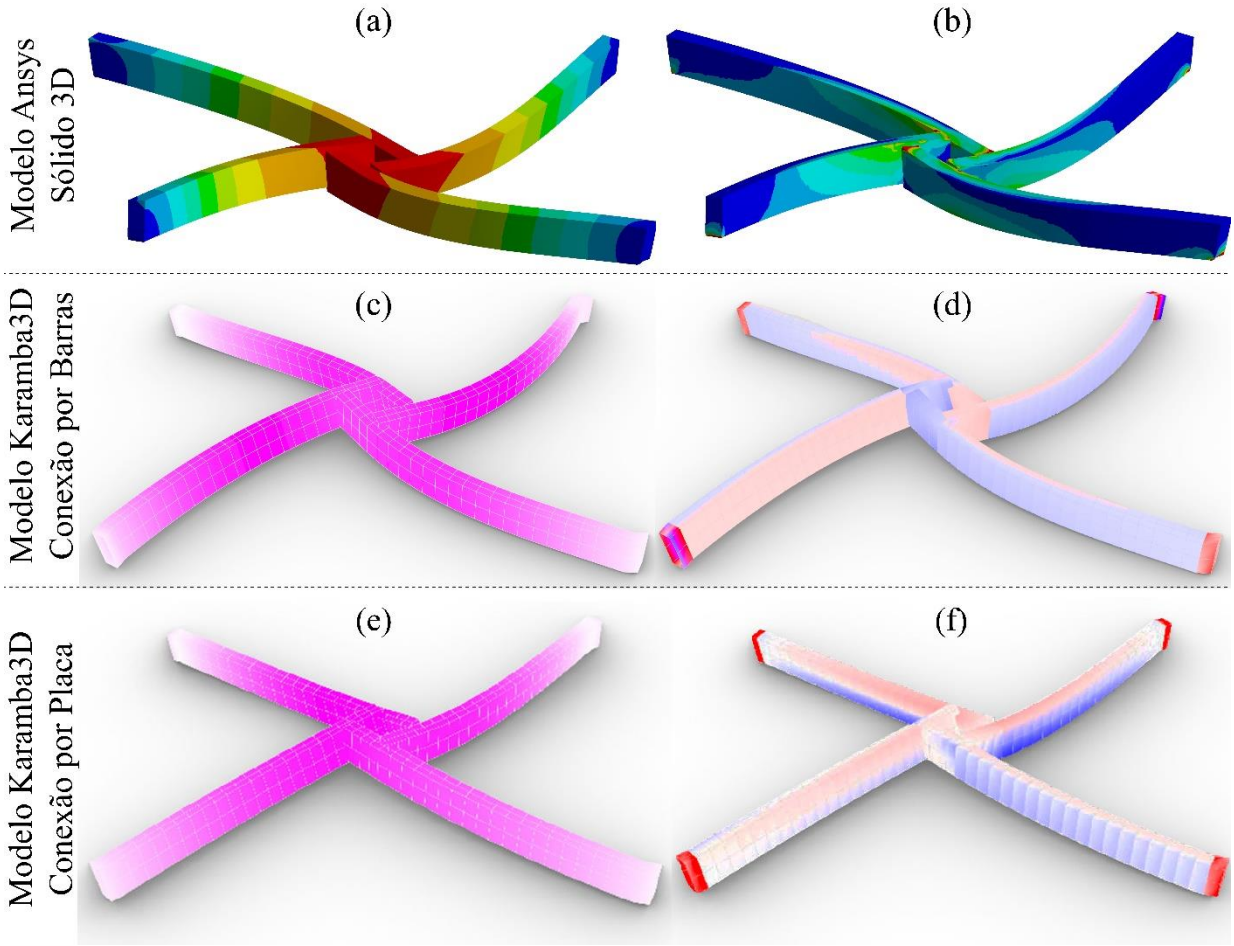
Fonte: CASTRIOTTO *et al,* 2021, p.15.

Considerando que estes valores estão próximos do comportamento físico de um leque isolado, a região de contato entre a barra metálica e a placa da conexão seria crítica, pois assumiria um comportamento plástico para a carga transversal aplicada de 200 Kgf. Contudo, após a plastificação do material nas regiões ao redor das barras metálicas, o material ainda pode apresentar alguma resistência residual, sem causar o colapso da conexão. Também é importante mencionar que: (a) os maiores valores das tensões de cisalhamento, no modelo simulado, ficaram concentradas na conexão e não nos nexors; (b) o atrito entre os nexors e a conexão Tipo Morsa não foi um problema para o comportamento estrutural, sob essas condições de cargas aplicadas, com maior flexão nos nexors e cisalhamento nos elementos de conexão (CASTRIOTTO *et al*. 2021. Traduzido pelo autor).

Os valores para as tensões máximas e para o deslocamento máximo, obtidos no Ansys, foram usados para ajustar as constantes dos elementos fictícios em dois leques equivalentes, um composto por barras e outro por uma placa, ambos simulados no Karamba3D. No primeiro, o resultado foi um deslocamento máximo de 0,076712mm e, aproximadamente, -7,19 MPa (compressão) e 4,13 MPa (tração) de tensões normais principais. Já no segundo, o deslocamento máximo foi de 0,083783mm, e aproximadamente -4,54 MPa (compressão) e 0,54 MPa (tração). Ao comparar os dois casos do Karamba3D com o modelo simulado no Ansys, a variação de valores para a conexão composta por barras foi de -4,9%, +59,4% e +6,5%, enquanto a feita por placa foi de +3,8%, +0,6% e -87,8%.

Outras informações importantes das simulações dos leques são apresentadas de forma visual; no caso do modelo feito no Ansys, a Figura 113a mostra a forma de deslocamento dos nexors, a Figura 113b, contém a intensidade e distribuição das tensões, conforme o critério de falha de Von Mises. Ambas as figuras evidenciam o comportamento estrutural característico dos leques de uma ER, com flexão normal e rotação causada por flexão lateral nos nexors. O deslocamento máximo ocorreu na região de janela do leque, com a presença de flexão oblíqua na dimensão de trabalho do nexor e concentração de tensões nas regiões de contato entre nexors distintos. No caso dos leques simulados no Karamba3D, as Figuras 113c a 113e apresentam os padrões de deslocamento da conexão por barras e por placas, respectivamente, e as Figuras 113d e 113f apresentam a distribuição das tensões principais das conexões, na mesma sequência (CASTRIOTTO *et al*. 2021. Traduzido pelo autor).

Figura 113: Resultado visual dos leques simulados. (a) Padrão de deslocamento no Ansys; (b) Tensões por Von Mises do Ansys; (c) Padrão de deslocamento no Karamba3D para as conexões por barras e; (d) Distribuição de tensões pelo Karamba3D para as conexões por barras; (e) Padrão de deslocamento no Karamba3D para as conexões por placa e; (d) Distribuição de tensões pelo Karamba3D para as conexões por placa



Fontes: (a, b, c, d) CASTRIOTTO *et al,* 2021, p.15; (e, f) elaborado por Felipe Tavares, 2021.

Ao comparar os três modelos simulados, é visualmente perceptível que o comportamento de deformação estrutural é bastante semelhante entre a simulação feita no Ansys e o resultado obtido no Karamba3D com o modelo de barras (Figuras 113a e 113c). Isso sugere, a princípio, uma boa equivalência do uso dos elementos fictícios para representar as conexões no modelo do Karamba3D (CASTRIOTTO *et al*. 2021. Traduzido pelo autor). No caso dos modelos com conexões por placas, foi observada uma rigidez agregada bastante elevada, alterando o padrão de deformação e destoando do comportamento encontrado no modelo do Ansys.

Mais do que isso, os resultados do Karamba3D sugerem um bom ajuste entre o modelo de barras com o modelo do Ansys sob a perspectiva do deslocamento máximo e do esforço de

tração, e um ajuste aceitável em relação às tensões de compressão. Entre o modelo por placa e o modelo do Ansys, o ajuste é bom para o deslocamento máximo e esforços de compressão, mas ruim para os esforços de tração. Do ponto de vista do processo de ajuste das constantes de mola dos elementos fictícios (necessária apenas no modelo bidimensional de barras), os resultados apresentaram valores bastante elevados, entre 1,0E+05 KN/m e 1,0E+27 KN/rad para translação e rotação, respectivamente. Esses números podem ser admitidos como valores infinitos para o modelo estrutural global (CASTRIOTTO *et al*. 2021. Traduzido pelo autor).

De acordo com os resultados obtidos e analisados, assume-se que ambos os modelos do Karamba3D não apresentaram os melhores ajustes para os esforços estruturais. Contudo, o modelo de barras apresentou diferenças menos significativas, além de um padrão de deformação adequado, quando comparado com o modelo do Ansys. Essas informações embasaram a decisão de se utilizar o modelo de barras como representação das conexões nas simulações globais das ERs geradas pelo algoritmo desenvolvido. Para o processo concepção arquitetônica e estrutural, sugere-se o uso de coeficientes de segurança mais elevados ao considerar os esforços nos nexors.

De modo geral, algumas das relações que podem ser estabelecidas entre os resultados simulados com os obtidos pelos ensaios físicos das conexões sustentam algumas premissas, ao mesmo tempo que apontam a necessidade de aprofundamento em estudos futuros. Por um lado, a combinação do esmagamento das placas causado pelas arruelas com a ruptura localizada nas paredes das conexões reforça o argumento de o material apresentar resistência residual na região mais crítica, conforme a simulação. A força de 200 Kgf aplicada na simulação é similar ao limite de projeto definido pelos ensaios físicos, de 234 Kgf. Por outro, o deslocamento obtido pelas duas simulações, para uma mesma força aplicada, foi muito menor do que o encontrado nos ensaios físicos. Essa disparidade indica a importância de se refazer os ensaios físicos com um quadro mais resistente e de se refinar as simulações virtuais.

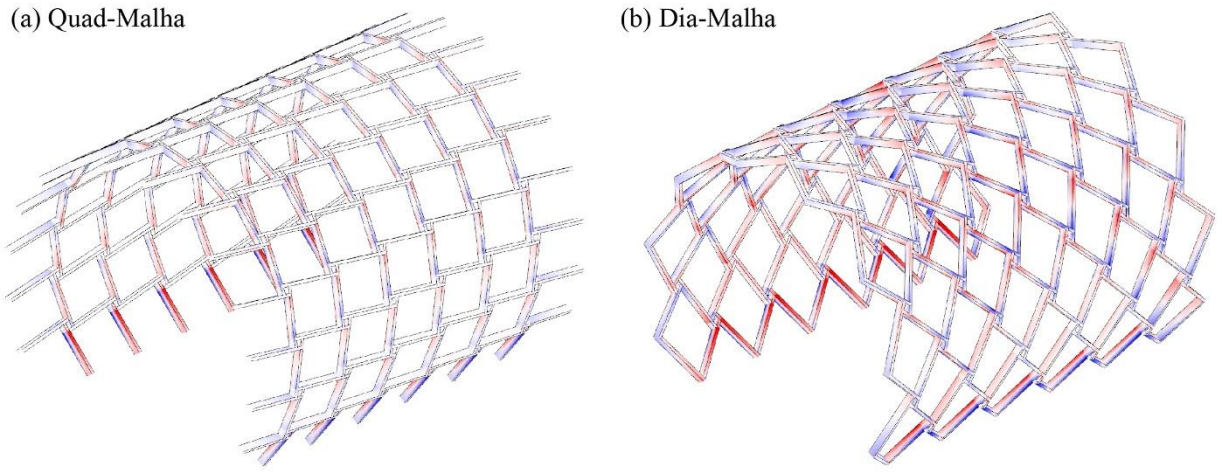
8.3.3. Simulações virtuais de comportamento estrutural global das ERs

Os resultados das simulações podem ser divididos em três grupos: (1) comparativo entre ERs geradas por quad-malha e dia-malha; (2) comparativo entre ERs com e sem conexão; (3) comparativo entre diferentes arranjos da **Instância**.

8.3.3.1. Comparativo entre ERs gerada por Quad-malha e Dia-malha

Conforme explicado no desenvolvimento, o algoritmo foi projetado, inicialmente, para gerar ERs baseadas em Quad-malhas. Para verificar o desempenho desse tipo de arranjo, foi simulada uma estrutura composta por 188 nexors, conforme a Figura 114a. Nela, a cor azul representa tensões de tração e a vermelha, compressão, sendo que a intensidade da cor é diretamente relacionada com a intensidade dos esforços. Dito isso, observa-se que há uma concentração de tensões nos 12 nexors que fixam a estrutura em uma base ou ao solo, sendo que a distribuição dos esforços pro toda a estrutura não é feita de forma eficiente; alguns elementos são quase desnecessários, enquanto há sobrecarga em outros. Comparativamente, a ER gerada por uma dia-malha (Figura 114b), foi composta por 192 nexors, com 12 destes fazendo a interface com os apoios, apresenta uma distribuição de esforços muito mais uniforme em toda a estrutura, sendo que todos os nexors atuam como elementos estruturais efetivamente. Os valores máximos obtidos por simulação para as tensões e deslocamentos, bem como os Índices de Projeto calculados, são apresentados na Tabela 9.

Figura 114: Resultados visuais do desempenho estrutural dos arranjos feitos por (a) Quad-Malha e (b) Dia-Malha.



Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Tabela 9: Valores máximos obtidos para deslocamento e tensões nos arranjos gerados a partir de uma Quad-malha e uma Dia-malha e os valores calculados de Índice de Projeto dos dois casos.

Arranjo de ER	Deslocamento (cm)	Tensão Máxima de Compressão (Mpa)	Tensão Máxima de Tração (Mpa)	Tensão Máxima de Cisalhamento (Mpa)
Quad-Malha	0,0823	- 1,087	0,994	0,072
Dia-Malha	0,0773	- 0,534	0,502	0,049

	Índice de Projeto para Flambagem	Índice de Projeto para Tensão Normal	Índice de Projeto para Tensão de Cisalhamento
Quad-Malha	0,27 %	21,61 %	1,84 %
Dia-Malha	0,17 %	10,70 %	1,89 %

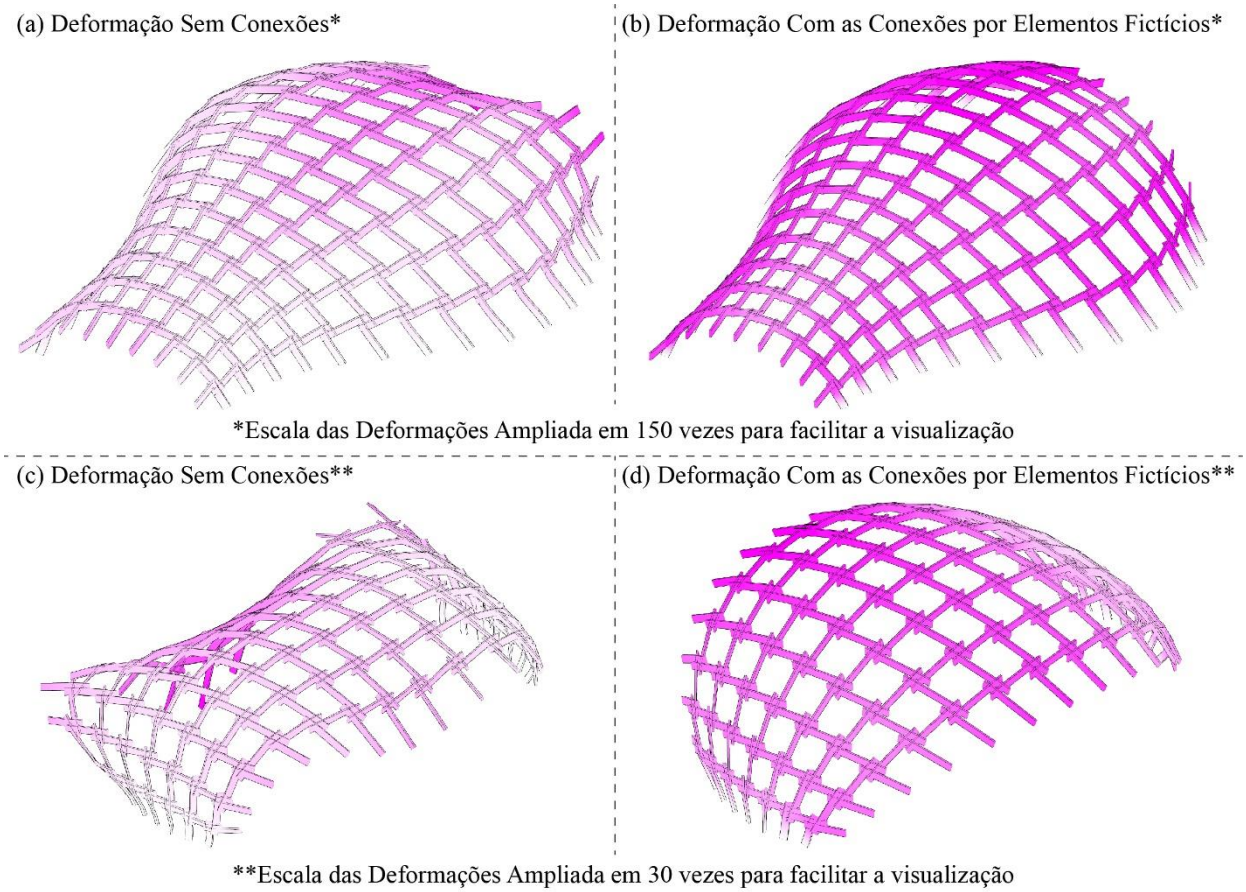
Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Os números apresentados na Tabela 9 evidenciam as disparidades do desempenho estrutural de uma ER gerada por Quad-malha e Dia-malha. No caso da Dia-malha, tanto as tensões máximas de compressão e tração como o Índice de Projeto para tensão Normal são, aproximadamente, metade dos valores obtidos no arranjo gerado por uma Quad-malha. Quando são comparados os outros Índices de Projeto, a tensão máxima de cisalhamento e o deslocamento, as diferenças são menores, mas a ER gerada por Dia-malha ainda apresenta resultados que indicam uma eficiência estrutural consideravelmente maior do que a gerada por Quad-malha.

8.3.3.2. Comparativo entre ERs com e sem as conexões (elementos fictícios)

Nas simulações feitas com as geometrias desenvolvidas pelos Grupos 2 e 3 da disciplina AU 254, foram comparados os resultados (ainda que preliminares) estruturais utilizando um sistema tradicional por encaixes (sendo considerado como sem conexão) e outro usando os elementos fictícios no modelo de barras (com conexão). Algumas das informações obtidas a partir destes testes são apresentadas de forma visual, pelas Figuras 115a – 115d, e numericamente na Tabela 10. De modo geral, os dados apresentados a seguir devem ser considerados sob a ótica de compreender se há alguma participação e qual seria o papel das conexões desenvolvidas, utilizando os modelos compostos por Elementos Fictícios, na rigidez estrutural global dos arranjos de ERs.

Figura 115: Resultados visuais (escala aumentada) do padrão de deformação das estruturas do (a) Grupo 2 sem conexão; (b) Grupo 2 com conexão; (c) Grupo 3 sem conexão e; (d) Grupo 3 com conexão.



Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Tabela 10: Valores máximos obtidos para deslocamento e tensões nos arranjos gerados a partir das ERs geradas pelos Grupos 2 e 3 (AU 254), com e sem conexões e os valores calculados de Índices de Projeto.

Arranjo de ER	Deslocamento (cm)	Tensão Máxima de Compressão (Mpa)	Tensão Máxima de Tração (Mpa)	Tensão Máxima de Cisalhamento (Mpa)
Grupo 2 - Sem Conexão	1,727	- 3,402	3,060	0,299
Grupo 2 - Com Conexão	0,097	- 0,882	0,664	0,047
Grupo 3 - Sem Conexão	14,179	- 7,888	7,964	0,989
Grupo 3 - Com Conexão	0,644	- 3,232	2.771	0,173

	Índice de Projeto para Flambagem	Índice de Projeto para Tensão Normal	Índice de Projeto para Tensão de Cisalhamento
Grupo 2 - Sem Conexão	2,37 %	66,75 %	31,61 %
Grupo 2 - Com Conexão	0,74 %	16,63 %	1,33 %
Grupo 3 - Sem Conexão	5,65 %	205,30 %	102,88 %
Grupo 3 - Com Conexão	0,47 %	63,13 %	12,25 %

Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Ao comparar as Figuras 115a com a 115b e a 115c com a 115d, nota-se que há uma diferença considerável do padrão e da intensidade de deformação e deslocamento de ERs com e sem conexões. Isso sugere que há uma participação importante das conexões desenvolvidas no comportamento global da estrutura. Os dados apresentados na Tabela 10 sustentam esse argumento. Nota-se que os valores de deslocamento máximo para os casos com as conexões representam, aproximadamente, 5% do valor encontrado para o mesmo arranjo estrutural, mas sem o uso das conexões. Os valores para as tensões máximas de tração, compressão e cisalhamento também são consideravelmente menores nos arranjos com conexões. Ao observar os Índices de Projeto, nota-se que o uso das conexões diminui drasticamente os percentuais; tanto que no caso do Grupo 3, os Índices superam 100% (indicando colapso da estrutura) para Tensão Normal e Cisalhamento quando não são utilizadas as conexões.

Mais uma vez, esses resultados são exploratórios e não determinam, com precisão, o impacto das conexões nas ERs. Porém, é possível afirmar que o uso das conexões aumenta a rigidez estrutural e contribui com uma melhor distribuição dos esforços atuantes em toda a estrutura. Os resultados obtidos, tanto nas simulações globais como nos leques isolados, sugerem que as conexões inseridas nas janelas dos leques assumem um comportamento similar ao de um contraventamento, participando ativamente no aumento do grau de rigidez da estrutura.

*8.3.3.3. Comparativo entre ERs da **Instância***

A adoção das dia-malhas para geração das ERs, a calibragem dos elementos fictícios com base no MEF sólido 3D e os dados obtidos pelas comparações feitas nas simulações mencionadas,

serviram para aumentar a compreensão das influências geométricas e das conexões sobre o desempenho estrutural. Com isso, foram simulados, pelo Karamba3D, quatro **Modelos** de ERs como parte de desenvolvimento da **Instância**. Esses eram compostos por barras e elementos fictícios e a única carga considerada foi o peso próprio. A intenção foi verificar a viabilidade da geometria e se as dimensões dos elementos eram estruturalmente adequadas. Simultaneamente, foi proposto comparar qual ou quais configurações teriam a melhor combinação entre total de elementos, apelo estético e desempenho estrutural. Os resultados numéricos relacionados com as tensões, deslocamento e Índices de projeto, estão sintetizados na Tabela 11 (CASTRIOTTO *et al.* 2021) e os visuais são apresentados na Figura 116.

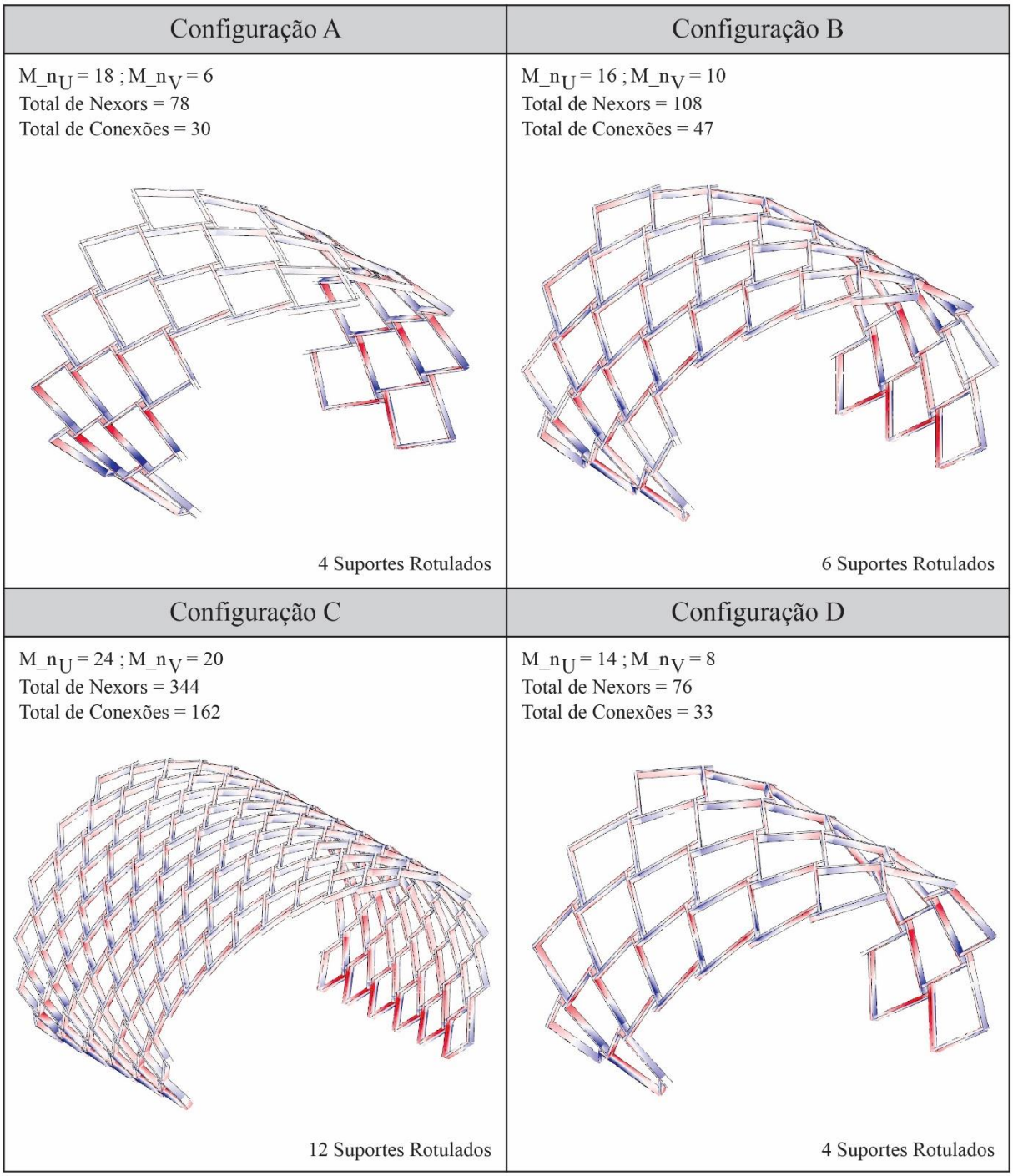
Tabela 11: Valores máximos obtidos para deslocamento e tensões nos arranjos gerados para a **Instância** e os valores calculados de Índices de Projeto dos quatro casos.

Arranjo de ER	Deslocamento (cm)	Tensão Máxima de Compressão (Mpa)	Tensão Máxima de Tração (Mpa)	Tensão Máxima de Cisalhamento (Mpa)
A	0,521	-1,907	1,845	0,124
B	0,110	-0,740	0,645	0,067
C	0,041	-0,465	0,399	0,068
D	0,185	-1,032	0,891	0,084

	Índice de Projeto para Flambagem	Índice de Projeto para Tensão Normal	Índice de Projeto para Tensão de Cisalhamento
A	0,4 %	36,6 %	8,8 %
B	0,2 %	15,6 %	4,1 %
C	0,1 %	8,4 %	4,1 %
D	0,4 %	18,9 %	5,6 %

Fonte: dados retirados de CASTRIOTTO *et al,* 2021, p 15. Complementações feitas pelo autor, 2022.

Figura 116: Resultados visuais das simulações realizadas no Karamba3D das quatro configurações diferentes de ERs em **Modelos** de barras (a, b, c, d), geradas pelo algoritmo.



Fonte: CASTRIOTTO *et al,* 2021, p. 15. Textos traduzidos pelo autor.

Do ponto de vista da distribuição das tensões nos nexors (Figura 116) é possível notar um padrão bastante similar entre cada uma das configurações. O fato de todos os nexors apresentarem as cores azul e vermelha, simultaneamente, indica a presença de esforços de

flexo-compressão e flexo-tração, sendo que os maiores valores estão localizados mais próximos aos pontos de suporte. Entretanto, as principais diferenças entre as quatro configurações podem ser observadas ao analisar os valores da Tabela 11. Para isso, uma breve descrição é apresentada para facilitar a compreensão das comparações:

(a) Configuração A: apresenta o segundo menor número de nexors, com 78 ao todo, com uma subdivisão da malha na proporção de 75% no sentido U e 25% no V. É a configuração com os maiores valores para deslocamento máximo, tensões máximas e Índices de Projeto gerais.

(b) Configuração B: apresenta o segundo maior número de nexors, com 108 ao todo, com uma subdivisão da malha na proporção de 61,5% no sentido U e 38,5% no V. Apresenta valores baixos para deslocamento máximo, tensões máximas e Índices de Projeto gerais.

(c) Configuração C: apresenta o maior número de nexors, com 344 ao todo, com uma subdivisão da malha na proporção de 54,5% no sentido U e 45,5% no V. É a configuração com os menores valores para deslocamento máximo, tensões máximas e Índices de Projeto gerais.

(d) Configuração D: apresenta o menor número de nexors, com 76 ao todo, com uma subdivisão da malha na proporção de 63,6% no sentido U e 36,4% no V. Apresenta valores altos para deslocamento máximo, tensões máximas e Índices de Projeto gerais.

A partir disso, é possível afirmar que há uma correlação complexa entre o número de nexors, a geometria global e os resultados dos esforços. Apesar dos valores gerais da Configuração C serem menores entre todos os arranjos, a Tensão de Cisalhamento Máxima e o Índice de Projeto para Tensão de Cisalhamento são os mesmos encontrados na Configuração B, que apresenta uma quantidade muito menor de nexors. Em paralelo, as Configurações A e D são compostas por, praticamente, a mesma quantidade de nexors, mas o único resultado igual entre ambas é o obtido para o Índice de Projeto para Flambagem. Esses dados são indicativos de que o posicionamento dos nexors na geometria global exerce grande influência sobre o desempenho

estrutural. Para melhor compreensão dessas relações, mais simulações e análises, considerando outros arranjos de ERs, são necessárias.

Com foco apenas para no desempenho estrutural, seria lógico optar pela Configuração C para a definição da **Instância**. Contudo, a quantidade elevada de nexors e de conexões seria um desafio considerando o tempo exigido para produção. Com isso, a Configuração B pareceu ser mais interessante, uma vez que apresentou o segundo desempenho estrutural geral. Ao mesmo tempo, era mais viável do ponto de vista de fabricação, com, aproximadamente, um terço da quantidade de elementos da Configuração C.

Por fim, para garantir que os resultados estruturais globais da Configuração B estavam de acordo com o desempenho dos leques individuais, uma última simulação no Karamba3D foi realizada. Um leque isolado composto pelas conexões como elemento fictícios, foi submetido a uma carga pontual crescente, aplicada no centro da janela do leque, até assumir o mesmo deslocamento máximo obtido na estrutura global (0,110 cm). A carga pontual equivalente foi de 2,5 Kgf, valor bem abaixo do limite de 200,0 Kgf testado nas simulações apresentadas no item 8.3.3.2. Essa abordagem pode ser uma forma de avaliar o nível de força nas conexões Tipo Morsa e a viabilidade em diferentes configurações globais (CASTRIOTTO *et al*. 2021. Traduzido pelo autor).

8.4. INFORMAÇÕES OBTIDAS PELA FABRICAÇÃO E MONTAGEM

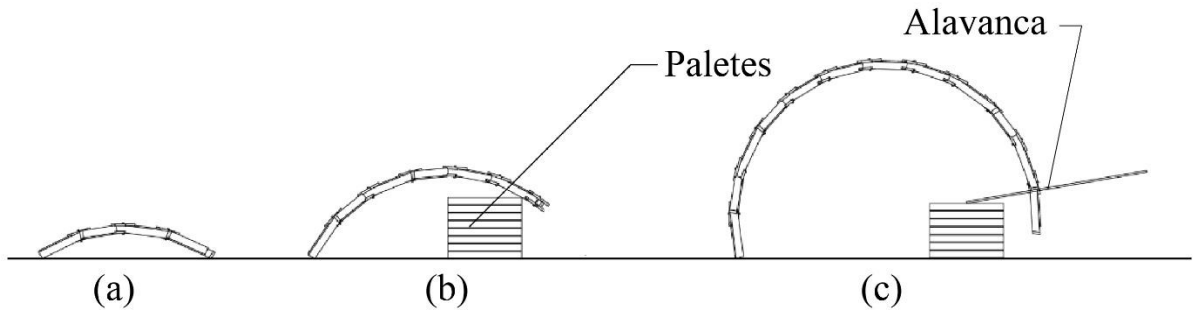
Conforme evidenciado durante o capítulo de desenvolvimento, pode-se dizer que o processo de fabricação e montagem foi bem sucedido, uma vez que a **Instância** foi construída em sua totalidade. Por conta disso, esta seção apresenta resultados específicos de ambos os processos.

Do ponto de vista de fabricação, os nexors foram produzidos nas dimensões corretas com facilidade, dada a possibilidade de se utilizar uma serra industrial com lâmina inclinável nas angulações necessárias. Os principais desafios estavam relacionados com a produção das conexões. O uso de uma tupia combinada com os gabaritos impressos em 3D foi, de fato, uma solução prática para a definição correta das geometrias dos entalhes. Porém, esse método de fabricação implicou em elevado esforço físico; para a fresagem de todos os entalhes presentes em cada uma das 94 placas, eram necessários, aproximadamente, trinta minutos. Além disso, foi possível reutilizar os quatro gabaritos impressos em 3D para a fabricação de todas as

conexões. Entretanto, devido à fragilidade dos materiais e a força do equipamento de fabricação, era comum que danos fossem causados aos elementos em MDF, alocados nas paredes internas dos gabaritos. Por conta disso, eles tiveram que ser trocados a cada dez placas fresadas. Tendo em mente que foram fresadas 94 placas, o tempo de produção total das 47 conexões utilizadas na **Instância** foi de, mais ou menos, 50 horas.

Com relação ao processo de montagem adotado, as principais vantagens eram o fato de a estrutura ser autoportante durante todas as etapas e, ao contrário de muitos sistemas construtivos, não era necessário que as pessoas trabalhassem em altura; à medida que as linhas de elementos são adicionadas a estrutura ganha tamanho de forma gradual, mas a altura de trabalho é mantida (Figura 117a – 117c). Isso dispensou o uso de gruas, andaimes ou plataformas elevadas para as pessoas que estavam trabalhando ou para içar a estrutura.

Figura 117: Diagrama do processo de montagem da estrutura. (a) primeiros elementos montados sem nenhum suporte; (b) adição de paletes para regular a altura; (c) introdução do sistema de alavanca para as últimas etapas.



Fonte: elaborado por Xan Browne e pelo autor, 2021.

Também é importante mencionar o fato de que é comum, em sistemas modulares com muitas partes, o acúmulo de erros geométricos que, eventualmente, podem resultar grandes disparidades com o projeto. Todavia, no caso da **Instância**, graus de tolerância sobre as dimensões dos elementos foram considerados desde a concepção; foram calculados, projetados e fabricados, permitindo que todos os nexors fossem posicionados e fixados com precisão no local planejado. Simultaneamente, o uso da conexão Tipo Morsa viabilizou a montagem dos leques com travamentos parciais, o que garantiu a possibilidade de ajustes pontuais durante o processo.

Por fim, a estrutura foi remontada, com os mesmos elementos usados na **Instância**, para a exposição 70% Less CO2, que ocorreu em 2021 em Copenhague (Figura 118). Nessa situação, houve a possibilidade de verificar alguns aspectos e introduzir alguns novos elementos. A remontagem foi feita de forma parcial por dois motivos centrais. Tratou-se tanto de uma exigência vinda do grupo que coordenava o espaço de exposições, como também a possibilidade de evidenciar a flexibilidade no processo de montagem. Neste sentido, foram removidas duas fileiras de nexors e cinco conexões de cada lado do pavilhão, que se manteve completamente estável. Além disso, foi implementado um sistema parcial de cobertura, composto por telhas de madeira (também de reaproveitamento), como um demonstrativo do que poderia ser usado no pavilhão como um todo. O uso da estrutura nessa exposição também sustenta a ideia de montar, desmontar, armazenar e remontar a estrutura diversas vezes, adaptando o número de leques para cada caso.

Figura 118: Remontagem da estrutura com os mesmos elementos utilizados na **Instância**, durante a exposição 70% Less CO2, em Copenhague.

Fonte: foto do acervo de Xan Browne, 2021.

9. TEORIA EMERGENTE: REFLEXÕES

> *Para evitar que nossa catraca cultural avance sem controle rumo ao colapso global, precisamos ampliar nossa perspectiva. Precisamos urgentemente recuperar a capacidade de imaginar as piores consequências de nossos hábitos mais arraigados. A ciência dos biólogos, químicos e físicos precisa caminhar de braços dados com a sabedoria dos xamãs e iogues, jamais contra elas. Em sua amplidão, o sonho lúcido tem potencial para ser o espaço mental que nos permitirá imaginar soluções para os problemas mais desafiadores.*
>
> *RIBEIRO, Sidarta*[21].

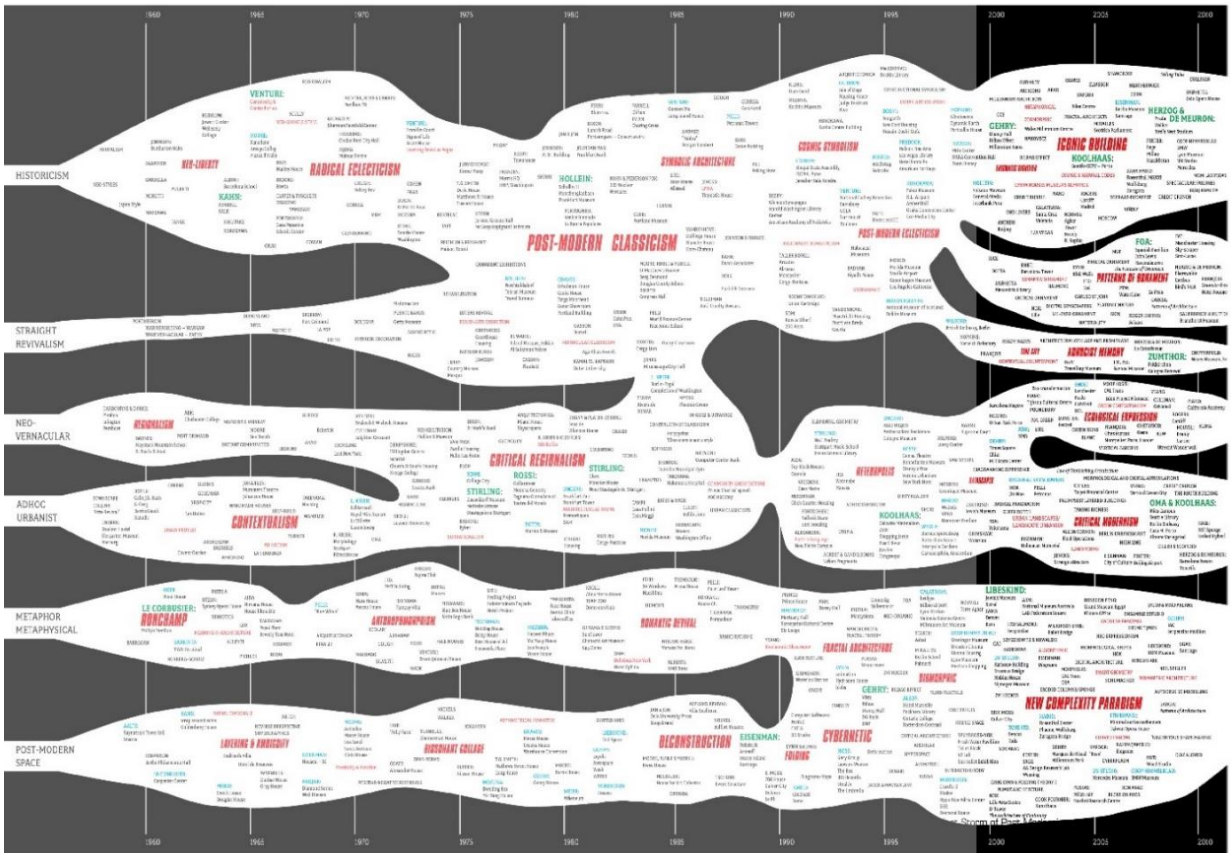
Dentro do método científico DSR, a **Teoria Emergente** pode ser considerada como uma das principais contribuições para o campo do conhecimento em que a pesquisa ocorre. Até este capítulo, foram apresentados os desenvolvimentos do **Artefato** como algo tangível, materializado no mundo físico e/ou virtual. Porém, a discussão proposta neste capítulo avança para o campo das ideias, das abstrações e das reflexões, usando o Elo Recíproco como manifestação de um paradigma da arquitetura contemporânea, mais especificamente no nível do detalhamento. Mas, antes, algumas constatações precisam ser feitas.

i. **Os processos digitais de projeto, fabricação e montagem não são algo novo, mas já se encontram cunhados na história recente da arquitetura.** Isso fica mais evidente ao observar a Árvore Evolucionária (JENCKS, 2015) (Figura 119), feita em 1971 e atualizada em 2000 e em 2015 por Charles Jencks, que traça os desdobramentos da produção arquitetônica desde meados do século XX até pós anos 2010. De acordo com Jencks (2015), pelo menos seis caminhos distintos indicam caminhos para o futuro da arquitetura, porém, em quase todos, o digital é absorvido como parte integrante do processo de projeto. Com um olhar mais atento para o Árvore Evolucionária, é possível constatar alguns exemplos, como o Disney

[21] RIBEIRO, Sidarta. **O oráculo da noite:** A história e a ciência do sono. 1 ed. São Paulo: Companhia das Letras, 2019. p. 379.

Concert Hall de Frank Gehry (*Iconic Building*), Blob Walls de Greg Lynn (*Patterns of Ornament*), The Gridshell de Ted Cullinan (*Ecological Expression*), City of Culture de Peter Eisenman (*Critical Modernism*) e, Mercedes Museum do UN Studio (*New Complexity Paradigm*).

Figura 119: Árvore Evolucionária atualizada feita por Charles Jencks (2015). Os últimos caminhos discutidos por Jencks (a partir dos anos 2000) estão destacados, sendo eles, de cima para baixo: *Iconic Building, Patterns of Ornament, Adhocist Memory, Ecological Expression, Critical Modernism* e *New Complexity Paradigm*.



Fonte: JENCKS, 2015, p. 100[22]. Editado pelo autor da tese.

ii. **Há uma tentativa de se estabelecer uma definição mais clara sobre o papel do Detalhe na retórica arquitetônica.** Para isso, Ford (2011) analisa as formas de manifestação do detalhe em diversos períodos históricos, em produções arquitetônicas distintas, e acaba estabelecendo cinco categorias que variam de acordo com as propriedades, intenções e razões. A resposta que Ford (2011)

[22] Charles Jencks costumava afirmar que seus diagramas, tal como a Árvore Evolucionária, era livre de direitos autorais para que pudesse servir como base para desenvolvimentos futuros.

encontra para a pergunta “O que é um Detalhe?” engloba, de certo modo, todas as categorias estabelecidas por ele: não são objetos estáticos, símbolos ou dispositivos, mas uma forma de mediação entre idealização e realização, resultante do ato consciente de se criar e conciliar as imperfeições e as demandas da edificação.

iii. **Há uma vasta literatura que constata o papel do Detalhe como um mecanismo capaz de viabilizar obras e solucionar problemas.** Em parte, isso se relaciona com a inserção das tecnologias digitais no universo de arquitetura, como mencionado no Capítulo 3 desta tese e, mais especificamente, evidenciado por Deplazes (2005), Ford (2014), Celani (2014), Burry (2014), e Walz (2015). Para melhor compreender isso, são resgastados dois exemplos citados na revisão da literatura.

No caso apresentado sobre o Aviva Stadium, as explicações feitas por Shepherd, Hudson e Hines (2011) são focadas no funcionamento, na materialidade e na importância do elemento em questão como parte da solução de projeto. Ao mesmo tempo, há uma ausência de discussões ou questionamentos relacionados com a concepção, idealização e interferências do detalhe no processo de projeto. Nesse sentido, é de se indagar: seria o detalhe algo garantido, entendido como um mecanismo realizado e que já cumpriu sua função?

Por sua vez, Whitehead (*apud* MENGES, 2006) afirma que a compreensão sobre a produção do detalhe e a comunicação por métodos geométrico, estabelecida inicialmente no projeto do Re Swiss, se tornou um precedente importante para os trabalhos futuros. Nesse sentido, as limitações estão concentradas nas formas e na capacidade de comunicação de uma ideia do que na tecnologia para sua produção.

Com essas três constatações em mente, é possível identificar duas Fronteiras[23] em que o Detalhe Arquitetônico se encontra. Uma, denominada nesta tese como a Fronteira da Instância, é

[23] Uma Fronteira não é aquela em que algo termina, mas, como os gregos reconheceram, a Fronteira é aquilo em que algo começa a se manifestar. É por isso que o conceito é de “horismos”, isto é, do horizonte, da Fronteira. O espaço é, em essência, aquilo que foi criado com um propósito, aquilo que acontece dentro de seus limites. (HEIDEGGER, Martin, 1971, p. 152. Traduzido pelo autor)

reconhecida e preservada há séculos: a de transição entre concepção e execução, de aumento de informações e especificações, de mecanismo para instanciação e viabilização do projeto ou do objeto. É nessa Fronteira que Shepherd, Hudson e Hines (2011) e Munro (2004) concentram suas explicações, e também é nela que é mais ou menos possível categorizar os detalhes conforme os cinco tipos propostos por Ford (2011). No caso desta tese, a Fronteira da Instância é ocupada pela forma do Elo Recíproco instanciado, produzido, sua forma como uma conexão física, palpável e que integra a montagem e a estrutura.

A Fronteira da Instância é a que explicita uma mudança sobre o processo de produção do detalhe. Aos poucos, o vínculo com a representação gráfica (nas etapas de execução, principalmente) e com as especificações de materiais ou propriedades, interpretada por um ser humano, é dissolvida. Em seu lugar, surge o desenho de fabricação, que não é apenas uma representação, mas sim o detalhe (ou suas partes) em si, lido e processado por um equipamento de Fabricação Digital. Apesar de ser difícil de prever o quão profunda é a transformação observada nessa Fronteira, no atual cenário da arquitetura, entende-se que ela está relacionada com as possibilidades tecnológicas que fazem a interface entre projeto e produção. Se esse é o caso, há de se notar que, provavelmente, a Fronteira da Instância continuará sendo transformada com o surgimento de novas ferramentas, tecnologias, métodos e equipamentos de projeto, fabricação e montagem.

A outra é a Fronteira do Construto e, assim como a Fronteira da Instância, é possível assumir que ela sempre existiu. Entretanto, o processo de reconhecimento dela é bem mais recente, conforme indicações feitas por alguns autores. Nas palavras de Ford (2011) “o bom detalhe não é consistente, mas não-conformador; não típico, mas excepcional; não doutrinário, mas herético; não a continuação de uma ideia, mas sua finalização e o começo de uma outra” (FORD, 2011, p. 312. Traduzido pelo autor). A definição do Detalhe Digital também sugere a existência dessa Fronteira “os Detalhes Digitais podem se adaptar a diferentes condições marginais. Eles podem organizar sua própria criação; e podem reduzir, consideravelmente, a quantidade de construções auxiliares necessárias para a montagem” (WALZ, 2015, p. 551. Traduzido pelo autor). É a compreensão do Detalhe, nessa Fronteira, que é apresentada por Whitehead no texto de Menges (2016), sobre os elementos de fixação do Re Swiss.

A Fronteira do Construto é aquela em que o Detalhe faz parte do processo de abstração, de concepção, das etapas iniciais do processo de projeto. Ele assume a forma de um construto ou

esquema mental, regido por regras, comandos e diretrizes; o Detalhe na Fronteira do Construto não é definido por valores absolutos de dimensões e de propriedades físicas, mas explora inúmeras características geométricas, estruturais, de conforto ambiental e de materialidade. Isso é garantido pela variação de parâmetros adaptativos, que tentam estabelecer um domínio de soluções possíveis.

Ao observar, mais uma vez, o desenvolvimento do Elo Recíproco, a Fronteira do Construto pode ser explicitada pelo método de geração das conexões (apresentado anteriormente no Quadro 3). Nesse caso, o Detalhe é referente às regras, parâmetros e comandos que ditam as condições de geração e de existências das conexões, de forma automatizada; ele é composto por operações matemáticas e geométricas, por relações de causa e efeito (*IF, THEN*). O Detalhe deve ser, então, compreendido a partir de cada uma das variáveis que o constituem, sejam elas independentes ou dependentes. Isso pode ser observado em diversos aspectos do método de geração das conexões Tipo Morsa do Elo Recíproco. Para mencionar alguns:

a) O controle de parâmetros que definem dimensões das conexões, como a Espessura de Entalhe (**C_f**) e a Espessura de Rigidez (**C_r**);
b) A equação 24, que calcula e adapta a translação da geração dos planos de orientação das peças superior e inferior das conexões;
c) A condicionante em que a soma do valor das Espessuras de Entalhe deve ser menor do que a altura da seção transversal do nexor;
d) A relação estabelecida entre os Ângulos de Inclinação e a Espessura total da Conexão (visto na Figura 81);
e) Os avisos visuais de erros, que surgem quando as condições e regras não são satisfeitas (como apresentado anteriormente na Figura 106) ou;
f) As inúmeras possibilidades de geometrias de conexões, seja para o encontro entre três, quatro ou seis nexors, que podem ser definidas pelo mesmo método (conforme as Figuras 109 e 110).

Whitehead (*apud* MENGES, 2006) menciona a importância de se estabelecer métodos para a comunicação desses Detalhes programáveis, adaptativos, que estão na Fronteira do Construto. Nesse sentido, uma das contribuições desta tese é de demonstrar como isso pode ser feito. Para o desenvolvimento do Elo Recíproco, o **Construto** enuncia as primeiras abstrações, os princípios norteadores, a fundamentação geométrica, as principais diretrizes e os requerimentos

que as conexões deveriam cumprir. O **Método** incorpora o **Construto** e o transforma em parâmetros, regras, comandos e condicionantes, que devem ser avaliados, refinados, testados e simulados, tanto na perspectiva das relações intrínsecas do próprio Detalhe, como nas suas relações com o projeto como um todo. Isso pode ser feito com o uso de modelos virtuais e físicos e comunicados por meio de diagramas, textos e esquemas que registram o passo a passo do desenvolvimento do Detalhe.

A partir disso, há um aumento substancial na garantia de sucesso da geração automatizada de um Detalhe, que se adapta aos diferentes níveis de complexidade e que deixa evidente suas limitações; um mecanismo de viabilização fundamental para a produção contemporânea de arquitetura, que incentiva uma relação recíproca entre o processo de desenvolvimento de projeto e do detalhe – um influencia o outro e as decisões podem ser mais facilmente tomadas. Em seguida, o Detalhe pode deixar de ser algo em potencial para assumir sua forma instanciada, como um mecanismo e produto capaz de viabilizar a execução. Assim, o limite da Fronteira do Construto é estabelecido pelo início da Fronteira da Instância.

Por fim, sugerimos uma última reflexão. O provérbio “Deus está nos Detalhes” é atribuído a diversas personalidades, principalmente a Ludwig Mies van der Rohe (1886 – 1969). Sua versão oposta, “O Demônio está nos Detalhes”, pode ser encontrada em textos que relatam a situação da Europa no período pós Segunda Guerra Mundial. Apesar do sentido obviamente figurativo de ambas as frases, é garantido ao Detalhe uma conotação quase mística. Não é para menos, uma vez que o Detalhe (em arquitetura) foi tido como algo garantido por séculos, sobretudo pós processos de estandardização e industrialização. Mas refletir e repensar a importância da produção do Detalhe como algo que integra o processo de projeto indica a realidade sobre o que, realmente, está no Detalhe: a criatividade humana e o seu poder para resolver problemas. Por isso, podemos dizer que a Ciência está nos Detalhes.

10. CONCLUSÕES

> *Se a minha não é uma presença neutra na história, devo assumir tão criticamente quanto possível sua politicidade. Se, na verdade, não estou no mundo para simplesmente a ele me adaptar, mas para transformá-lo; se não é possível mudá-lo sem um certo sonho ou projeto de mundo, devo usar toda possibilidade que tenha para não apenas falar de minha utopia, mas para participar de práticas com ela coerentes. [...]E é na condição de seres transformadores que percebemos que a nossa possibilidade de nos adaptar não esgota em nós o nosso estar no mundo. É porque podemos* ***transformar*** *o mundo, que estamos* ***com*** *ele e* ***com*** *outros.*
>
> *FREIRE, Paulo*[24].

A epígrafe acima serve para reforçar um fato relacionado com este décimo e último capítulo: apesar da premissa do desenvolvimento de uma pesquisa científica ser a replicabilidade e a obtenção dos mesmos resultados, as conclusões dificilmente seriam idênticas. É quase impossível dizer que as constatações, os achados e as críticas apresentadas neste capítulo são completamente impessoais, pois são feitas a partir do diálogo entre pesquisador e pesquisa. Preferi fazer essa constatação para que fique claro: as palavras a seguir não devem ser tomadas como conclusões absolutas, imutáveis e definitivas. Mas, quando possível, que elas guiem reflexões e discussões que possam garantir o avanço da ciência para um futuro melhor.

A criação e o desenvolvimento do Elo Recíproco partiram da compreensão das Estruturas Recíprocas e de seus mecanismos de conexão como a Classe de Problemas a ser trabalhada. Esta é orbitada por outros três temas principais, abordados por uma revisão geral da literatura: (a) o uso da madeira como material construtivo estrutural e como uma alternativa mais sustentável na construção civil; (b) a aplicação de tecnologias digitais de projeto e fabricação como um meio para alcançar soluções mais inteligentes, viáveis e que, outrora, não seriam

[24] FREIRE, Paulo. **Pedagogia da indignação:** cartas pedagógicas e outros escritos. São Paulo: Editora UNESP, 2000. p. 17.

possíveis e; (c) o entendimento e absorção de conceitos e princípios que se relacionam com profundas transformações sobre a forma de produção do detalhe arquitetônico.

Para um aprofundamento no tema e para garantir que o desenvolvimento desta pesquisa preenchesse uma lacuna específica do conhecimento sobre ERs, foi realizada (e constantemente atualizada) uma RSL sobre o tema. Em seguida, para estabelecer uma estrutura de trabalho clara e que visasse a produção do conhecimento e de uma nova solução, com o devido rigor científico, foi adotado o método DSR. Nele, um **Artefato** criado pode ser constituído por até cinco partes distintas, nomeadas como **Construto**, **Método**, **Modelo**, **Instância** e **Teoria Emergente**. De fato, o DSR foi um dos instrumentos que garantiu o pleno desenvolvimento desta pesquisa e a obtenção de resultados significativos.

O desenvolvimento seguiu a ordem dos produtos do DSR para a criação do **Artefato**, nomeado como Elo Recíproco. A elaboração do **Construto** foi essencial para a compreensão de relações geométricas de padrões que podem gerar ERs, baseado no estudo sobre os Grupos de Papel de Parede. Simultaneamente, foi possível estabelecer diretrizes claras para a concepção e o aprimoramento das conexões Tipo Morsa. O desenvolvimento de um **Método** algorítmico-adaptativo incorporou regras, parâmetros e comandos, o que permitiu a geração de diversos **Modelos**. Estes foram usados para estudos, explorações, comparações e simulações, em quatro séries geométricas e uma série paralela de compreensão estrutural. Os aprendizados de cada série de **Modelos** serviram como base para modificações e refinamentos no **Método**. Isso culminou em uma melhor compreensão de aspectos estéticos, de desempenho estrutural, de fabricação, e de montagem, manifestados na **Instância**. É importante reconhecer que as soluções relativas ao processo de criação do **Artefato** provavelmente não seriam alcançadas por outros métodos de projeto e de pesquisa.

Os resultados evidenciam as principais conquistas obtidas pelo desenvolvimento do algoritmo e do novo sistema de conexão. O elevado grau de controle sobre as variáveis geométricas, bem como a definição de condicionantes e limitações, permite a geração de inúmeras configurações distintas de ERs e das respectivas conexões de forma automatizada. Ao mesmo tempo, a integração com simulações estruturais, embasadas em testes físicos, auxilia na verificação da viabilidade do projeto.

Mais especificamente com relação às conexões Tipo Morsa, diversos aspectos devem ser mencionados. O elevado nível de adaptabilidade e personalização resultam em inúmeras variações possíveis, dando origem a uma família de conexões possíveis. Mais do que isso, as conexões Tipo Morsa são, na realidade, instanciações de um construto mental formado por regras, processos e parâmetros. Os caminhos e estratégias traçados para o desenvolvimento das conexões culminaram em melhor controle geométrico, aumento da rigidez estrutural e maior tolerância para a excentricidade entre nexors. Também puderam ser constatados elevados níveis de Flexibilidade de Produção das conexões, considerando as diversas adaptações geométricas que podem ser feitas nas etapas de concepção, e que se relacionam com os meios de fabricação disponíveis. Sob a perspectiva da montagem, duas das principais vantagens são notadas pela facilidade e rapidez. Essas conexões também passam a integrar e ilustrar a **Teoria Emergente** com reflexões sobre as transformações relacionadas com a concepção e fabricação do detalhe arquitetônico, reconhecendo duas Fronteiras: a do Construto e a da Instância. Por fim, reconhece-se que o sistema Tipo Morsa permite a concentração da complexidade geométrica, de fabricação e de montagem no elemento de conexão. Desse modo, é possível especular que, caso sejam feitas obras em locais remotos, de difícil acesso ou de caráter emergêncial, seria possível industrializar e transportar apenas as conexões, uma vez que os nexors poderiam ser produzidos com equipamentos locais.

10.1. CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS

Considerando todo o percurso realizado nesta pesquisa, constatamos quatro contribuições científicas efetivas mais relevantes, entendidas como:

i. **Fundamentação e sistematização das ERs como um tema de pesquisa:** a realização da RSL sobre ERs (e sua constante atualização) desempenhou um papel fundamental no desenvolvimento da pesquisa, servindo de alicerce para se obter uma visão mais holística da Classe de Problemas. Essa contribuição pode ser separada em duas frentes.

   A primeira é referente a própria sistematização dos estudos encontrados. O agrupamento dos artigos em cinco categorias distintas, distribuídas conforme o ano de publicação, permite a constatação de tendências de frentes de trabalho; do aumento no interesse e da relevância das ERs no meio científico; dos principais

assuntos e desafios correlatos e; dos avanços e soluções mais recentes. Com esses dados, foi possível identificar algumas das lacunas mais relevantes para o desenvolvimento de ERs, tanto sob o ponto de vista teórico como prático. Assim, a RSL conduzida por nós integra um pequeno conjunto de estudos que propõem uma maior ordenação e definição de campo do conhecimento em questão.

A segunda frente diz respeito à compreensão do que são as ERs, quais são seus principais elementos e quais são os aspectos geométricos e estruturais que as definem. Ainda existem poucos estudos (quando comparados aos relacionados com outros tipos de estruturas espaciais, como *gridshells*) que se debruçam sobre o tema e o apresentam de forma clara, especialmente no contexto brasileiro. Nesse sentido, a RSL pode servir como uma ferramenta para apresentar assunto a um público que tem pouca ou nenhuma familiaridade com as ERs.

ii. **Avanços relacionados com o desenvolvimento de ERs:** conforme evidenciado pela RSL, a abordagem de solucionar ERs a partir do sistema de conexões não é muito tradicional. Contudo, foi justamente esse caminho que possibilitou o desenvolvimento de um novo produto e a obtenção de resultados que, dificilmente, seriam alcançados de outra forma. A seguir, são listadas as principais descobertas e contribuições específicas desta tese para o campo do conhecimento das ERs:

    a. Com essa abordagem, a preocupação central deixa de ser a excentricidade entre os elementos. Isso dá espaço para explorações geométricas e estruturais de outros parâmetros que compõem a complexidade das ERs;
    b. O desenvolvimento de conexões específicas para ERs pode ser uma forma de ajudar no desempenho estrutural, aumentando a rigidez ou sugerindo deformações em padrões específicos;
    c. É fato que ferramentas algorítmicas e paramétricas podem ser usadas para automatizar a geração dos padrões geométricos das estruturas. Mais do que isso, a experiência descrita nesta pesquisa deixa evidente o potencial de se combinar algoritmos com simulações estruturais e processos de Fabricação Digital. O uso desse ferramental é o que garantiu a alta adaptabilidade das configurações de ERs a formas livres, a realização de testes rápidos em diversas geometrias, com

respostas de desempenho estrutural e, que possibilita desvendar possibilidades imprevisíveis;

d. Por vezes, abstrações baseadas em dados podem ser usadas para simplificar certos problemas e conformar uma estrutura de trabalho dinâmica, com indicativos de viabilidade de desempenho nos estágios iniciais do processo de projeto;
e. As ERs são compostas por uma quantidade elevada de elementos. Por isso, é fundamental o planejamento dos processos de fabricação, visando elevada Flexibilidade, e a facilidade de montagem.

iii. **Estrutura de trabalho híbrida com o uso de ferramentas digitais de projeto e fabricação:** a aplicação de tecnologias digitais como um meio para solucionar problemas é algo que ocorre há pelo menos uma década, e que já provou ser bem sucedida em diversas áreas do conhecimento, inclusive para arquitetura e construção civil. Assim, entendemos que nossa contribuição está associada com os processos iterativos e incrementais e com a adoção de uma estrutura de trabalho híbrida, constituída por duas frentes: uma virtual e outra física. A produção de modelos físicos e virtuais permite um processo de complementação mútua, com o refinamento e a verificação das informações geradas a cada etapa da pesquisa.

Por um lado, o ambiente virtual permite lidar com operações geométricas e cálculos estruturais complexos. As ERs são constituídas por uma grande quantidade de elementos, que possuem relações específicas entre si. Nesse sentido, a criação de um algoritmo para a geração automatizada dessas estruturas e de suas conexões exige um elevado controle sobre os dados geométricos, sobretudo visando elevados níveis de personalização e adaptabilidade. Conforme visualizado no **Artefato**, isso só é efetivamente alcançado ao estabelecer regras geométricas e matemáticas que alteram as combinações e a relações dos elementos, definindo variáveis dependentes que sofrem alterações conforme os valores dos parâmetros independentes de entrada. Simultaneamente, as características estruturais das ERs praticamente inviabilizam a aplicação de métodos tradicionais de cálculo. Por isso a automação apenas do arranjo geométrico pode não ser suficiente. A combinação do algoritmo com simulações de desempenho estrutural implica na obtenção de informações

preliminares acerca do comportamento global e da viabilidade do projeto, ainda nas etapas iniciais.

Por outro, o ambiente físico facilita o confronto das informações com aspectos mundanos e palpáveis, principalmente do ponto de vista da montagem. De modo geral, operações feitas em um ambiente virtual não consideram certos aspectos que são próprios dos produtos físicos. Por exemplo, o valor Espessura de Entalhe poderia ser exatamente igual ao valor da espessura da seção transversal do Nexor em um ambiente virtual. Contudo, isso não é o que acontece no ambiente físico; a espessura de entalhe precisa ser um pouco maior do que a do nexors, seja por causa da variação higroscópica, de imperfeições da madeira ou por imprecisão do processo de fabricação. Apesar da possibilidade de se planejar o processo de montagem virtualmente, alguns desafios são inerentes a realidade física, como a percepção do peso e do atrito entre elementos e a demanda por esforço humano, variáveis relacionadas segurança de trabalho, dentre muitos outros. A compreensão das interferências da materialidade e produção entre virtual e físico é facilitada pela produção de diversos modelos. Mais do que isso, as informações obtidas podem e devem ser incorporadas novamente no ambiente virtual, como é observado no **Artefato**, pelos parâmetros de Tolerâncias de Variação Higroscópica da Conexão e de Precisão decorrente do Equipamento de Fabricação.

Além disso, essa estrutura de trabalho híbrida, baseada em aprimoramento contínuo, permite o registro da evolução de modelos, protótipos ou instâncias e facilita a construção da narrativa da pesquisa, evidenciando os ganhos obtidos e os desafios encontrados a cada etapa. Em outras palavras, uma estrutura de trabalho bem definida permite o registro do processo de desenvolvimento de forma sistematizada.

iv. **Concepção do detalhe arquitetônico e desenvolvimento de produto:** essa contribuição está associada com as reflexões apresentadas na **Teoria Emergente**. Nesse sentido, o processo de criação das conexões Tipo Morsa pode exemplificar como o detalhe é um mecanismo com o potencial de solucionar problemas em arquitetura, mais especificamente na interface com a concepção estrutural. Diferentemente da contribuição anterior, que sugere a importância de um processo

de desenvolvimento híbrido, esta foca na estrutura de trabalho adotada para o desenvolvimento de novos produtos e na forma de comunicação do mesmo.

Ainda que tenha sido iniciada como forma de reflexão e que existem diversas discussões possíveis, é necessário reconhecer que há transformações substanciais acerca da produção do Detalhe na arquitetura contemporânea. Foi esse entendimento que guiou o desenvolvimento das conexões Tipo Morsa. Do ponto de vista do produto finalizado, a conexão Tipo Morsa pode ser considerada como inovadora, sobretudo pela combinação entre as abordagens geométricas e estruturais, visando personalização em massa, flexibilidade de fabricação e facilidade de montagem. Mas, é em sua concepção e desenvolvimento que são notadas algumas das principais contribuições. A exploração simultânea do detalhe (conexão) e do todo (estrutura), desde as etapas iniciais do processo de projeto, com a produção de **Modelos** em diversas escalas, foi o que efetivamente permitiu alcançar uma nova solução para as conexões das ERs. No início do desenvolvimento desta tese, foi explicitado que o Elo Recíproco é resultado de um mutualismo entre o sistema de conexões Tipo Morsa e as ERs geradas pelo algoritmo; a existência de um só faz sentido com a existência do outro. Em termos práticos, a abordagem que permitiu colocar a excentricidade entre nexors em segundo plano só foi possível por causa do novo sistema de conexões. Esse resultado foi alcançado pelo projeto do Detalhe no que chamamos de Fronteira do Construto, isto é, a parte e o todo andando de mãos dadas.

Junto a isso, a estrutura de trabalho adotada para o desenvolvimento pode ser explicada da seguinte forma: inicialmente, havia uma ideia de como o problema poderia ser solucionado, mas não era possível prever o resultado que seria obtido. Essa ideia passa a ser trabalhada em ambientes físicos e digitais, regida por uma dinâmica iterativa e incremental, com a produção de cinco séries de **Modelos**. Por um lado, cada uma dessas séries foca em solucionar problemas específicos, desde a estrutura de dados do algoritmo até a geometria final e a avaliação do seu desempenho físico. Por outro, a existência de uma série paralela indica a importância do desenvolvimento mútuo de mais de um aspecto do produto (no caso, geométricos e estruturais). O início de uma nova série de modelos não anula a que a antecede. Na realidade, uma nova série deve ser entendida como um registro no marco do desenvolvimento do produto e como forma de complementar e refinar informações.

Os dados assim obtidos são usados para realimentar e aperfeiçoar o **Método**, culminado na produção da **Instância**. Esse processo pode ser comunicado com a produção de diagramas, com variáveis bem definidas, facilitando o processo de compreensão do que é o produto, de como ele funciona e como pode ser produzido.

Com isso em mente, entendemos que o caminho metodológico descrito e comunicado nesta pesquisa pode ser aplicado para o desenvolvimento de novos tipos de conexões, seja em ERs ou outros tipos de estruturas, especialmente com ferramentas algorítmicas-paramétricas e equipamentos de Fabricação Digital.

10.2. LIMITAÇÕES ENCONTRADAS

A seguir são listas as principais limitações encontradas durante o desenvolvimento da pesquisa:

i. Limitações da revisão da literatura:

a. Todos os temas da pesquisa foram tratados de forma aprofundada, principalmente a RSL. Porém, é possível que alguns termos ou estudos não tenham sido considerados, em decorrência dos procedimentos adotados para a realização das revisões.

ii. Limitações do algoritmo:

a. Sua funcionalidade usa como base apenas quad-malhas e dia-malhas. Apesar do Método prever a geração de conexões entre três e seis nexors, a verificação das suas implicações em arranjos globais depende de ERs geradas a partir de tri-malhas;
b. Também depende de uma estrutura de dados específica. Em casos em que os dados não estão com uma disposição inicial bem definida, é necessário um retrabalho para ordenação dos índices referentes a cada um dos elementos;
c. Apesar dos diversos testes feitos, não é possível estabelecer, com exatidão, todos os limites geométricos e valores máximos e mínimos para os parâmetros de entrada.

iii. Limitações das conexões e das avaliações de desempenho estrutural:

a. As verificações estruturais das conexões feitas no Ansys e nos ensaios físicos são referentes a uma geometria específica e apresentam algumas disparidades. São necessários mais estudos para aumentar o nível de similaridade entre os resultados. Além disso, outras geometrias de conexões devem ser testadas, para assegurar que a abstração das conexões funcione no maior número de casos possíveis;
b. Os ensaios físicos utilizaram um quadro de madeira parafusado para testar as conexões e existe uma possiblidade de que isso tenha acentuado o deslocamento das conexões. Os testes devem ser refeitos, usando um quadro de concreto ou aço e, preferencialmente, com elementos engastados ou com conexões parafusadas que simulem engaste;
c. As simulações realizadas no Karamba3D utilizam uma abstração das conexões Tipo Morsa. Apesar das vantagens em termos de processamento, tempo e combinação com processos paramétricos e algorítmicos, há incertezas sobre a correspondência da abstração por elementos fictícios em arranjos distintos e personalizáveis de ERs;
d. Para todas as simulações, foram consideradas como carga apenas o peso próprio da estrutura. Não foram investigadas cargas provenientes do vento ou de uma estrutura secundária de cobertura ou vedação;
e. Boa parte do desenvolvimento das conexões foi embasado em estruturas espaciais de pequeno porte, feitas com elementos de dimensões relativamente pequenas e o material explorado foi o compensado de madeira. Para aplicação das ERs em grandes vãos, talvez seja necessário explorar outros materiais para as conexões e nexors, com um redimensionamento dos elementos. Apesar dessas variáveis não interferirem no algoritmo desenvolvido, o desempenho estrutural, os processos de fabricação e de montagem, provavelmente precisarão ser repensados.

iv. Limitações de fabricação e montagem:

a. As conexões produzidas para a **Instância** foram fabricadas usando uma tupia manual combinada com gabaritos impressos em 3D. Em outras palavras, todas as conexões eram geometricamente idênticas,

aplicadas a uma geometria de curvatura simples. Por um lado, esse método de produção reforça o elevado nível de Flexibilidade de Produção, dada a amplitude de possibilidades. Contudo, as conexões geradas assim não devem ser entendidas como elementos representativos de todo o potencial de personalização em massa do sistema desenvolvido;

b. Apesar da compreensão das possibilidades de uso de uma CNC de cinco eixos ou de um braço robótico para a fabricação das conexões, não foram realizados testes em equipamentos desse tipo. Por isso, há ainda uma imprevisibilidade sobre o resultado que pode ser alcançado;
c. Embora a montagem da **Instância** tenha sido viável, o processo pode ser melhorado. O método adotado resultou em movimentações significativas da estrutura e das conexões ao longo do processo, o que pode gerar problemas em outros casos. É necessário encontrar formas de aumentar a rigidez, mesmo que temporariamente, para aumentar a estabilidade durante a montagem.

10.3. PESQUISAS FUTURAS

Os temas de pesquisas futuras, explicados a seguir, são indicações de como algumas das limitações podem ser superadas e outros desenvolvimentos que são considerados importantes para o aprimoramento de ERs e das conexões Tipo Morsa.

i. **Relações geométricas globais e desempenho estrutural:** os modelos geométricos e estruturais produzidos ao longo do desenvolvimento da tese indicam algumas oportunidades de projeto que correlaciona a geometria com o comportamento estrutural particular das ERs. Em todas as explorações, foi constatado que todos os nexors estão submetidos a esforços de flexo-tração e flexo-compressão e que os leques tendem a rotacionar. Nesse sentido, pode ser que geometrias não convencionais sejam mais adequadas para a aplicação de ERs. O fato é que a relação entre geometria global e melhoria no desempenho estrutural não é óbvia e pesquisas futuras podem investigar e sistematizar esses dois aspectos.

ii. **Refinamento das simulações estruturais e realização de novos ensaios físicos das conexões:** as simulações estruturais precisam ser refinadas para garantir resultados ainda mais próximos do comportamento físico das ERs geradas com as conexões Tipo Morsa. Também é necessário avaliar como que as mudanças geométricas das conexões e da estrutura global se relacionam com o comportamento e desempenho estrutural, o que também exige uma nova série de ensaios físicos para calibrar as opções e definir, com maior precisão, o impacto das conexões nas estruturas. Além disso, a exploração de outros materiais é um caminho interessante a ser perseguido, principalmente o uso de MLC e CLT, com a ambição de se construir grandes vãos com as ERs com as conexões Tipo Morsa.

iii. **Incorporação de sistemas de vedação e espessuras adicionais:** uma próxima etapa é a integração de estruturas secundárias para o sistema de vedação das ERs, partindo da possibilidade de se aprimorar as conexões Tipo Morsa. Outra oportunidade é a de adotar novas camadas que conformam a espessura das placas das conexões. Essas poderiam servir para proteção, como uma Camada de Reforço, ou com alguma intenção estética, como uma Camada de Ornamento, por exemplo.

iv. **Adaptação do algoritmo para a geração de ERs a partir de Tri-Malhas:** o quarto caminho que pode ser explorado é o aperfeiçoamento do algoritmo criado, para a geração de ERs a partir de Tri-Malhas. Conforme evidenciado pelo **Construto**, esse tipo de malha implica em conexões entre três e seis nexors, sendo necessário a produção de conexões para essas situações. As explorações feitas dessa forma podem levar a caminhos inesperados e alcançar soluções ainda imprevisíveis.

v. **Projeto, fabricação e montagem de estruturas em escala 1:1 com dupla curvatura:** apesar do potencial de personalização apresentado pelo algoritmo, não foram testadas aplicações em escalas 1:1 com geometrias complexas ou com a presença de dupla curvatura. Para se obter uma melhor compreensão dos impactos de Personalização em Massa e de Flexibilidade de Produção em todo o processo de desenvolvimento de uma ER, é fundamental que sejam feitas explorações em escala 1:1. Por isso, novos pavilhões serão projetados e analisados com o uso do algoritmo, tendo como base geometrias com dupla curvatura. Em seguida, os elementos deverão ser fabricados por equipamentos CNC variados, com a realização de novos

testes de montagem. Esse processo culminará na montagem e consolidação de novas **Instâncias**.

10.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

É fundamental reconhecer a importância de uma equipe interdisciplinar, composta por pesquisadores, especialistas e técnicos, para o desenvolvimento desta pesquisa. Apesar de não ser um dos objetivos estipulados nesta tese, a oportunidade de ter uma orientadora especialista em arquitetura e um coorientador em estruturas deu o espírito do Novo Estruturalismo para esta tese. Junto a isso, a colaboração de uma equipe internacional, de uma instituição ligada às artes, também facilitou a compreensão de diversos aspectos específicos das ERs, sobretudo do ponto de vista de montagem. A soma de todas essas oportunidades se traduz na criação e consolidação de um sistema de conexões que combina aspectos geométricos, de fabricação e montagem com a incorporação de aspectos mecânicos e de desempenho estrutural.

A partir da recapitulação geral da pesquisa, tendo em mente o desenvolvimento do **Artefato** e de todos os elementos que o constituem, com a explicitação dos resultados alcançados, declaradas as principais contribuições, limitações e possíveis estudos futuros, acreditamos que o objetivo geral da pesquisa foi cumprido e que o método científico adotado foi bem sucedido. As relações entre objetivos específicos, resultados obtidos, limitações e pesquisas futuras são sintetizadas no Quadro 6. Também entendemos que todos os procedimentos apresentados esclarecem a reprodutibilidade da pesquisa e a possibilidade de a usar como base para estudos de novas conexões para ERs ou, até mesmo, para a concepção e o desenvolvimento de novos produtos em arquitetura.

Quadro 6: Síntese da pesquisa, relacionando os objetivos estipulados com os resultados alcançados, as principais limitações encontradas e possíveis estudos futuros para superar obstáculos que ainda são presentes.

Objetivo Geral: concepção e o domínio de um método algorítmico-paramétrico utilizado para gerar ERs em madeira, aplicadas a múltiplas geometrias, desde formas convencionais até complexas e livres. Simultaneamente, foi criado um novo sistema de conexão, que se adapta às diferentes configurações de ERs e é gerado automaticamente pelo algoritmo, sendo o elo entre geometria e estrutura. O algoritmo e as conexões conformam o **Artefato**, nomeado como Elo Recíproco.			
Objetivo Específico	**Resultado Alcançado**	**Limitações**	**Estudos Futuros**
Realizar uma fundamentação teórica sobre os temas centrais	Todos os temas foram embasados de forma clara e uma Revisão Sistemática da Literatura foi concluída e constantemente atualizada sobre ERs. Assim, foi possível reconhecer e estabelecer qual era a lacuna do conhecimento a ser trabalhada nesta pesquisa.	Alguns estudos podem não ter sido considerados em decorrência dos procedimentos adotados para a realização das revisões, sobretudo a RSL.	Atualização da RSL sobre ERs anualmente, até que sejam identificadas mudanças relevantes que sugiram a publicação de uma nova RSL. Realização de RSL sobre outros temas específicos.
Estabelecer os princípios teóricos geométricos e as implicações práticas no processo de geração de ERs e dos sistemas de conexões	Consolidação do **Construto**, alcançada pela compreensão dos arranjos de ERs a partir dos Grupos de Simetria de Papel de Parede e pela determinação dos princípios norteadores das conexões.	Não foram identificadas limitações significativas para alcançar este objetivo. Porém, pode ser que existam outras abordagens para compreender os princípios geométricos das ERs.	Aprofundamento sobre os arranjos das ERs a partir de outras teorias geométricas e matemáticas. Possibilidade de se estudar a relação das ERs com geometrias não-euclidianas.
Desenvolver um algoritmo para a geração automatizada de ERs, de forma que se adaptem à diferentes geometrias de entrada – sejam simples ou de forma livre	Desenvolvimento do **Método**, que permite gerar automaticamente diferentes arranjos de ERs e suas conexões. Seu funcionamento se dá a partir de uma geometria de entrada e é controlado por outras 13 variáveis independentes. Após diversas operações geométricas, o resultado é dado por três saídas distintas: modelo de barras para simulação estrutural, modelo tridimensional dos nexors e modelo tridimensional das conexões	A funcionalidade do algoritmo é restrita a geração de arranjos compostos por quad-leques, a partir do método de rotação. Outras limitações são encontradas na geometria de entrada, que deve ser formada a partir de NURBS, e na estrutura de dado, que depende da ordenação dos índices em um padrão específico.	Implementações que permitam a geração de ERs constituídas por tri-leques e hexa-leques, além da possibilidade de se usar o método de translação. Também é possível automatizar a reordenação dos índices, para que não haja uma dependência tão grande da disposição inicial da estrutura de dados das geometrias de entrada.

Implementar, no algoritmo, processos de simulação estrutural paramétricos, embasados em resultados obtidos por simulações estruturais mais complexas e avaliações físicas	Aplicação do **Método** para geração dos **Modelos** da Série Paralela. As simulações foram feitas de forma paramétrica com uso do software Karamba3D, a partir de modelos de barras com elementos fictícios. Para melhorar a precisão e a fidelidade dos modelos paramétricos, calibragens iniciais destes elementos foram feitas com o uso do software Ansys e com ensaios físicos das conexões.	Os resultados estruturais são iniciais, uma vez que os ensaios físicos e as simulações no Ansys foram realizados apenas para uma geometria específica das conexões. Assim, a aplicação dos elementos fictícios para as simulações estruturais paramétricas em múltiplas geometrias é de cunho exploratório. Além disso, apenas conexões fabricadas com compensado de madeira foram consideradas.	Realização de ensaios físicos em geometrias variadas das conexões, produzidas em outros materiais (como CLT, por exemplo). Com os resultados de uma série de variações das conexões, será possível compreender melhor a função estrutural de cada parte da conexão. Isso também permitirá a construção de um banco de dados que indique resultados estruturais mais confiáveis e que possam ser usados em simulações paramétricas.
Produzir modelos e protótipos, em escala reduzida ou parcial, das ERs e das conexões, para auxiliar no processo de desenvolvimento iterativo e incremental, bem como nos estudos de fabricação e montagem	Geração dos **Modelos** das Séries 1 – 4, sendo que cada uma das séries foi um marco de desenvolvimento do **Artefato** como um todo. As informações obtidas em cada uma das séries foram utilizadas para melhorar certos aspectos do **Método** e culminaram na criação da conexão Tipo Morsa. Os modelos das conexões e das ERs foram produzidos em escalas reduzidas ou 1:1, por uma gama de diferentes equipamentos	As principais limitações encontradas para a produção dos modelos foram a impossibilidade de se utilizar CNCs de cinco ou mais eixos e, consequentemente, a inviabilidade de uma exploração mais aprofundada do conceito de personalização em massa. Também não foram considerados com maior profundidade os elementos de fixação com o solo e o sistema de vedação.	Produção de modelos de conexões e estruturas com o uso de CNCs de cinco ou mais eixos ou braços robóticos. Também poderão ser produzidos modelos de conexões que incorporem outras camadas de espessura (como uma de ornamento ou uma de reforço estrutural), além da produção com outros materiais e visando uma maior escalabilidade das estruturas. Por fim, há a necessidade de se desenvolver modelos que incorporem o sistema de vedação.
Construir um pequeno pavilhão, em escala 1:1, como prova de conceito	Fabricação e montagem da **Instância**, embasada em diversos **Modelos** e gerada pelo **Método**. Todos os materiais utilizados no pavilhão foram de reaproveitamento. Os nexors foram produzidos com serras industriais as conexões com o uso de uma tupia manual combinada com gabaritos impressos em 3D. A primeira montagem foi feita por apenas duas pessoas, com o uso de uma alavanca para elevar a estrutura. Após a desmontagem, todos os elementos foram guardados e, posteriormente, usados na remontagem do pavilhão para a exposição 70% Less CO2	A curvatura do pavilhão é simples e há pouca variabilidade de elementos, muito em decorrência da limitação do processo de fabricação adotado. Além disso, a escalabilidade dessa estrutura com os materiais utilizados pode ser bastante desafiadora. O processo de montagem, apesar de bem sucedido, pode ser melhorado.	Projetar e desenvolver novos pavilhões, em escala 1:1, com geometrias complexas e que consigam vencer vãos maiores. Parte dos conhecimentos necessários para isso estão descritos nos estudos futuros relacionados com os objetivos específicos anteriores.

Realizar um aprofundamento científico, embasado nos resultados obtidos, sobre as conquistas e limitações das soluções alcançadas	Compreensão das limitações encontradas e das possibilidades alcançadas pelo desenvolvimento do **Artefato**. Isso é explicitado pelos resultados quantitativos e qualitativos, bem como a obtenção da patente referente ao método de geração das conexões e das conexões como um produto físico.	As limitações desta pesquisa estão sintetizadas nesta tabela.	Os estudos futuros relacionados com esta pesquisa estão sintetizados nesta tabela.
Discutir a importância do desenvolvimento do detalhe como um mecanismo potencial para alcançar soluções inovadoras, na concepção arquitetônica, mais especificamente na interface com concepção estrutural	Discussão apresentada pela **Teoria Emergente**, que usa o Elo Recíproco como exemplo para a discussão da Fronteira do Construto do Detalhe Arquitetônico. Trata-se da ideia de que as transformações sobre o Detalhe não são restritas ao processo de produção, mas também estão relacionadas com a concepção do próprio projeto. Nesse sentido, o projeto do Detalhe desde as etapas iniciais do processo de projeto pdoe ser uma forma de antever problemas e encontrar soluções inovadoras.	A limitação é dada pelo fato de ser uma teoria, o que significa que são necessários estudos para avançar as discussões e comprovar sua existência	Análise de grandes projetos, com o intuito de entender a importância da criação do Detalhe. Esse estudo será conduzido tendo como base o livro de Arthur Koestler (1964), *The Act of Creation*.

Fonte: elaborado pelo autor, 2022

REFERÊNCIAS

ADANOVA, Venera; TARI, Sibel. Analysis of Planar Ornament Patterns via Motif Asymmetry Assumption and Local Connections. **Journal of Mathematical Imaging and Vision**, vol. 61, 2019. p. 269 – 291.

ADDIS, Bill. **Building with Reclaimed Components and Materials**: A Design Handbook for Reuse and Recycling. 1 ed. London: Earthscan, 2006.

ANASTAS, Youssef; RHODE-BARBARIGOS, Landolf; ADRIAENSSENS, Sigrid. Design-To-Construction Workflow For Cell-Based Pattern Reciprocal Free-Form Structures. **Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures**, vol. 57, n. 2, p. 159-176, 2016.

ARAULLO, Rebekah; HAEUSLER, M. Hank. Asymmetrical Double-Notch Connection System in Planar Reciprocal Frame Structures. In: CAADRIA, 22., 2017, Suzhou. **Proceedings...** Hong Kong: CAADRIA, 2017, p. 539 - 549. Disponível em: <http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/caadria2017_115>. Acesso em: 14 de novembro de 2018.

ARAULLO, Rebekah. 3D Growth Morphology - Tectonics of Custom Shapes in Reciprocal Systems. In: CAADRIA, 23., 2018, Beijing. **Proceedings...** Hong Kong: CAADRIA, 2018, p. 307 - 316. Disponível em: <http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/caadria2018_235>. Acesso em: 14 de novembro de 2018

ARGÜELLES ÁLVAREZ, Ramón; ARRIAGA MARTITEGUI, Francisco; ESTEBAN HERRERO, Miguel; ÍÑIGUEZ GONZÁLEZ, Guillermo; ARGÜELLES BUSTILLO, Ramón. **Estructuras de Madera**: Uniones. Madrid: Mangraf S.L., 2015.

ASEFI, Maziar; BAHREMANDI-TOLOU, Mahnaz. Design challenges of reciprocal frame structures in architecture. **Journal of Building Engineering**, vol. 26, nov. 2019.

AVELLANEDA, Omar F.; TORRES, Natalia P.; PEÑA, Diana; SASTRE, Ramon. Experimental Workshop in Unconventional Structures: Deployable & Tree-Like Structures SMiA – Training and Research at Barcelona Tech. In: INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES, 2014, Brasilia. **Proceedings...** Brazil: IASS, 2014, n. 8, p. 01 - 07. Disponível em: <https://www.ingentaconnect.com/search/article?option1=tka&value1=Experimental+Workshop+in+Unconventional+Structures&pageSize=10&index=1>. Acesso em: 16 de novembro de 2018.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190:** Projeto de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro, 2022.

BADIFU, E.; GAND, A. K.; SAIDANI, M.; FOM, P. Response of reciprocally supported advanced FP composite jointed frames – Part 1: Experimental study. **Engineering Solid Mechanics**, vol. 8, n. 3, p. 187 – 198, 2020.

BAN, Shigeru. Paper Palaces: entrevista. [11 e 18 de agosto de 2014]. New York: **The New Yorker**. Entrevista concedida a Dana Goodyear. Disponível em: <http://www.newyorker.com/magazine/2014/08/11/paper-palaces>. Acesso em: 22 de março de 2017.

BALLS, Michael. **The Three Rs and the Humanity Criterion**: An Abdridged Version of the Principles of Humane Experimental Technique by W.M.S. Russel and R.L. Burch. Nottingham: Fund for the Replacement of Animals in Medical Experiments, 2009.

BARBOSA NETO, Wilson. **Do projeto à fabricação:** um estudo de aplicação da FABRICAÇÃO DIGITAL no processo de produção arquitetônica. 2013. 133p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura,

Tecnologia e Cidade) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2013.

BARRALLO, Javier; GONZÁLEZ-QUINTIAL, Francisco; SÁNCHEZ-PARANDIET, Antonio. Laminar Constructions and Reciprocal Structures. **Nexus Network Journal**: Architecture and Mathematics, vol. 19, n. 3, p. 723 - 739, 2017.

BAVEREL, O.; NOOSHIN, H.; KUROIWA, Y.; PARKE, G. A. R. Nexorades. **International Journal of Space Structures**, v. 15, n. 2, p. 155 - 159, 2000.

BAVEREL, Olivier; NOOSHIN, Hoshyar. Nexorades Based on Regular Polyhedra. **Nexus Network Journal**: Architecture and Mathematics, vol. 9, n. 2, p. 281 - 298, 2007.

BAVEREL, Olivier; LARSEN, Olga P. A Review of Woven Structures with Focus on Reciprocal Systems - Nexorades. **International Journal of Space Structures**, v. 26, n. 4, p. 281 - 288, 2011.

BAVEREL, O.; BOULAIS, L.; BUGAUD. D.; CHALLIER, M.; ANDREA, A.; DELDUQUE, G.; DEMEURE, D.; FAYE, F.; FOURNIER, C.; GRAS, A.; LAHITETTE, L.; PAPERIN, N.; RIGARD, H. Workshop: Nexorades with Composites Materials. **International Journal of Space Structures**, v. 26, n. 4, p. 363 - 364, 2011.

BAVEREL, Olivier; PUGNALE, Alberto. Reciprocal Systems Based on Planar Elements: Morphology and Design Explorations. **Nexus Network Journal**: Architecture and Mathematics, vol. 16, n. 1, p. 179 - 189, 2014.

BAX, Marcello Peixoto. Design Science: filosofia da pesquisa em ciência da informação e tecnologia. **Ciência da Informação**: Informação e Tecnologia. Brasília: Ibict, v. 42, n. 02, mai/ago. 2013. p. 298 – 312.

BEORKREM, Christopher. **Material Strategies in Digital Fabrication**. New York and London: Routledge, 2013.

BERNABEU LARENA, Alejandro; GARCÍA MÉNENDEZ, David. Extension of Euskalduna Conference Centre and Concert Hall: A Contemporary Application of Irregular Reciprocal Frames. **Structural Engineering International**, vol. 24, n. 1. p. 63 - 67, 2014.

BOOTHROYD, G.; DEWHURST, P.; KNIGHT, W. **Product Design for Manufacture and Assembly**. 2 ed. New York: Marcel Dekker Inc., 2002.

BRANCART, S.; LARSEN, O. P.; DE LAET, L.; DE TEMMERMAN, N. Bending-active reciprocal structures based on equilateral polyhedral geometries. In: In: INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES, 2017, Hamburg. **Proceedings...** Hamburg: IASS, 2017. Disponível em: <https://structurae.net/en/literature/conference-paper/bending-active-reciprocal-structures-based-on-equilateral-polyhedral-geometries>. Acesso em: 17 de agosto de 2020.

BRAUNGART, Michael; MCDONOUGH, William. **The Upcycle**: Beyond Sustainability – Designing for Abundance. 1 ed. New York: North Point Press, 2013.

BROCATO, Maurizio. Reciprocal Frame: Kinematical Determinacy and Limit Analysis. **International Journal of Space Structures**, v. 26, n. 4, p. 343 - 358, 2011.

BROWNE, Xan; LARSEN, Olga P.; CASTRIOTTO, Caio. Utilising waste wood through reciprocal frame systems. In: INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES, 2020/21, Guilford. **Proceedings...** Guilford: IASS, 2021, p. 524 - 533.

BURRY, Mark. The Architectural Detail and the Fear of Commitment. **Architectural Design**: Future Details of Architecture. New Jersey: Wiley & Sons, v. 84, n. 04, jul. 2014. p. 134-141.

BURRY, Mark. Between Intuition and Process: Parametric Design and Rapid Prototyping. In: KOLAREVIC, Branko (ed.). **Architecture in the Digital Age**: Design and Manufacturing. New York and London: Taylor & Francis, 2003. p. 147 – 162.

CALIL JUNIOR, Carlito; BRITO, Leandro Dussarrat. Avaliação de estruturas de madeira da HAUFF e sucessoras consolidadas em São Paulo e Minas Gerais, Brasil. In: CLEM+CLIMAD 2017: II Congresso Latinoamericano de Estructuras de Madera e II Congreso Ibero-Latinoamericano de la Madera em la Construcción, 2016, Buenos Aires, **Proceedings…**, Junín: Universidad Nacional Noroeste – Buenos Aires, 17 a 19 de maio de 2017. T7-05, p. 1 - 12. Disponível em: < https://clem-cimad2017.unnoba.edu.ar/papers/T7-05.pdf>. Acesso em: 21 de janeiro de 2023.

CANTAMESSA, Marco; CAPELLO, Carlo. Flexibility in Manufacturing – An Empirical Case-Study Research. In: TOLIO, T. (ed.). **Design of Flexible Production Systems**: Methodologies and Tools. Berlin: Springer, 2009. p. 19 – 40.

CASTRIOTTO, Caio M.; CARVALHO, Guilherme G.; CÔCO JR. Verley H.; CELANI, Gabriela. O Futuro do Detalhamento Arquitetônico: Concepção e representação na era digital, e impactos para a formação dos arquitetos. **Revista Geometria Gráfica**, vol.1, n.1. 2017. p. 1- 16. https://doi.org/10.51359/2595-0797.2017.239926

CASTRIOTTO, Caio; GIANTINI, Guilherme; CELANI, Gabriela. Biomimetic Reciprocal Frames: A design investigation on bird's nests and spatial structures. In: ECAADE 37 / SIGRADI JOINT CONFERENCE, 2019, Porto. **Proceedings…** Porto: Universidade do Porto, 9 a 13 de setembro de 2019. p. 613 – 620.

CASTRIOTTO, Caio; CELANI, Gabriela; SILVA, Felipe Tavares da. Estruturas recíprocas: revisão sistemática da literatura e identificação de pontos críticos para projeto e produção. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 375 – 393, out./dez. 2020. http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212020000400479

CASTRIOTTO, Caio; CELANI, Gabriela; TAVARES, Felipe. Reciprocal Frames Algorithm based on Symmetry Groups. **Nexus Network Journal**: Architecture and Mathematics [online first], 2021. https://doi.org/10.1007/s00004-021-00578-5

CASTRIOTTO, Caio; TAVARES, Felipe; CELANI, Gabriela; LARSEN, Olga Popovic; BROWNE, Xan. Clamp Links: a Novel Type of Reciprocal Frame Connection. **International Journal of Architectural Computing** [online first], p. 1 – 22, 2021. https://doi.org/10.1177/14780771211054169

CESAR, Sandro Fabio. **Estruturas HAUFF de madeira do Brasil**. 1991. 204p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1991.

CELANI, Gabriela. Los siete mitos del detalle arquitectónico que están cambiando en la era digital. **A+C Arquitectura Y Cultura**. Universidad de Santiago de Chile, vol. 2014, 2014, p. 50 – 60.

CELANI, Gabriela. Digital Fabrication Laboratories: Pedagogy and Impacts on Architectural Education. **Nexus Network Journal**: Architecture and Mathematics. Sweden: Birkhauser Verlag Basel, vol. 14, n. 3, 2012, p. 469 – 482.

CELANI, Gabriela; FRAJNDLICH, Rafael. From Prototypical to Prototyping: mass-customization versus 20th century utopias in architecture and urban design. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**: Revisões Sistemáticas da Literatura. Campinas – SP, vol. 7, n. 3. out. 2016, p. 160 – 169.

CELANI, Gabriela; LENZ, Daniel. Novas tecnologias na construção de edifícios: estabelecendo a ponte entre o processo criativo e a produção por controle numérico. **Cadernos PROARQ**. Rio de Janeiro, n. 23, 2014. p. 138 – 151.

CELANI, Gabriela; VAZ, Carlos. Scripts em CAD e Ambientes de Programação Visual para Modelagem Paramétrica: Uma Comparação do Ponto de vista Pedagógico. In: V TIC. Salvador. **Anais...** Salvador: UFBA, 4 e 5 de agosto de 2011. s.n.

CHERET, Peter; SEIDEL, Arnim. Der neue Holzbau. **DETAIL**. München: Institut für international Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, vol. 54, n. 1, 2014. p. 6 – 10.

CHING, Francis. **Representação Gráfica em Arquitetura**. Tradução por Alexandre Salvaterra. 5 ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.

CHURKINA, G.; ORGANSCHI, A.; REYER, C. P. O.; RUFF, A.; VINKE, K.; LIU, Z.; RECK, B. K.; GRAEDEL, T. E.; SCHELLNHUBER, H. J. Buildings as a Global Carbon Sink. **Nature Sustainability**, Online, n. 3, 2020, p. 269 – 276. https://doi.org/10.1038/s41893-019-0462-4

COKCAN, Baris; BRAUMANN, Johannes; WINTER, W.; TRAUTZ, Martin. Robotic Production of Individualized Wood Joints. In: CAADRIA CONFERENCE, 21., 2016, Melbourne, **Proceedings…**, Melbourne: University of Melbourne Press, 30 de março a 2 de abril de 2016. p. 559 – 568. Disponível em: <http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/caadria2016_559>. Acesso em: 12 de maio de 2018.

CONWAY, John H.; BURGIEL, Heidi; GOODMAN-STRAUSS, Chaim. **The Symmetries of Things**. Massachusetts: A. K. Peters Ltd., vol. 12, n. 1, 2008. p. 19 – 25.

COXETER, H. S. M. The Non-Euclidean Symmetry of Escher's Picture "Circle Limit III". **Leonardo**. Massachusetts: The MIT Press

DAVIS, Stanley M. From "future perfect": Mass customizing. **Planning Review**. Bingley: MCB University Press. v. 17, n. 2, 1989. p. 16 – 21.

DE TONI, Alberto; TONCHIA, Stefano. Manufacturing flexibility: a literature review. **International Journal of Production Research**, vol. 36, n. 6, p. 1587 – 1617. 1998.

DEAMER, Peggy. Detail Deliberations. In: DEAMER, P.; BERNSTEIN, P. G. (eds). **Building (in) the Future** - Recasting Labor in Architecture (p. 81 - 88). New York: Princeton Architectural Press, 2010.

DEPLAZES, Andrea (ed.). **Constructing Architecture:** Materials, Processes, Structures. Suíça: Birkhäuser Architecture, 2005. 479 p.

DIMČIĆ, Miloš. **Structural Optimization of Grid Shells based on Genetic Algorithms**. 2011. 194p. Tese (Doktors der Ingenieurwissenschaften) – Faculty of Architecture and Urbanism, University of Stuttgart, 2011.

DI CARLO, Biagio. The Wooden Roofs of Leonardo and New Structural Research. **Nexus Network Journal**: Architecture and Mathematics, vol. 10, n. 1, p. 27 - 38, 2008.

DOUTHE, Cyril; BAVEREL, Olivier. Design of nexorades or reciprocal frame systems with the dynamic relaxation method. **Computers and Structures**, v. 87, p. 1296 – 1307, 2009.

DRESCH, Aline; LACERDA, Daniel P.; ANTUNES JÚNIOR, José Antônio V. **Design Science Research**: A Method for Science and Technology Advancement. Suíça: Springer International Publishing, 2015. E-Book. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-319-07374-3>. Acesso em 15 de julho de 2018.

DUNN, Nick. **Digital Fabrication in Architecture**. London: Laurence King, 2012.

EARL, Christopher F.; JOWERS, Iestyn. Pinwheel Patterns: From 2D to 3D Schemas. **Nexus Network Journal**: Architecture and Mathematics, vol. 17, n. 1, p. 899 – 912. 2015.

ENGEL, Heino. **Sistemas Estruturais**. (Traduzido por Esther Pereira da Silva). São Paulo: Gustavo Gili, 2001.

EMMIT, Stephen; OLIE, John; SCHMID, Peter. **Principles of Architectural Detailing**. Oxford: Blackwell Publishing Ltd., 2004.

FAIRHAM, William. **Woodwork Joints**: How they are Set Out, How Made and Where Used. London: Evans Brothers, 2007.

FISCHER, Thomas; HERR, Christiane. Teaching Generative Design. In: INTERNATIONAL GENERATIVE ART CONFERENCE, 4, 2001, Milão, **Proceedings…** 2001. Disponível em: <https://www.generativeart.com/>. Acesso em: 11 de abril de 2018.

FORD, Edward R. **The Architectural Detail**. New York: Princeton Architectural Press, 2011.

FORD, Edward. The Grand Work of Fiction: The Detail as Narrative. **Architectural Design**: Future Details of Architecture. New Jersey: Wiley & Sons, v. 84, n. 04, jul. 2014. p. 26 – 35.

GARAVAGLIA, Elsa; PIZZIGONI, Attilio, SGAMBI, Luca; BASSO, Noemi. Collapse behavior in reciprocal frame structures. **Structural Engineering and Mechanics**, vol. 46, n. 4, p. 533 - 547, 2013.

GARCIA PUYOL, Ana. Mass Customization of Reciprocal Frame Structures. In: INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES, 2015, Amsterdam. **Proceedings...** Amsterdam: IASS, 2015, p. 1 - 12. Disponível em: <https://www.ingentaconnect.com/search/article?option1=tka&value1=Customization+of+Reciprocal+Frame+Structures&pageSize=10&index=1>. Acesso em: 18 de novembro de 2018.

GARCIA, Mark. Histories, Theories and Futures of the Details of Architecture. **Architectural Design**: Future Details of Architecture. New Jersey: Wiley & Sons, v. 84, n. 04, jul/aug. 2014. p. 14 – 23.

GAUZIN-MÜLLER, D. **Arquitectura Ecológica**: 29 ejemplos. São Paulo: Paralaxe, 2005.

GELEZ, Simon; AUBRY, Simon; VAUDEVILLE, Bernard. Nexorade or Reciprocal Frame System Applied to the Design and Construction of a 850 m2 Archaeological Shelter. **International Journal of Space Structures**, v. 26, n. 4, p. 303 - 311, 2011a.

GELEZ, Simon; AUBRY, Simon; VAUDEVILLE, Bernard. Behavior of a Simple Nexorade or Reciprocal Frame System. **International Journal of Space Structures**, vol. 26, n. 4, p. 331 - 342, 2011b.

GELEZ, Simon; SABY, Victorie. Workshop - Ateliers Design: Nexorades, Facing an Emergency Situation. **International Journal of Space Structures**, v. 26, n. 4, p. 369 - 371, 2011.

GHEORGHE, Andrei; VIERLINGER, Robert. DigDesFab15 Research Pavillion. **Frontiers in Digital Humanities**. Singapore: Singapore University of Technology and Design. vol. 4, n. 18, 2017.

GHERARDINI, Francesco; LEALI, Francesco. Reciprocal Frames in Temporary Structures: An Aesthetical and Parametric Investigation. **Nexus Network Journal**: Architecture and Mathematics, vol. 19, n. 1, p. 741 - 762, 2017.

GODTHELP, T. S.; JORISSEN, A. J. M.; HABRAKEN, A. P. H. W.; ROELOFS, R. The timber Reciprocal Frame Designer: free form design to production. In: INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES, 2019, Barcelona, **Proceedings…** Barcelona: Universitat Politécnica de Valencia, 7 a 10 de outubro de 2019. Disponível em: <https://www.ingentaconnect.com/content/iass/piass/2019/00002019/00000015/art00008>. Acesso em: 07 de maio de 2021.

GOVERNO FEDERAL DO BRASIL. Ministério das Cidades. Ministério do Meio Ambiente. **Área de manejo de resíduos da construção e resíduos volumosos**: orientação para seu licenciamento e aplicação da Resolução Conama 307/2002. 2005

GÖZEN, Efe. **Mass Customization of Architecture**: Architecture in the Digital Age. 2011. 105p. Dissertation (Master of Science in Architecture) – Department of Architecture, Istanbul Technical University, 2011.

GRAMAZIO, Fabio; KOHLER, Matthias; OESTERLE, Silvan. Encoding Material. **Architectural Design:** The New Structuralism - Design, Engineering and Architectural Technologies. New Jersey: Wiley & Sons, v. 80, n. 04, jul/aug. 2010. p. 108 – 155.

GUSS, Leonard. Engineered wood products: The future is bright. **Forest Products Journal**. Madison, vol. 45, n. 7,8, jul/ago. 1995. P. 17 – 24.

GUSTAFSSON, J. **Connections in Timber Reciprocal Frame**. 2016. 76 p. Thesis (Master of Science in Structural Engineering and Building Technology) - Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, 2016.

GUSTAVSSON, Sten-Olof. Flexibility and Productivity in Complex Production Processes. In: RAOUF, A.; BEN-DAYA, M. (eds.). **Flexible Manufacturing Systems:** Recent Developments. Amsterdã: Elsevier Science B. V., 1995, p. 85 – 93.

GUTIERREZ, Nayar; FLORES, América; PRECIADO, Adolfo. Reciprocal frame structures, a first academic approach to sustainable structures. INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES, 2016, Tokyo. **Proceedings...** Tokyo: IASS, 2016. Disponível em: <https://www.ingentaconnect.com/search/article?option1=tka&value1=Reciprocal+frame+structures.+a+first+academic+approach+to+sustainable+structures&pageSize=10&index=1>. Acesso em: 03 de dezembro de 2018.

HARGITTAI, Istvan; HARGITTAI, Magdolna. **Symmetry**: A Unifying Concept. Berkeley: PGW, 1996.

HAUSCHILD, Moritz; KARZEL, Rüdiger. **Digital Processes, DETAIL Practice**: Planning, Design, Production. München: Birkhauser, 2011.

HEIDEGGER, Martin. **Poetry, Language, Thought**. (Traduzido por Albert Hofstadter). 1 ed. New York: Harper & Row, 1971.

HEUMANN, Andrew. **Human**. Versão não informada, add-on para Grasshopper. 2018. Disponível em: <https://www.food4rhino.com/en/app/human>. Acesso em: 17 de julho de 2018.

HUANG, Alvin. Integrating Digital Materiality: Drawing Logic. In: YUAN, Philip F.; LEACH, Neil (eds.). **Fabricating the Future**. Shanghai: Tongji University Press, 2012. p. 23 - 28.

HUYLEBROUCK, Dirk. A Bike Tour for Rinus Roelofs's Art in Twente, The Netherlands. **The Mathematical Intelligencer**, vol. 39, p. 60 – 65, 2017.

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório 2017**. Brasília, 2017, Relatório. Disponível em: <http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf>. Acesso em: 25 de junho de 2018.

IWAMOTO, Lisa. **Digital Fabrications**: Architectural and Material Techniques. New York: Princeton Architectural Press, 2009.

JACKSON, Albert; DAY, David. **Good Wood Joints**. 1. ed. London: Collins, 1985.

JENCKS, Charles. In what style shall we build?. **The Architectural Review**, vol. 237, n. 1417, p. 90 – 101, 2015. Disponível em: <https://www.architectural-review.com/essays/postmodernism/in-what-style-shall-we-build>. Acesso em: 02 de novembro de 2022.

KANASAKI, Kenji; TANAKA, Hiroya. Traditional Wood Joint System in Digital Fabrication. In: ECAADE CONFERENCE, 31., 2013, Netherlands, **Proceedings…**, Netherlands: Delft University Press, 18 a 20 de setembro de 2013. p. 711 – 717. Disponível em: <http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/ecaade2013_247>. Acesso em: 14 de maio de 2018.

KILIAN, Axel. Architectural Perspectives. In: MENGES, Achim; SCHWINN, Tobias; KRIEG, Oliver David (eds.). **Advancing Wood Architecture**: A computational approach. New York and London: Routledge, 2017. p. 211 – 217.

KILIAN, Axel. Design Innovation through Constraint Modeling. **International Journal of Architectural Computing**, vol. 4, n. 1, p. 87 – 105, 2006.

KITCHENHAM, Barbara. **Procedures for Performing Systematic Reviews**: Technical Report. New Castle & Eveleigh, 2004. 28 p. (TR/SE-0401).

KITRICK, Crhistopher. Non-Linear Solution to Spherical Coverings and Application to Forms. In: INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES, 2019, Barcelona, **Proceedings…** Barcelona: Universitat Politécnica de Valencia, 7 a 10 de outubro de 2019. Disponível em: <https://www.ingentaconnect.com/content/iass/piass/2019/00002019/00000015/art00016>. Acesso em: 8 de maio de 2021.

KOHLHAMMER, Thomas; KOTNIK, Toni. Systemic Behaviour of Plane Reciprocal Frame Structures. **Structural Engineering International**, vol. 21, n. 1. p. 80 - 86, 2011. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.2749/101686611X12910257102596>. Acesso em: 26 de novembro de 2018.

KOHLHAMMER, Thomas; APOLINARSKA, Aleksandra A.; GRAMAZIO, Fabio; KOHLER, Matthias. Design and structural analysis of complex timber structures with glued T-joint connections for robotic assembly. **International Journal of Space Structures**, vol. 32, n. 3 - 4, p. 199 - 215, 2017.

KOLAREVIC, Branko. Digital Morphogenesis. In: KOLAREVIC, Branko (ed.). **Architecture in the Digital Age**: Design and Manufacturing. New York and London: Taylor & Francis, 2003. p. 1 – 28.

KOLAREVIC, Branko. Digital Production. In: KOLAREVIC, Branko (ed.). **Architecture in the Digital Age**: Design and Manufacturing. New York and London: Taylor & Francis, 2003. p. 29 – 54.

KOLAREVIC, Branko. Information Master Builders. In: KOLAREVIC, Branko (ed.). **Architecture in the Digital Age**: Design and Manufacturing. New York and London: Taylor & Francis, 2003. p. 55 – 62.

KOLAREVIC, Branko. Why We Need Architecture of Tolerance. **Architectural Design**: High Definition - Zero Tolerance in Design and Production. New Jersey: Wiley & Sons, v. 227, n. 01, jan/feb. 2014. p. 128 – 132.

KOLAREVIC, Branko. Metadesigning Customizable Houses. In: KOLAREVIC, Branko; DUARTE, José Pinto (eds.). **Mass Customization and Design Democratization**. London: Routledge, 2018. p. 117 – 127.

KRIEG, Oliver David. Engineering Perspectives: Oliver David Krieg in conversation with Manfred Grohmann and Jan Knippers. In: MENGES, Achim; SCHWINN, Tobias; KRIEG, Oliver David (eds.). **Advancing Wood Architecture**: A computational approach. New York and London: Routledge, 2017. p. 199 - 209.

KUMAR, Vijay. **101 Design Methods**: A Structured Approach for Driving Innovation in Your Organization. New Jersey: Wiley & Sons, 2013.

LACERDA, D. P.; DRESCH, A.; PROENÇA, A.; ANTUNES JÚNIOR, J. A. V. Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção. **Gestão & Produção**. São Carlos, v. 20, n. 04, 2013. p. 741 – 761.

LANDSCHEIDT, Steffen; KANS, Mirka; WINROTH, Mats. Opportunities for robotic automation in wood product industries: The supplier and system integrators perspective. In: PELLICCIARI, M.; PERUZZINI, M. (eds.). **Procedia Manufacturing 11:** FAIM 2017. Modena, Itália, special issue, 2017. p. 233 – 240.

LANDWHER, Klaus. Visual Discrimination of the 17 Plane Symmetry Groups. **Symmetry**, vol. 3, n. 2, p. 207 – 219, 2011.

LARSEN, Olga Popovic. **Reciprocal Frame Architecture**. New York: Architectural Press, 2008.

LARSEN, O. P. Reciprocal Timber Structures and Joints. In: Hudert, M.; Pfeiffer, S. (eds). **Rethinking Wood:** Future Dimensions of Timber Assembly. Basel: Birkhauser, 2019. p. 88 - 99. https://doi.org/10.1515/9783035617061

LARSEN, Olga P. Reciprocal Frames Workshops at the Royal Danish Academy of Fine Arts School of Architecture in Copenhagen. **International Journal of Space Structures**, v. 26, n. 4, p. 365 - 367, 2011. https://doi.org/10.1260/0266-3511.26.4.365

LARSEN, Olga Popovic; BRANCART, Stijn; DE TEMMERMAN, Niels; DE LAET, Lars; PETROVA, Veronika. ReciPlyDome and ReciPlySkin bending-active transformable lightweight shelters. In: INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES, 2018, Boston. **Proceedings...** Boston: IASS, 2018. Disponível em: <https://www.ingentaconnect.com/content/iass/piass/2018/00002018/00000014/art00017>. Acesso em: 03 de julho de 2020.

LARSEN, Olga P.; LEE, Daniel Sang-Hoon. Reciprocal Frames (RFs) Used for Quick-built Deployable Emergency Shelters. In: INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES, 2013, Amsterdam. **Proceedings...** Amsterdam: IASS, 2013. Disponível em: <https://www.ingentaconnect.com/search/article?option1=tka&value1=Reciprocal+Frames+.RFs.+Used+for+Quick.built&pageSize=10&index=1>. Acesso em: 08 de dezembro de 2018.

LARSEN, Olga P. Reciprocal Frame (RF) Structures: Real and Exploratory. **Nexus Network Journal**: Architecture and Mathematics, vol. 16, n. 1, p. 119 - 134, 2014.

LARSEN, Olga P. Reciprocal Frames Workshops at the Royal Danish Academy of Fine Arts School of Architecture in Copenhagen. **International Journal of Space Structures**, v. 26, n. 4, p. 365 - 367, 2011.

LARSEN, Olga P.; LEE, Daniel Sang-Hoon. Reciprocal Frames (RFs) Used for Quick-built Deployable Emergency Shelters. In: INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL

STRUCTURES, 2013, Amsterdam. **Proceedings...** Amsterdam: IASS, 2013. Disponível em: <https://www.ingentaconnect.com/search/article?option1=tka&value1=Reciprocal+Frames+.RFs.+Used+for+Quick.built&pageSize=10&index=1>. Acesso em: 08 de dezembro de 2018.

LARSEN, Olga P. Reciprocal Frame (RF) Structures: Real and Exploratory. **Nexus Network Journal**: Architecture and Mathematics, vol. 16, n. 1, p. 119 - 134, 2014.

LARSEN, Olga P.; CHILTON, John C.; CHOO, B. S. Rapid construction of modular buildings using the "Reciprocal Frame". **Transactions on the Built Environment**, vol 21, n. 1, p. 73 - 82, 1999.

LEACH, Neil. Parametrics Explained. **Next Generation Building**. Delft: TU Delft, v. 01, n. 01, jan. 2014. p. 1 – 10.

LUEBKEMAN, Chris. "**What is the world we want to live in?"**. BuildDigiCraft. Palestra Principal, Online (46 min). Disponível em: <https://youtu.be/E_zMTb_oLlM>. 19 de outubro de 2020.

MACHADO, Fernanda Almeida; RUSCHEL, Regina Coeli. Soluções integrando BIM e Internet das Coisas no ciclo de vida da edificação: uma revisão crítica. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construçã**o, Campinas, SP, v. 9, n. 3, p. 240-258, set. 2018. ISSN 1980-6809.

MANS, David. **Mesh+**. Versão 2.1.03, add-on para Grasshopper. 2019. Disponível em: <https://www.food4rhino.com/en/app/mesh>. Acesso em: 18 de outubro de 2019.

MARCELLINI, Domingos. **Manual Prático de Marcenaria**: Ferramentas – Maquinaria – Materiais – Lustração – Tornearia – Estofaria – Construção – Os Estilos Arquitetônicos e Mobiliários. 1. ed. São Paulo: Ediouro, 1973.

MARCH, Lionel; STEADMAN, Philip. **The Geometry of Envrionment**: An Introduction to Spatial Organization in Design. Massachusetts: The MIT Press, 1974.

MARCH, Salvatore T.; SMITH, Gerald F. Design and natural science research on information technology. **Decision Support Systems**, vol. 15, p. 241 – 266, 1995.

MARTIN, George E. **Transformation Geometry**: An Introduction to Symmetry. New York: Springer, 1982.

MAXWELL, Iain; PIGRAM, Dave; PEDERSON, Ole E.; LARSEN, Niels M. Fabrication Aware Form-Finding: a Combined Quasi-Reciprocal Timber and Discontinuous Post-Tensioned Concrete Structure. In: ACADIA, 34., 2014, Los Angeles. **Proceedings…** Los Angeles: ACADIA, 2014, p. 375 - 384. Disponível em: <http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/acadia14_375>. Acesso em: 07 de novembro de 2018.

MCDONOUGH, William; BRAUNGART, Michael. **Cradle to Cradle**: Remaking the Way We Make Things. 1 ed. New York: North Point Press, 2002.

MENGES, Achim. Instrumental Geometry. **Architectural Design**: Special Issue – Techniques and Technologies in Morphogenetic Design, vol. 76, n. 2, p. 42 – 53, 2006. https://doi.org/10.1002/ad.239

MENGES, Achim. Form Generation and Materialization at the Transition from Computer-aided to Computational Design. **DETAIL**: Review of Architecture and Construction Details – Analogue and Digital. München: Institut für international Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, n. 04, 2010. p. 330 - 335.

MENGES, Achim. Future Wood: Material Integration in Computational Design. In: YUAN, Philip F.; LEACH, Neil. **Fabricating the Future**. Shanghai: Tongji University Press, 2012. p. 43 – 49.

MENGES, Achim; SCHWINN, Tobias; KRIEG, Oliver. Advancing wood architecture: an introduction. In: MENGES, Achim; SCHWINN, Tobias; KRIEG, Oliver David (eds.). **Advancing Wood Architecture**: A computational approach. New York and London: Routledge, 2017. p. 1 – 9.

MESNIL, Romain; DOUTHE, Cyril; BAVEREL, Olivier; GOBIN, Tristan. Form finding of nexorades using the translation method. **Automation in Construction**, vol. 95, p. 142 - 154, 2018.

MITCHELL, William. Design Worlds and Fabrication Machines. In: KOLAREVIC, Branko (ed.). **Architecture in the Digital Age**: Design and Manufacturing. New York and London: Taylor & Francis, 2003. p. 73 – 79.

MOLINA, J. C.; CALIL JUNIOR, C. Sistema construtivo em wood frame para casas de madeira. **Semina**: Ciências Exatas e Tecnologia, Londrina, v. 31, n. 02, jul/dez. 2010. p. 143 – 156.

MOSTAFAVI, S.; KASTRATI, V.; BADR, H.; MAZLAN, S. Design Computation to Robotic Production Methods for Reciprocal Tessellation of Free-form Timber Structures: Design, production, and assembly of 100 years Bauhaus wood Pavilion. In ECAADE, 38, 2020, Berlin. **Proceedings…** Berlin: Technical University of Berlin, 16 a 18 de setembro de 2020, p. 413 – 422. Disponível em: <http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/ecaade2020_468>. Acesso em: 17 de maio de 2021.

MUNRO, Dominic. Swiss Re's Building, London. **Nyheter om Stålbyggnad**, n. 3, 2004, p. 36 – 43, 2004.

NABAEI, Seyed S.; WEINAND, Yves. Geometrical Description and Structural Analysis of a Modular Timber Structure. **International Journal of Space Structures**, v. 26, n. 4, p. 321 - 330, 2011.

NABAEI, Seyed S.; BAVEREL, Olivier; WEINAND, Yves. Mechanical form-Finding of the Timber Fabric Structures with Dynamic Relaxation Method. **International Journal of Space Structures**, v. 28, n.3 - 4, p. 197 - 214, 2013.

NAGY, Máté; CSÓKA, Levente; KATONA, Vilmos. The Role of Symmetry in Reciprocal Frame Structures. **Symmetry**: Culture and Science, vol. 30, n. 1, p. 15 – 24, 2019. https://doi.org/10.26830/symmetry_2019_1_015

NEUFERT, Ernst. **Arte de Projetar em Arquitetura**. 18 ed. São Paulo: Gustavo Gili, 2013.

NOLL, Terrie. **The Joint Book**: The Complete Guide to Wood Joinery. 1. ed. Pennsylvania: Popular Woodworking Books, 2002.

NOLTE, Tobias; WITT, Andrew. Gehry Partner's Fondation Louis Vuitton. In: Crowdsourcing Embedded Intelligence. **Architectural Design**: High Definition - Zero Tolerance in Design and Production. New Jersey: Wiley & Sons, v. 227, n. 01, jan/feb. 2014. p. 82 - 89.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Promoting sustainable building materials and the implications on the use of wood in buildings**: A review of leading public policies in Europe and North America. Geneva: United Nations Publications, 2016.

OXMAN, Rivka; OXMAN, Robert. The New Structuralism: Design, Engineering and Architectural Technologies. **Architectural Design:** The New Structuralism - Design, Engineering and Architectural Technologies. New Jersey: Wiley & Sons, v. 80, n. 04, jul/aug. 2010. p. 14 – 23.

PALUMBO, Arianna; LANCIA, Daniele; PONE, Sergio. Digital Tool for Reciprocal Frame. In: INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES, 2019, Barcelona, **Proceedings…** Barcelona: Universitat Politécnica de Valencia, 7 a 10 de outubro de 2019. Disponível em: <https://www.ingentaconnect.com/content/iass/piass/2019/00002019/00000015/art00009>. Acesso em: 07 de maio de 2021.

PANTAZIS, Evangelos; GERBER, David. Material Swarm Articulations: New View Reciprocal Frame Canopy. In: ECAADE, 32., 2014, New Castle. **Proceedings…** Los Angeles: eCAADe, 2014, p. 463 - 473. Disponível em: <http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/ecaade2014_233>. Acesso em: 04 de novembro de 2018.

PARIGI, Dario; SASSONE, Mario; KIRKEGAARD, Poul H.; NAPOLI, Paolo. Static and Kinematic Formulation of Planar Reciprocal Assemblies. **Nexus Network Journal**: Architecture and Mathematics, vol. 16, n. 1, p. 37 - 59, 2014.

PARIGI, Dario; KIRKEGAARD, Poul H. The Reciprocalizer: an Agile Design Tool for Reciprocal Structures. **Nexus Network Journal**: Architecture and Mathematics, vol. 16, n. 1, p. 61 - 68, 2014a.

PARIGI, Dario; KIRKEGAARD, Poul H. Design and Fabrication of Free-Form Reciprocal Structures. **Nexus Network Journal**: Architecture and Mathematics, vol. 16, n. 1, p. 69 - 87, 2014b.

PARIGI, Dario; PUGNALE, Alberto. Three-Dimensionality in Reciprocal Structures: Concepts and Generative Rules. **Nexus Network Journal**: Architecture and Mathematics, vol. 16, n. 1, p. 151 - 177, 2014.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de Madeira**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

PIACENTINO, Giuilio. **Weaverbird**: Topological Mesh Editor. Versão 0.9.0.1, add-on para Grasshopper. 2009. Disponível em: <https://www.giuliopiacentino.com/weaverbird/>. Acesso em: 12 de outubro de 2017.

PIKER, Daniel. **Kangaroo Physics**. Versão 0.099, add-on para Grasshopper. 2014. Disponível em: <https://www.food4rhino.com/en/app/kangaroo-physics>. Acesso em: 18 de setembro de 2017.

PINE, Joseph. **Mass Customization**: the new frontier in business competition. Cambridge: Harvard University Press, 1993.

PORTEOUS, Jack; ROSS, Peter. **Designers' Guide to Eurocode 5**: Design of Timber Buildings – EN 1995-1-1. London: ICE Publishing, 2013.

PREISINGER, Clemens. Linking Structure and Parametric Geometry. **Architectural Design**. New Jersey: Wiley & Sons, v. 83, n. 02, 2013. p. 110 – 113. https://doi.org/10.1002/ad.1564.

PREISINGER, Clemens; BOLLINGER UND GROHMANN ZT GMBH. **Karamba3D**. Versão 1.3.3. Educational License, add-on para Grasshopper. 2021. Disponível em: <https://www.karamba3d.com>. Acesso em: 14 de julho de 2021.

PUGNALE, Alberto; SASSONE, Mario. Structural Reciprocity: Critical Overview and Promising Research / Design Issues. **Nexus Network Journal**: Architecture and Mathematics, vol. 16, n. 1, p. 09 - 35, 2014.

PYKER, Michael. **Pufferfish**. Versão 3.0, add-on para Grasshopper. 2021. Disponível em: <https://www.food4rhino.com/en/app/pufferfish>. Acesso em: 20 de junho de 2021.

QI, L.; ZHANG, W.; LI, Z.; SUN, R.; HUANG, X. Geometry construction Method of Hex-Tri Reciprocal Frame. **The Civil Engineering Journal**, vol. 5, n. 4, p. 576 – 588, 2019.

RAMOS-JAIME, Cristina; SÁNCHEZ-SÁNCHEZ, José. Hyperboloid Modules for Deployable Structures. **Nexus Network Journal**: Architecture and Mathematics, vol. 22, n. 1, p. 309 - 328, 2019.

RILEY, J. W. **A Manual of Carpentry and Joinery**. 1. ed. New York and London: Macmillan Company, 1905.

RIZZUTO, Joseph P.; LARSEN, Olga P. Connection Systems in Reciprocal Frame and Mutually Supported Elements Space Structure Networks. **International Journal of Space Structures**, vol. 25, n. 4, p. 243 - 256, 2010.

ROBELLER, Christopher; WEINAND, Yves. Integral joints for timber folded plate structures. In: MENGES, Achim; SCHWINN, Tobias; KRIEG, Oliver David (eds.). **Advancing Wood Architecture**: A computational approach. New York and London: Routledge, 2017. p. 73 – 83.

SAIDANI, Messaoud; BAVEREL, Olivier; CROSS-RUDKIN, P. S. M. Investigation into a New Type of Multi-Reciprocal Grid. **International Journal of Space Structures**, v. 13, n. 4, p. 215 - 218, 1998.

SÁNCHEZ-SÁNCHEZ, José; ESCRIG PALLÁRES, Félix. Frames Designed by Leonardo with Short Pieces. An Analytical Approach. **International Journal of Space Structures**, v. 26, n. 4, p. 289 - 302, 2011.

SÁNCHEZ-SÁNCHEZ, José; ESCRIG PALLÁRES, Félix; RODRÍGUEZ-LEÓN, Maria Teresa. Reciprocal Tree-Like Fractal Structures. **Nexus Network Journal**: Architecture and Mathematics, vol. 16, n. 1, p. 135 - 150, 2014.

SANDS, Donald E. **Introduction to Crystallography**. New York: Dover Publications, 1993.

SALINGAROS, Nikos A. **Twelve Lectures on Architecture:** Algorithmic Sustainable Design. 1 ed. ISI Distributed Titles, 2010.

SCHATTSCHNEIDER, Doris. **M. C. Escher**: Visions of Symmetry. London: Thames & Hudson, p. 353 – 354.

SCHEURER, Fabian. File-to-factory Production and Expertise. **DETAIL**: Review of Architecture and Construction Details – Analogue and Digital. München: Institut für international Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, n. 04, 2010. p. 380 - 383.

SCHOR, Naomi. **Reading in Detail:** Aesthetics and the feminine. London and New York: Methuen Press, 1987.

SCHWAB, Klaus. **The Fourth Industrial Revolution**. 1 ed. World Economic Forum, 2016.

SCHWINN, Tobias. Landesgartenschau Exhibition Hall. In: MENGES, Achim; SCHWINN, Tobias; KRIEG, Oliver David (eds.). **Advancing Wood Architecture**: A computational approach. New York and London: Routledge, 2017. p. 111 – 124.

SCHWINN, Tobias. Manufacturing perspectives: Tobias Schwinn in conversation with Holzbau Amann and Müllerblaustein. In: MENGES, Achim; SCHWINN, Tobias; KRIEG, Oliver David (eds.). **Advancing Wood Architecture**: A computational approach. New York and London: Routledge, 2017. p. 185 – 197.

SEBRAE; SENAI; GTZ. **Gestão de Resíduos na Construção Civil**: Redução, Reutilização e Reciclagem. 2013. Disponível em: <http://www.fieb.org.br/Adm/Conteudo/uploads/Livro-Gestao-de-Residuos_id_177__xbc2901938cc24e5fb98ef2d11ba92fc3_2692013165855_.pdf>. Acesso em: 09 de junho de 2018.

SEELY, Jennifer. **Digital Fabrication in the Architectural Design Process**. 2004. 77p. Dissertation (Master of Science in Architecture Studies) – Department of Architecture, Massachusetts Institute of Technology, 2004.

SÉNÉCHAL, B; DOUTHE, Cyril; BAVEREL, Olivier. Analytical Investigations on Elementary Nexorades. **International Journal of Space Structures**, v. 26, n. 4, p. 313 - 320, 2011.

SERLIO, Sebastiano. **The first [-fift] booke of architecture**: made by Sebastian Serly, entreating of Geometrie. Translated out of Italian into Dutch, and out of Dutch into English. London: Printed [by Simon Stafford] for Robert Peake. An unabridged reprint of the English Edition, 1611.

SHAH, Sayali. Deployable Reciprocal Frame Structures: Deployable Module. In: CAADRIA, 26, 2021, Online, **Proceedings…** Hong Kong: The Chinese University of Hong Kong and Online, 29 de março a 1 de abril de 2021, p. 553 – 562. Disponível em: <http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/Show?caadria2021_107>. Acesso em: 07 de maio de 2021.

SHEPHERD, Paul; HUDSON, Roly; HINES, David. Aviva Stadium: A Parametric Success. **International Journal of Architectural Computing**, vol. 9, n. 2, p. 167 – 185. 2011. https://doi.org/10.1260/1478-0771.9.2.167.

SHIRATORI, Takeshi; KOMATSU, Kohei; LEIJTEN, Adrian. Modified traditional Japanese timber joint system with retrofitting abilities. **Structural Control and Health Monitoring**. New Jersey: Wiley & Sons, vol. 8, n. 7, 2008. p. 1036 – 1056.

SILVA, N. F.; BRIDGES, A. H.; LIMA, E. M.; MORAIS, H. R. A.; SILVA JÚNIOR, F. A. A indústria da construção civil está pronta para a Fabricação Digital e a Personalização em Massa? Uma pesquisa sobre um caso Brasileiro. In: SIGRADI, 13., 2001, São Paulo, **Proceedings...,** São Paulo: SIGRADI, 16 a 18 de novembro de 2009. Disponível em: <http://papers.cumincad.org/data/works/att/sigradi2009_1079.content.pdf>. Acesso em: 31 de agosto de 2017. p. 430 – 432.

SILVA, Felipe Tavares da. Automatic structural preliminary design of a 3D concrete frame by numerical parametric structural modeling. In: CELANI, Gabriela; KANOUN, Olfa (eds.). **Frontiers of Science and Technology:** Automation, Sustainability, Digital Fabrication – Selected Papers of the 7th Brazilian-German Conference, Campinas 2016 Brazil. Berlin and Boston: De Gruyter, 2017. https://doi.org/10.1515/9783110537680.

SILVEIRA, Giovani da; BORENSTEIN, Denis; FOGLIATTO, Flávio. Mass Customization: Literature review and research directions. **International Journal of Production Economics**. Amsterdam: Elsevier. vol. 72, n. 1, 2001. p. 1 -13.

SIMON, Herbert A. **The Sciences of the Artificial**. 3 ed., Massachusetts: MIT Press, 1996.

SJÖSTRÖM, C. Durability and sustainable use of building materials. In: Llewellyn, J.W.; DAVIES, H. (eds.). **Sustainable use of materials**. London: BRE/Rilem, 1992.

SOBON, Jack, A.; SCHROEDER, Roger. **Timber Frame Construction**: All About Post-and-Beam Building. Massachusetts: Storey Publishing LLC, 1984.

SOBRAL, L.; VERÍSSIMO, A.; LIMA, E.; AZEVEDO, T.; SMERALDI, R. **Acertando o Alvo 2**: Consumo de madeira amazônica e certificação florestal no estado de São Paulo. Belém: IMAZON, 2002.

SONG, Peng; FU, Chi-Wing; GOSWAMI, Prashant; ZHENG, Jianmin; MITRA, Niloy J.; COHEN-OR, Daniel. Reciprocal Frame Structures Made Easy. **ACM Transactions on Graphics**, vol. 32, n. 4, p. 94:1 - 94:10, 2013.

SONG, Peng; FU, Chi-Wing; GOSWAMI, Prashant; ZHENG, Jianmin; MITRA, Niloy J.; COHEN-OR, Daniel. An Interactive Computational Design Tool for Large Reciprocal Frame Structures. **Nexus Network Journal**: Architecture and Mathematics, vol. 16, n. 1, p. 109 - 118, 2014.

SOUZA, A.; COELHO, R. Tecnologia CAD/CAM – Definições do estado da arte visando auxiliar sua implantação em um ambiente fabril. In: XXIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 23., Ouro Preto, **Anais...**, Ouro Preto: UFOP, 21 a 24 de outubro de 2003. Disponível

em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/4109562/201487_154024_teoria_ga_cad_cae_cam>. Acesso em: 10 de outubro de 2017.

SPEAKS, Michael. Design Intelligence. In: SYKES, A. Krista (org.) **Constructing a New Agenda:** Architectural Theory 1993 – 2009. New York: Princeton Press, 2010. p. 204 – 215.

STAPPERS, Pieter. J.; GIACCARDI, Elisa. Research Through Design. **The Encyclopedia of Human-Computer Interaction**. 2 ed., capítulo 43, Interaction Design Foundation, 2014. Disponível em: <https://www.interaction-design.org/literature/book/the-encyclopedia-of-human-computer-interaction-2nd-ed/research-through-design>. Acesso em: 15 de abril de 2021.

STEENSON, Molly Wright. **Architectural Intelligence**: How Designers and Architects Created the Digital Landscape. Massachusetts: MIT Press, 2017.

TAMKE, Martin; RIIBER, Jacob; JUNGJOHANN, Hauke. Generated Lamella. In: ACADIA 10: LIFE IN:FORMATION, 30., 2010, New York, **Proceedings…** New York: ACADIA, 21 a 24 de outubro de 2010, p. 340 – 347. Disponível em: <http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/acadia10_340>. Acesso em: 14 de junho de 2018.

TAMKE, Martin; THOMSEN, Mette R. Digital Wood Craft. In: TIDAFI, Temy; DORTA, Tomás (eds.). **Joining Languages, Cultures and Visions**: CAADFutures. Montreal: PUM, 2009. p. 673 – 686.

TERKAJ, Walter; TOLIO, Tullio; VALENTE, Anna. Designing Manufacturing Flexibility in Dynamic Production Contexts. In: TOLIO, T. (ed.). **Design of Flexible Production Systems**: Methodologies and Tools. Berlin: Springer, 2009. p. 1 – 18.

THONNISSEN, Udo; WERENFELS, Nik. Reciprocal Frames - Teaching Experiences. **International Journal of Space Structures**, v. 26, n. 4, p. 369 - 371, 2011.

THONNISSEN, Udo. A Form-Finding Instrument for Reciprocal Structures. **Nexus Network Journal**: Architecture and Mathematics, vol. 16, n. 1, p. 89 - 107, 2014.

TOLIO, Tullio; VALENTE, Anna. A stochastic approach to design the flexibility degree in manufacturing systems with focused flexibility. In: DET 2007: DIGITAL ENTERPRISE TECHNOLOGY CONFERENCE. 2007, Bath, **Proceedings…** Bath: DAT, 19 a 21 de setembro de 2007, p. 380 – 390.

TONG, Ziyu; ZHOU, Ronglou. Design and Fabrication of 3D Reciprocal Frame Structure. In: CAADRIA, 21, 2016, Melbourne. **Proceedings...** Hong Kong: CAADRIA, 2016, p. 725 – 734. Disponível em: <http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/caadria2016_725>. Acesso em: 27 de novembro de 2018.

TOUSSAINT, M. H. **A Design Tool for Timber Gridshells**: The Development of a Grid Generation Tool. 2007. 223p. Thesis (Master of Science in Civil Engineering) - Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, 2007.

VAISHNAVI, V. K.; KUECHLER, W. **Design Science Research Methods and Patterns**: Innovating Information and Communication Technology. 2 ed. New York: CRC Press, 2015.

VESTARTAS, Petras; RAD, Aryan Rezaei. **NGon**: Tool for Mesh Processing and Timber Engineering Design. Versão 2.4.5. MIT License, add-on para Grasshopper, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4550592>. Acesso em: 20 de julho de 2021.

VESTARTAS, Petras. **OpenNest**. Versão não informada, add-on para Grasshopper. 2021. Disponível em: <https://www.food4rhino.com/en/app/opennest>. Acesso em: 27 de julho de 2021.

VOLKER, Helm; KNAUSS, Michael; KOHLHAMMER, Thomas; GRAMAZIO, Fabio; KOHLER, Matthias. Additive robotic fabrication of complex timber structures. In: MENGES, Achim; SCHWINN, Tobias; KRIEG, Oliver David (eds.). **Advancing Wood Architecture**: A computational approach. New York and London: Routledge, 2017. p. 29 – 43.

VOLPATO, Neri; CARVALHO, Jonas de. Prototipagem rápida como processo de fabricação. In: VOLPATO, Neri (ed.). **Prototipagem Rápida**: Tecnologias e Aplicações. São Paulo: Editora Blücher, 2007. p. 01 – 14.

VOLPATO, Neri; FERREIRA, Cristiano Vasconcellos; SANTOS, Jorge Roberto Lopes dos. Integração da prototipagem rápida com o processo de desenvolvimento de produto. In: VOLPATO, Neri (ed.). **Prototipagem Rápida**: Tecnologias e Aplicações. São Paulo: Editora Blücher, 2007. p. 17 – 44.

WALZ, Arnold. Neue Prozesse in der Planung und Ausführung von Bauwerken. **DETAIL**: Zeitschrift für Architektur + Baudetail – Review of Architecture - Analog und Digital. München: Institut für international Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, n. 06, 2015. p. 548 – 551.

WELLER, Bernhard; TASCHE, Martin; BAATZ, Julia. Lamella Roof Constructions by Hugo Junkers. In: IASS SYMPOSIUM, 2009, Valencia, **Proceedings...** Valencia: IASS, 28 de setembro a 02 de outubro de 2009, p. 1611 - 1621. Disponível em: <https://riunet.upv.es/handle/10251/7160>. Acesso em: 02 de novembro de 2018.

WIDYOWIJATNOKO, Andry; IRWANUDDIN, Irfan; ADITRA, Rakhmat F. Rection as a Synthesis of Reciprocal and Tensegrity Structure. **Nexus Network Journal**: Architecture and Mathematics, vol. 21, n. 1, p. 465 – 478, 2019.

WIDYOWIJATNOKO, Andry; ADITRA, Rakhmat F.; CUNGWIN, Ardelia, J. Rection or Reciprocal Tension as More Efficient Tensegrity. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING, SCIENCE, CONSTRUCTION, AND OPERATIONS IN CHALLENGING ENVIRONEMTNS, 17, 2021, Online. **Proceedings…** ASCE, 19 a 23 de abril de 2021, p. 1351 – 1362. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/9780784483374.125>. Acesso em: 12 de maio de 2021.

WINTER, Klaus; RUG, Wolfgang. Innovationen im Holzbau - Die Zollinger-Bauweise. **Bautechnik**. Berlin: Ernst & Sohn, n. 69, vol. 4, 1992. p. 190 - 197.

XIAN, Ziju; HOBAN, Nicholas; PETERS, Brady. Spatial Timber Assembly: Robotically Fabricated Reciprocal Frame Wall. In: In ECAADE, 38, 2020, Berlin. **Proceedings…** Berlin: Technical University of Berlin, 16 a 18 de setembro de 2020, p. 403 – 412. Disponível em: <http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/ecaade2020_395>. Acesso em: 17 de abril de 2021.

YESSIOS, Chris. Is There More to Come?. In: KOLAREVIC, Branko (ed.). **Architecture in the Digital Age**: Design and Manufacturing. New York and London: Taylor & Francis, 2003. p. 259 - 268.

YUAN, Philip F. Digital Fabrication: A Paradigm Shift under the New Methodology. In: YUAN, Philip F.; LEACH, Neil (eds.). **Fabricating the Future**. Shanghai: Tongji University Press, 2012. p. 09 – 13.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO
PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA, TECNOLOGIA E CIDADE

APÊNDICE I: RELATÓRIOS DE VISITAS TÉCNICAS

CAMPINAS – SP

JANEIRO 2023

RELATÓRIO 1: VISITA TÉCNICA CROSSLAM

Responsável	Caio Magalhães Castriotto		
Participantes	Caio Castriotto; Gabriela Celani; Sabine Hoffmann; Pedro Augusto Giachini e; Crosslam		
Tarefa	Visita Técnica		
Data da Tarefa	17/01/2018	Data do Relatório	18/01/2018
Procedimentos	> 06/12/2017: contato com o engenheiro civil responsável pelo escritório "Carpinteria", localizado na cidade de São Paulo. Ele passou o contato da Crosslam, empresa localizada em Suzano, que fabrica estruturas por equipamentos de controle numérico usando madeira engenheirada. > 07/12/2017: contato com o proprietário da empresa, que se mostrou interessado em conhecer mais sobre a pesquisa, além de demonstrar conhecimento sobre conceitos como Customização em Massa e variáveis sobre a Fabricação Digital. Contudo, por causa das demandas do período de fim de ano, ele orientou que fosse realizado outro contato na primeira semana de janeiro, para agendar a visita. > 05/01/2018: contato para agendamento da visita e discussão sobre assuntos pertinentes para a pesquisa. Foi marcada para 17/01/2018, às 10 horas da manhã. > 17/01/2018: saída de Campinas as 7 horas da manhã, com os participantes Caio Castriotto; profa. Orientadora Gabriela Celani; profa. Visitante Sabine Hoffmann (pela Fundação Alexander von Humboldt) e; Pedro Augusto Giachini. Os pesquisadores foram recebidos pelos dois sócios-proprietários da empresa e por um estagiário, às 10 horas e 15 minutos. Eles explicaram alguns dos projetos já realizados pela empresa e guiaram a visita, apresentando os processos de produção, os tipos de equipamento e de materiais que utilizam. Foram discutidos os dados apresentados no tópico seguinte deste relatório. De		

	modo geral, os responsáveis pela indústria não estão muito interessados na área de pesquisa, demandando um exemplo de aplicação viável para que possa ser firmado algum tipo de parceria e desenvolvimento de protótipos em escala 1:1. A saída da indústria foi feita às 13 horas.
Dados	> A indústria possui um dos equipamentos de controle numérico mais avançados da indústria latino-americana. Trata-se de uma CNC de cinco eixos de trabalho, com dimensões de mesa de trabalho de 12m x 4m. Cada componente dela é de um país específico e montada especificamente para essa empresa. São utilizadas Fresas e Serras como ferramentas de corte, com a troca automática – quando programada em CAM. > Dos tipos de madeira engenheirada, a empresa trabalha com madeira laminada colada (Glulam) e com madeira laminada cruzada (CLT), com o processo de fabricação das chapas de cada um dos tipos feitas na própria empresa. Em outras palavras, o início do processo de industrialização é feito a partir de chapas brutas, que apresentam apenas tratamentos superficiais contra agentes patológicos, principalmente contra fungos e cupins. > Os projetos são realizados por escritórios externos, como a Carpinteria e pela Rewood (em casos específicos). Projetos menos complexos são feitos pelo engenheiro da empresa com auxílio de estagiários. Como ferramentas de trabalho, são utilizados software como AutoCAD e Sketchup. > Nota-se que, apesar de possuir uma tecnologia extremamente avançada e com alta capacidade de industrialização, boa parte do produto vendido é projetada por terceiros e/ou não apresenta elevado grau de inteligência de projeto. > Dados específicos sobre os materiais são encontrados em: CROSSLAM. Cross Laminated Timber: Informações Técnicas. 2017. Disponível em: <http://www.crosslam.com.br/home/?q=downloads>. Acesso em: 10/02/2018.

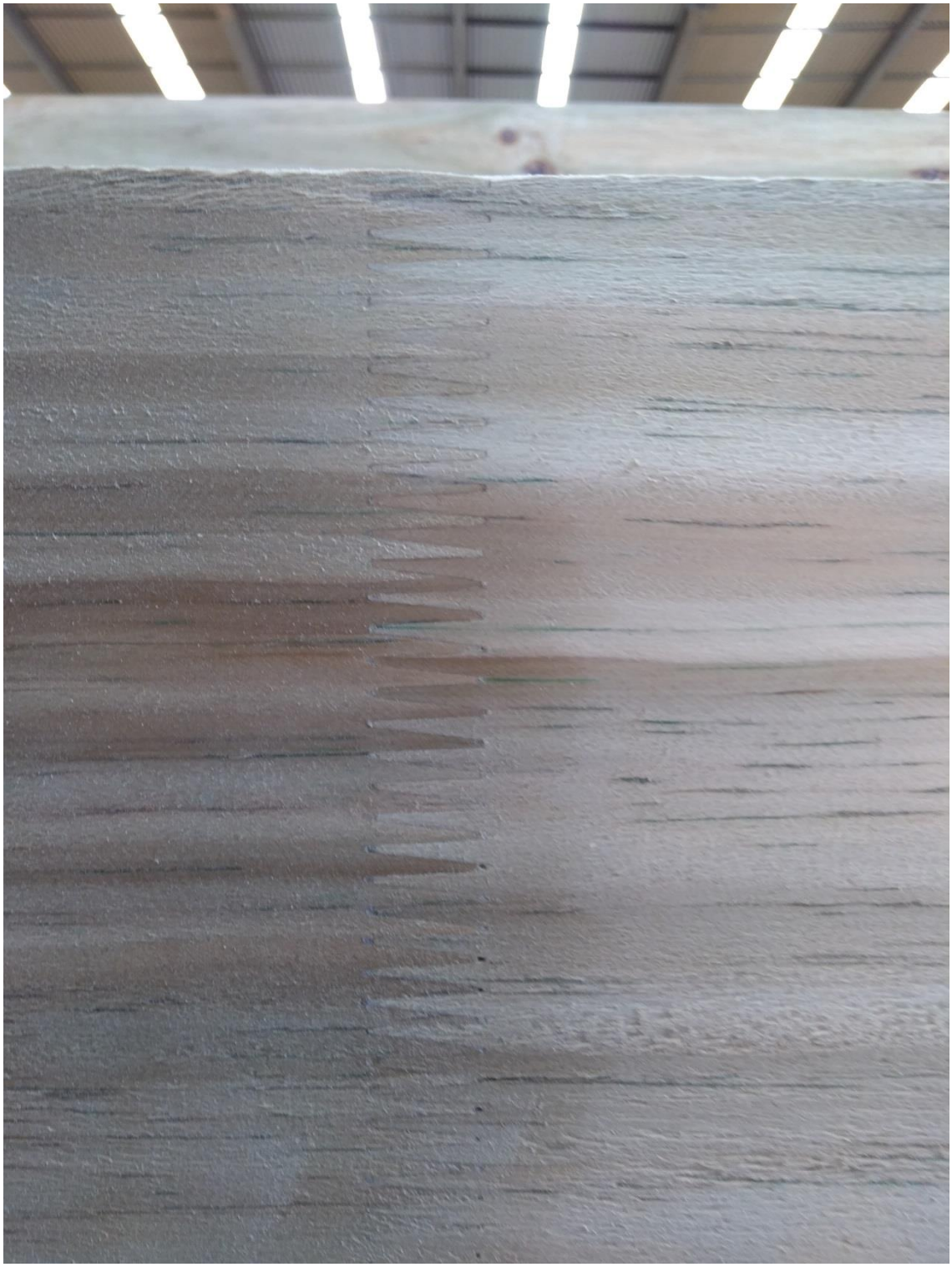
	CROSSLAM. Cross Laminated Timber: Pré-Dimensionamento. 2017. Disponível em: <http://www.crosslam.com.br/home/?q=downloads>. Acesso em: 10/02/2018.

Registro Fotográfico

Imagem 1 – Pilares produzidos pela empresa em CLT.

Acervo pessoal, 2018.

Imagem 2 – Forma de conexão colada entre segmentos feitos de CLT.



Acervo pessoal, 2018.

Imagem 3 – Encaixe para espera dos pilares feitos em CLT.

Acervo pessoal, 2018.

Imagem 4 – Painel autoportante em CLT e fresado pela CNC.

Acervo pessoal, 2018.

Imagem 5 – Processo de colagem entre placas de madeira para conformar a CLT.

Acervo pessoal, 2018.

Imagem 6 – CNC de cinco eixos utilizada pela Crosslam.

Acervo pessoal, 2018.

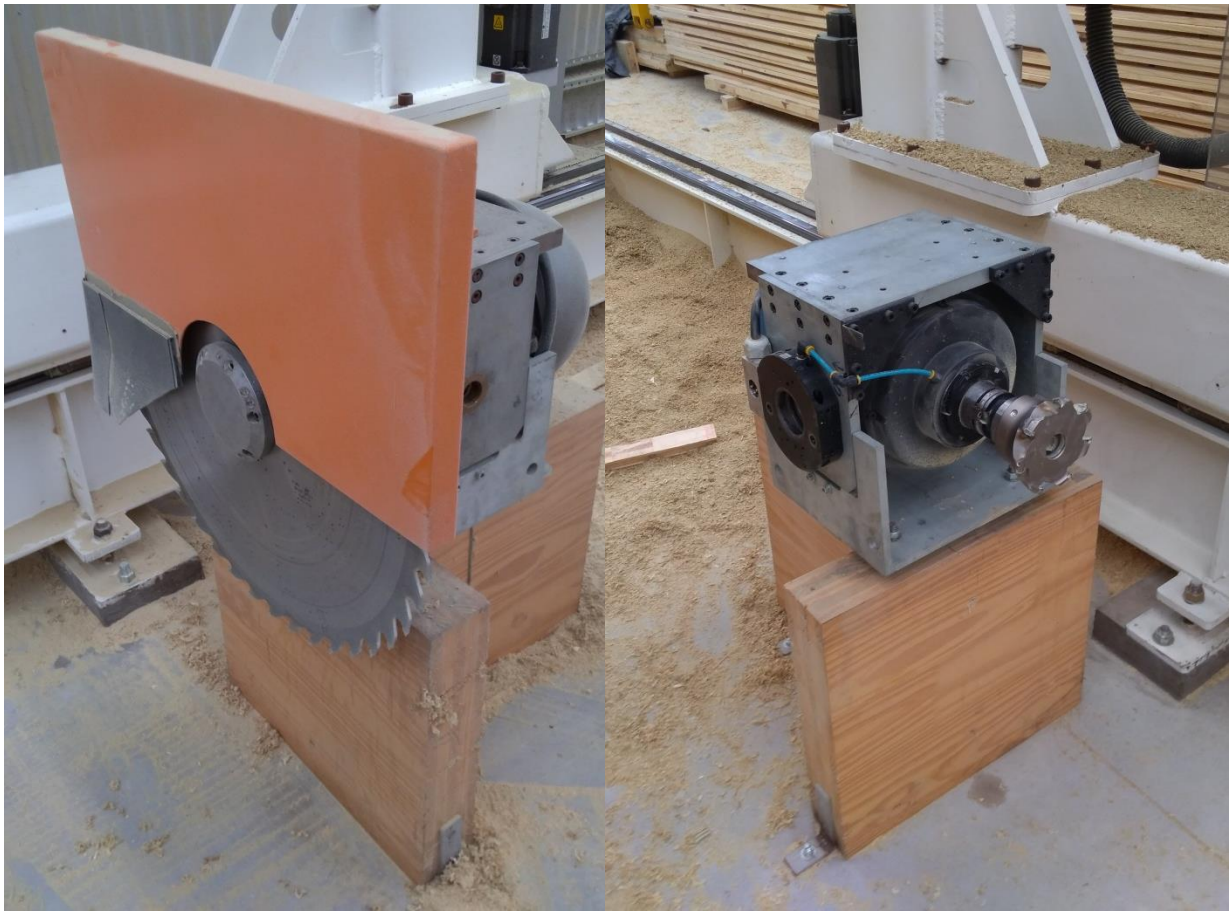
Imagem 7 – Controlador do equipamento de Fabricação Digital.

Acervo pessoal, 2018.

Imagem 8 – Cabeçote para acoplar serras ou fresas do equipamento.

Acervo pessoal, 2018.

Imagem 9 – Serra (esquerda) e fresa (direita) utilizadas pelo equipamento.



Acervo pessoal, 2018.

Imagem 10 – Mesa para colagem das chapas de madeira.

Acervo pessoal, 2018.

RELATÓRIO 2: VISITA TÉCNICA REWOOD

Responsável	Caio Magalhães Castriotto		
Participantes	Caio Castriotto; Gabriela Celani; Raquel Leite; Verley Côco Jr.		
Tarefa	Visita Técnica		
Data da Tarefa	24/08/2018	Data do Relatório	27/08/2018
Procedimentos	> 31/07/2018: contato com o engenheiro civil responsável pela empresa "Rewood", localizado no município de Taboão da Serra. Foi agendada uma visita para a data 24/08/2018, às 8 horas da manhã. > 24/08/2018: saída de Campinas as 6 horas e 15 minutos, com os participantes Caio Castriotto; profa. Orientadora Gabriela Celani; e os membros do grupo de pesquisa Raquel Leite e Verley Côco Jr. Os pesquisadores foram recebidos por um dos sócios e engenheiro civil da empresa, às 8 horas e 30 minutos. Foi feita uma apresentação institucional sobre os trabalhos desenvolvidos pela empresa e discutidas as possibilidades de pesquisa. Nesse sentido, o responsável mostrou grande interesse em desenvolver trabalhos em conjunto com a faculdade e com os pesquisadores, uma vez que ele mesmo é Doutor em Engenharia Civil. Além disso, alguns dos equipamentos utilizados pela Rewood foram adquiridos por programas de parceria entre pesquisa-indústria de agências como a FAPESP. Também foram discutidos os dados apresentados no próximo tópico. Foi agendada uma apresentação das pesquisas que estão sendo desenvolvidas pelo grupo de pesquisa para o mês de setembro. Há a possibilidade de convidar o engenheiro como professor visitante, uma vez que já deu aula e pode estreitar os laços entre academia e práticas do mercado e da indústria. A volta para Campinas foi feita às 12 horas e 40 minutos.		
Dados	> A Rewood pode ser considerada tanto como uma indústria que produz estruturas de madeira engenheirada como um escritório de engenharia. Dos tipos de materiais utilizados, os equipamentos disponíveis somente são		

	capazes de trabalhar com madeira laminada colada (Glulam), além de não serem utilizados equipamentos de controle numérico. No caso de projetos específicos do escritório que demandam a CLT, a produção é feita pela Crosslam. > O processo de colagem, corte e dobra das peças de madeira são feitas por equipamentos manuais. A explicação dada é que os equipamentos CNC encarecem o processo de produção ao utilizar apenas a Glulam. Semelhante à Crosslam, o produto adquirido para o início dos processos industriais é bruto tratado. > São utilizadas ferramentas CAD para o desenvolvimento dos projetos, inclusive sistemas algorítmicos quando há a demanda por elementos complexos que exigem a aplicação de métodos de análise mais específicos, como por elementos finitos. > Neste caso, há um maior domínio sobre os processos de projeto, mas com equipamentos mais rudimentares e uma maior restrição sobre geometrias e os tipos de materiais utilizados, principalmente pela impossibilidade de se trabalhar com placas de madeira. > Uma das informações mais pertinentes foi a afirmação de que o Pinus como madeira engenheirada é mais interessante do que o Eucalipto, por causa do seu peso próprio e pela porosidade, que permite uma maior eficiência dos tratamentos aplicados. Alguns dados específicos podem ser encontrados na dissertação do engenheiro e em catálogos da empresa: CALIL NETO, Carlito. Madeira Laminada Colada (MLC): controle de qualidade em combinações espécie-adesivo-tratamento preservativo. 2011. Dissertação. 123 p. (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, 2011.

	REWOOD. Detalhes de Conexões de Madeira Laminada Colada (MLC). Disponível em: <https://rewood.com.br/wp-content/uploads/2018/08/detalhes-de-conexoes-rewood.pdf>. Acesso em: 25/08/2018.

Registro Fotográfico

Imagem 1 – Equipamento de corte utilizado na Rewood.

Acervo pessoal, 2018.

Imagem 2 – Ferramenta utilizada para garantir curvatura às peças de madeira colada.

Acervo pessoal, 2018.

Imagem 3 – Peça de madeira sendo ajustada para dobra.

Acervo pessoal, 2018.

Imagem 4 – Processo de dobra da MLC.

Acervo pessoal, 2018.

Imagem 5 – Equipamento para produção de elementos lineares de MLC.

Acervo pessoal, 2018.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO
PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA, TECNOLOGIA E CIDADE

APÊNDICE II: TABELAS DE VARIÁVEIS, LISTAS E ÁRVORES UTILIZADAS NO ALGORITMO

CAMPINAS – SP

JANEIRO 2023

TABELA A: VARIÁVEIS DEPENDENTES E INDEPENDENTES DO ALGORITMO

Tipo e Nome da Variável		Caracteres	Descrição
Elementos Independentes	Geometria de Entrada	G	Geometria utilizada como variável de entrada no algoritmo. Superfície NURBS construída a partir de isocurvas nos sentidos U e V
	Malha Poligonal	M	Elemento gerado a partir da discretização da Geometria de Entrada (G).
	Nexors	N	Elementos estruturais principais, similares a vigas, cujas dimensões influenciam o desempenho estrutural e a geometria das conexões (C).
	Conexões	C	Elementos utilizados para conectar um número de nexors (N) que conformam um leque de uma ER.
	Equipamento de Fabricação	F	Tipo de equipamento utilizado para o processo de fabricação das conexões.
	Materialidade	P	Propriedades dos materiais que constituem os Nexors e as Conexões
Parâmetros da Malha Poligonal	Geometria das Células da Malha Poligonal	M_g	Malhas poligonais podem ser construídas por uma multiplicidade de geometrias de células. No caso do algoritmo, o foco é dado para malhas com células quadrilaterais, variando entre quadrados, retângulos ou losangos.
	Subdivisões da Malha Poligonal no sentido U	M_n_U	Valor das subdivisões da Malha Poligonal no sentido U para o processo de discretização. O número está diretamente relacionado ao grau de refinamento da Malha Poligonal (M) e ao número total de nexors (N).
	Subdivisões da Malha Poligonal no sentido V	M_n_V	Valor das subdivisões da Malha Poligonal no sentido V para o processo de discretização. O número está diretamente relacionado ao grau de refinamento da Malha Poligonal (M) e ao número total de nexors (N).
	Eixos da Malha Poligonal	M_a	Segmentos de reta que constituem a malha poligonal (M), gerados a partir da discretização da geometria de entrada (G) e orientados conforme os sentidos das isocurvas U e V. A quantidade total é o produto entre os valores das subdivisões da Malha nos sentidos U (M_n_U) e V M_n_V.

Parâmetros dos Nexors	Eixos dos Nexors	N_a	Linhas que representam o eixo dos nexors (N) em seu comprimento total.
	Espessura da Seção Transversal dos Nexors	N_t	Dimensão da espessura da seção transversal dos nexors (N).
	Altura da Seção Transversal dos Nexors	N_h	Dimensão da altura da seção transversal dos nexors (N).
	Ponto Central de Rotação dos Nexors	N_pC	Ponto que marca a intersecção entre os Eixos dos nexors (N_a) e os Eixos da Malha Poligonal (A). É coincidente com o ponto de origem do Eixo de Rotação dos Nexors (N_ar) e com o ponto médio da espessura (N_t) e da altura (N_h) da seção transversal dos nexors.
	Ponto de Cálculo de Excentricidade dos Nexors	N_pe	Pontos definidos a partir das extremidades dos Eixos dos Nexors (N_a). São utilizados para calcular o valor da excentricidade (C_e).
	Comprimento de Influência dos Nexors	N_l	Metade da dimensão de comprimento dos nexors. Distância entre o ponto médio (N_pc) do Eixo dos Nexors (N_a) até uma das extremidades (N_pe).
	Comprimento de Ajuste dos Nexors das Bordas	N_o	Dimensão que pode ser acrescentada ou diminuída sobre o Comprimento de Influência dos Nexors (N_l) que estão nas extremidades ou bordas da malha poligonal.
	Eixos de Rotação dos Nexors	N_ar	Eixo construído pelo Vetor Normal do nexor (N) com relação ao plano da superfície de entrada (G), sendo o ponto de origem e de avaliação da curvatura coincidente com o ponto médio dos Nexors (N_pC).
	Ângulo de Rotação	N_α	Ângulo utilizado para rotacionar os eixos da malha poligonal (M_a) ao redor do Eixo de Rotação (N_ar).
	Eixos de Inclinação dos Nexors	N_ai	Eixo construído pelo Vetor Perpendicular aos eixos da malha poligonal (M_a) que está no plano da superfície de entrada (G), sendo o ponto de origem e de avaliação da curvatura coincidente com o ponto médio dos Nexors (N_pC).
	Ângulo de Inclinação	N_β	Ângulo utilizado para rotacionar os eixos da malha poligonal (M_a) ao redor do Eixo de Inclinação (N_ai). Em geral, esse ângulo é decorrente do grau de curvatura da própria superfície

	Eixos de Variação Pendular dos Nexors	N_ap	Vetor correspondente aos eixos da malha poligonal (M_a) sendo o ponto de origem coincidente com o ponto médio dos Nexors (N_pC).
	Ângulo Pendular	N_θ	Ângulo utilizado para rotacionar os eixos da malha poligonal (M_a) ao redor do Eixo de Variação Pendular (N_ap). Em geral, esse ângulo é decorrente do grau de curvatura da própria superfície
Parâmetros das Conexões	Ponto Central das Conexões	C_pC	Ponto que marca a intersecção entre os Eixos das Malha Poligonal (M_a) e corresponde ao centroide do volume estabelecido pela combinação das conexões (C) e nexors (N).
	Vetor Normal da Conexão	C_v	Vetor Normal da Conexão, resultante da soma dos vetores normais dos nexors (N_ar) relativos ao leque.
	Plano de Cálculo da Excentricidade da Conexão	C_i	Plano intermediário das conexões, definido pelo Vetor Normal da Conexão (C_v), com origem coincidente ao Ponto Central das Conexões (C_pc)
	Comprimento Variável da Conexão	C_d	Dimensão do comprimento lateral das conexões (C) que pode variar de acordo com a geometria dos leques. Distância correspondente à dimensão de trabalho dos nexors (N).
	Comprimento da Parede da Conexão	C_q	Dimensão do comprimento lateral mais externo das conexões (C), correspondente à região que está além da região dos leques.
	Excentricidade da Conexão	C_e	Valor estabelecido pelas distâncias entre os Ponto de Cálculo de Excentricidade dos Nexors (N_pe) e o Plano de Cálculo da Excentricidade da conexão (C_i) de um leque específico. A orientação da distância é relativa à direção do Vetor Normal da Conexão (C_v).
	Espessura Total da Conexão	C_t	Valor resultante da soma da Espessura de Entalhe (C_f), Espessura de Rigidez (C_r) e o Maior Valor das Excentricidades (C_e).
	Espessura Adicional de Entalhe da Conexão	C_f	Dimensão da profundidade dos entalhes correspondentes à geometria dos nexors (N) na conexão.

	Espessura Adicional de Rigidez da Conexão	C_r	Dimensão relacionada com a rigidez mecânica dos materiais, necessária para o funcionamento das conexões (C).
	Tolerância de Variação Higroscópica da Conexão	C_u	Dimensão adicional nas regiões de entalhe da conexão que permite certo grau de liberdade de movimentação do material. Essa variável depende das propriedades de dilatação do material devido à absorção de umidade.
	Diâmetro do Furo para Barra Metálica	C_d	Dimensão relativa ao diâmetro da barra metálica utilizada para conectar e pressionar as partes das conexões uma contra a outra.
	Planos Intermediários das Conexões	C_xy	Plano médio de cada uma das conexões, definido pela combinação do Vetor Normal da Conexão (C_v) com o Ponto Central da Conexão (C_pC).
	Planos de Orientação das Peças Superior	C_xyt	Plano de orientação da peça superior que é utilizado como base para a construção da Geometria da Placa Superior (C_Gt). É definido pela translação no sentido positivo do Vetor Normal da Conexão (C_v).
	Planos de Orientação das Peças Inferior	C_xyb	Plano de orientação da peça inferior que é utilizado como base para a construção da Geometria da Placa Inferior (C_Gb). É definido pela translação no sentido negativo do Vetor Normal da Conexão (C_v).
	Geometria da Placa Superior da Conexão	C_Gt	Sólido tridimensional complexo que representa a geometria final da placa superior da conexão.
	Geometria da Placa Inferior da Conexão	C_Gb	Sólido tridimensional complexo que representa a geometria final da placa inferior da conexão.
Parâmetros dos Equipamentos	Diâmetro da Fresa do Equipamento de Fabricação	F_d	Valor que depende da geometriae do tipo de fresa utilizada, com interferência no processo de usinagem das placas das conexões.
	Grau de Precisão do Equipamento de Fabricação	F_p	Valor que depende do tipo de equipamento utilizado e interfere no processo de usinagem das placas das conexões.

Fonte: elaborado pelo autor, 2022

TABELA B: LISTAS, ÁRVORES E ÍNDICES DO ALGORITMO

Composição				Caracteres	Dados Geométricos
E	**S**	**e**	**Í**		
Listas	UV	Linhas	T	$\mathbf{L_UV.l_T}$	Eixos da malha poligonal (M_a)
		Nexors		$\mathbf{L_UV.N_T}$	Nexors (N)
		Conexões		$\mathbf{L_UV.C_T}$	Conexões (C)
	U	Linhas	TU	$\mathbf{L_U.l_{TU}}$	Eixos da malha poligonal (M_a)
		Nexors		$\mathbf{L_U.N_{TU}}$	Nexors (N)
		Conexões		$\mathbf{L_U.C_{TU}}$	Conexões (C)
		Pontos		$\mathbf{L_U.ps_{TU}}$	Pontos inicias dos eixos dos Nexors (N_a)
		Pontos		$\mathbf{L_U.pf_{TU}}$	Pontos finais dos eixos dos Nexors (N_a)
		Linhas		$\mathbf{L_U.lf_{TU}}$	Eixos dos Nexors (N_a)
		Linhas	AU	$\mathbf{L_U.l_{AU}}$	Eixos rotacionados da malha (M_a)
		Planos		$\mathbf{L_U.w_{AU}}$	Planos coincidentes aos eixos (M_a)
		Números		$\mathbf{L_U.n_{AU}}$	Números gerados a partir de uma P.A
		Pontos		$\mathbf{L_U.pi_{AU}}$	Pontos da parte interna da malha poligonal
		Pontos		$\mathbf{L_U.po_{AU}}$	Pontos da parte de borda a malha poligonal
		Linhas	BU	$\mathbf{L_U.l_{BU}}$	Eixos rotacionados da malha (M_a)
		Planos		$\mathbf{L_U.w_{BU}}$	Planos coincidentes aos eixos (M_a)
		Números		$\mathbf{L_U.n_{BU}}$	Números gerados a partir de uma P.A
		Pontos		$\mathbf{L_U.pi_{BU}}$	Pontos da parte interna da malha poligonal
		Pontos		$\mathbf{L_U.po_{BU}}$	Pontos da parte de borda a malha poligonal
		Números	AT	$\mathbf{L_U.n_{AT}}$	Números obtidos por Progressões Aritméticas utilizados para controlar e combinar os dados
			BT	$\mathbf{L_U.n_{BT}}$	
			BTSI	$\mathbf{L_U.n_{BTSI}}$	
			AUSI	$\mathbf{L_U.n_{AUSI}}$	

			BUSI	$\mathbf{L_U.n_{BUSI}}$	
	V	Linhas	TV	$\mathbf{L_V.l_{TV}}$	Eixos da malha poligonal (M_a)
		Nexors		$\mathbf{L_V.N_{TV}}$	Nexors (N)
		Conexões		$\mathbf{L_V.C_{TV}}$	Conexões (C)
		Pontos		$\mathbf{L_V.ps_{TV}}$	Pontos inicias dos eixos dos Nexors (N_a)
		Pontos		$\mathbf{L_V.pf_{TV}}$	Pontos finais dos eixos dos Nexors (N_a)
		Linhas		$\mathbf{L_V.lf_{TV}}$	Eixos dos Nexors (N_a)
		Linhas	AV	$\mathbf{L_V.l_{AV}}$	Eixos rotacionados da malha (M_a)
		Planos		$\mathbf{L_V.w_{AV}}$	Planos coincidentes aos eixos (M_a)
		Números		$\mathbf{L_V.n_{AV}}$	Números gerados a partir de uma P.A
		Pontos		$\mathbf{L_V.pi_{AV}}$	Pontos da parte interna da malha poligonal
		Pontos		$\mathbf{L_V.po_{AV}}$	Pontos da parte de borda a malha poligonal
		Linhas	BV	$\mathbf{L_V.l_{BV}}$	Eixos rotacionados da malha (M_a)
		Planos		$\mathbf{L_V.w_{BV}}$	Planos coincidentes aos eixos (M_a)
		Números		$\mathbf{L_V.n_{BV}}$	Números gerados a partir de uma P.A
		Pontos		$\mathbf{L_V.pi_{BV}}$	Pontos da parte interna da malha poligonal
		Pontos		$\mathbf{L_V.po_{BV}}$	Pontos da parte de borda a malha poligonal
		Números	CT	$\mathbf{L_V.n_{CT}}$	Números obtidos por Progressões Aritméticas utilizados para controlar e combinar os dados
			DT	$\mathbf{L_V.n_{DT}}$	
			DTSI	$\mathbf{L_V.n_{DTSI}}$	
			AVSI	$\mathbf{L_V.n_{AVSI}}$	
			BVSI	$\mathbf{L_V.n_{BVSI}}$	
Árvores	U	Linhas	TU	$\mathbf{T_U.l_{TU}}$	Eixos da malha poligonal rotacionados (M_a)
		Pontos		$\mathbf{T_U.ps_{TU}}$	Pontos inicias dos eixos dos Nexors (N_a)
		Pontos		$\mathbf{T_U.pf_{TU}}$	Pontos finais dos eixos dos Nexors (N_a)
		Linhas		$\mathbf{L_U.lf_{TU}}$	Eixos dos Nexors (N_a)

		Linhas	AU	$\mathbf{T_U.l_{AU}}$	Eixos rotacionados da malha (M_a)
		Planos		$\mathbf{T_U.w_{AU}}$	Planos coincidentes aos eixos (M_a)
		Pontos		$\mathbf{T_U.pi_{AU}}$	Pontos da parte interna da malha poligonal
		Pontos		$\mathbf{T_U.po_{AU}}$	Pontos da parte de borda a malha poligonal
		Linhas	BU	$\mathbf{T_U.l_{BU}}$	Eixos rotacionados da malha (M_a)
		Planos		$\mathbf{T_U.w_{BU}}$	Planos coincidentes aos eixos (M_a)
		Pontos		$\mathbf{T_U.pi_{BU}}$	Pontos da parte interna da malha poligonal
		Pontos		$\mathbf{T_U.pb_{BU}}$	Pontos da parte de borda a malha poligonal
	V	Linhas	TV	$\mathbf{T_V.l_{TV}}$	Eixos da malha poligonal rotacionados (M_a)
		Pontos		$\mathbf{T_V.ps_{TV}}$	Pontos inicias dos eixos dos Nexors (N_a)
		Pontos		$\mathbf{T_V.pf_{TV}}$	Pontos finais dos eixos dos Nexors (N_a)
		Linhas		$\mathbf{T_V.lf_{TV}}$	Eixos dos Nexors (N_a)
		Linhas	AV	$\mathbf{L_V.l_{AV}}$	Eixos rotacionados da malha (M_a)
		Planos		$\mathbf{L_V.w_{AV}}$	Planos coincidentes aos eixos (M_a)
		Pontos		$\mathbf{L_V.pi_{AV}}$	Pontos da parte interna da malha poligonal
		Pontos		$\mathbf{L_V.pb_{AV}}$	Pontos da parte de borda a malha poligonal
		Linhas	BV	$\mathbf{L_V.l_{BV}}$	Eixos rotacionados da malha (M_a)
		Planos		$\mathbf{L_V.w_{BV}}$	Planos coincidentes aos eixos (M_a)
		Pontos		$\mathbf{L_V.pi_{BV}}$	Pontos da parte interna da malha poligonal
		Pontos		$\mathbf{L_V.pb_{BV}}$	Pontos da parte de borda a malha poligonal

Especificações dos Índices	
Caractere	**Descrição**
T	Totalidade de Elementos
TU	Totalidade de Elementos no sentido U. Construído a partir das P.As da Tabela 3
AU	Quantidade parcial de elementos no sentido U, definida por um conjunto de números, conforme as P.As da Tabela 4

BU	Quantidade parcial de elementos no sentido U, definida por um conjunto de números, conforme as P.As da Tabela 4
TV	Totalidade de Elementos no sentido V. Construído a partir das P.As da Tabela 3
AV	Quantidade parcial de elementos no sentido V, definida por um conjunto de números, conforme as P.As da Tabela 4
BV	Quantidade parcial de elementos no sentido V, definida por um conjunto de números, conforme as P.As da Tabela 4
AT	Valores definidos nas P.As da Tabela 4
BT	
CT	
DT	
BTSI	Valores obtidos nas P.As das Séries Iniciais, conforme as Tabelas 3 e 4, aplicadas nos conjuntos BT, DT, AU, BU, AV e BV
AUSI	
BUSI	
DTSI	
AVSI	
BVSI	

Fonte: elaborado pelo autor, 2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO
PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA, TECNOLOGIA E CIDADE

APÊNDICE III: PERMISSÕES PARA REPRODUÇÃO DE ARTIGOS

CAMPINAS – SP

JANEIRO 2023

AMBIENTE CONSTRUÍDO
Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Porto Alegre, 30 de abril de 2021.

Permissão

Como autores do artigo "**Estruturas recíprocas: revisão sistemática da literatura e identificação de pontos críticos para projeto e produção**" publicado na revista Ambiente Construído (v. 20, n. 4, 2020), o autores **Caio Magalhães Castriotto**, **Maria Gabriela Caffarena Celani** e **Felipe Tavares da Silva**, podem incluir este trabalho em dissertação ou tese desde que feita a citação da Revista como fonte original.

Ercília Hitomi Hirota
Editora-chefe

Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - ANTAC
Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar - Centro
Porto Alegre - RS - Brasil
CEP 90035-190
Tel.: (51) 3308-4084 | 3308-3518 Fax: (51) 3308-4054
E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br
www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

Menu
Search
Cart
Search: keyword, tit
Search

SAGE's Author Archiving and Re-Use Guidelines

These guidelines should be followed by authors of Contributions published in a SAGE subscription journal, including authors whose Contributions were published under a previous version of the author guidelines. For a list of exceptions to these guidelines, please see below.

Three versions of the Contribution are referenced in these guidelines:

- **Original Submission:** the version submitted by the author before peer review
- **Accepted Manuscript:** version updated to include the author's revisions after peer review, prior to any typesetting for the journal. This is often the version accepted by the editor
- **Final Published PDF:** copy-edited and typeset Publisher's PDF, the same version published on the journal's website

Green Open Access: SAGE's Archiving and Sharing Policy

You may share the **Original Submission** or **Accepted Manuscript** at any time after your paper is accepted and in any format. Your sharing of the **Original Submission** or **Accepted Manuscript** may include posting a downloadable copy on any website, saving a copy in any repository or network, sharing a copy through any social media channel, and distributing print or electronic copies. Please note some journals will not consider papers that have been posted as preprints prior to submission and you may check a journal's policy regarding considering previously-posted papers by referring to the journal's submission guidelines.

For information on use of Institutional Repository (IR) copies by authors and IR users, see Posting to an Institutional Repository - Green Open Access.

You may use the **Final Published PDF** (or **Original Submission** or **Accepted Manuscript**, if preferred) in the following ways:

- in relation to your own teaching, provided that any electronic distribution maintains restricted access
- to share on an individual basis with research colleagues, provided that such sharing is not for commercial purposes
- in your dissertation or thesis, including where the dissertation or thesis will be posted in any electronic Institutional Repository or database
- in a book authored or edited by you, at any time after the Contribution's publication in the journal.

Provided that:

- Access to the Original Submission and Accepted Manuscript is provided at no charge.
- Any re-use terms for users of websites and repositories (where your **Original Submission** or **Accepted Manuscript** are posted) are restricted to non-commercial and no derivative uses.
- You may not post the **Final Published PDF** on any unrestricted website or repository without permission from SAGE.
- You may not republish or translate any version of your Contribution in another journal without prior permission from SAGE.
- The journal as the original publication of your Contribution is appropriately credited by including the full citation information each time your Contribution, or excerpts, are further distributed or re-used:
  - After your Contribution has been accepted for publication and until it is assigned a DOI, please include a statement that your Contribution has been accepted for publication in the journal.
  - Once full citation information for your Contribution is available, please include this with your posted Contribution, in a format similar to the following:
    Author(s), Contribution Title, Journal Title (Journal Volume Number and Issue Number) pp. xx-xx. Copyright © [year] (Copyright Holder). DOI: [DOI number].

Journal Exceptions

Exceptions to this Author Re-Use policy: The following journals have a different author re-use policy in place. The re-use terms for these journals are stated in the Contributor Agreement used by the journal.

If you have questions regarding the following titles, contact the permissions team through our SAGE Permissions Portal.

- *California Management Review*
- *Journal of Dental Research*
- *JDR Clinical & Translational Research*
- *Acta Radiologica* (from January 2018)
- *Index on Censorship*
- *Pain News*
- *Political Insight*

Related Information

Authors of Contributions published as SAGE Choice or in a Gold Open Access journal should reference Reusing Open Access and SAGE Choice Content. For a list of SAGE's Gold Open Access journals, please see Gold Open Access Journals.

Authors of Contributions published under a Creative Commons license may re-use their work under the terms of the Creative Commons license attached to their Contributions and additionally have all rights to re-use their work stated above.

For information about requesting permission for content published in SAGE journals, see Process for Requesting Permission.

For information about author copies, see Author e-prints policy.

If you are submitting a manuscript to a SAGE journal and wish to include previously published materials within the manuscript, visit our Author Gateway Copyright and Permissions FAQs.

KWB
KIM WILLIAMS BOOKS

25 August 2021

Arch. Caio Castriotto
School of Civil Engineering, Architecture and Urban Planning
University of Campinas
Campinas, São Paulo, Brazil

Dear Arch. Castriotto,

I am writing to acknowledge acceptance of your paper co-authored with Gabriela Celani and Felipe Tavares, entitled "Reciprocal Frames based on Symmetry Groups" for publication in the *Nexus Network Journal*. Your paper is scheduled to appear in *NNJ* vol. 24 (2022).

The *Nexus Network Journal* is a peer-reviewed journal dedicated to relationships between architecture and mathematics co-published by Kim Williams Books and Springer/Birkhäuser. It appears in print four times yearly, and on the Internet at Springer Link: (https://www.springer.com/journal/4).

Founded in 1999, the *Nexus Network Journal* (*NNJ*) is a peer-reviewed journal for researchers, professionals and students engaged in the study of the application of mathematical principles to architectural design. Its goal is to present the broadest possible consideration of all aspects of the relationships between architecture and mathematics, including landscape architecture and urban design. The NNJ is abstracted/indexed in: Science Citation Index Expanded (SciSearch), Journal Citation Reports/Science Edition, SCOPUS, Zentralblatt Math, Google Scholar, EBSCO Discovery Service, CSA, ProQuest, Academic OneFile, Arts & Humanities Citation Index, Avery Index to Architectural Publications, Current Contents/Arts and Humanities, Gale, MathEDUC, Mathematical Reviews, OCLC, SCImago, Summon by ProQuest, and many other indexes. **2019 Impact Factor: 0.333**.

With this letter I would also like to confirm that you are free to reproduce the article in pre-print format as part of your PhD thesis. I should specify that you cannot reproduce the final formatted PDF as published in the *NNJ*, but you are allowed to reproduce the pre-print .doc file that was approved for publication (essentially this means that you own the rights to your content, but Springer owns the rights to the format and page layout, so use of that is restricted).

Thank you very much for a fine contribution to the *Nexus Network Journal*.

Cordial regards,

Kim Williams

Kim Williams
Editor-in-Chief, *Nexus Network Journal*

Kim Williams Books di Williams Kim – Corso Regina Margherita, 72 – 10153 Turin (Torino) Italy
Tel. +39-011-076-4832 – Mobile +39-333-3067353 – kwb@kimwilliamsbooks.com
http://www.kimwilliamsbooks.com – P.IVA 05056220485

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO
PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA, TECNOLOGIA E CIDADE

APÊNDICE IV: MODELO DO TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

CAMPINAS – SP

JANEIRO 2023

TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

DESENVOLVIMENTO DE NOVAS CONEXÕES PARA ESTRUTURAS RECÍPROCAS EM MADEIRA: APLICAÇÃO POR SISTEMAS PARAMÉTRICOS E ALGORÍTMICOS E FABRICAÇÃO DIGITAL

Pesquisador Responsável: Caio Magalhães Castriotto
Orientadora: Profa. Dra. Maria Gabriela Caffarena Celani
Número do CAAE: 17484819.8.0000.8142

Você está sendo convidado(a) a participar de uma pesquisa. Este documento, chamado Termo de Consentimento Livre e Esclarecido, visa assegurar seus direitos como participante da pesquisa e é elaborado em duas vias, assinadas e rubricadas pelo pesquisador e pelo(a) participante / responsável legal, sendo que uma via deverá ficar com você e outra com o pesquisador.

Por favor, leia com calma e atenção, aproveitando para esclarecer suas dúvidas. Se houver perguntas antes ou depois de assiná-lo, você poderá esclarecê-las com o pesquisador. Se preferir, pode levar este Termo para casa e consultar seus familiares ou outras pessoas antes de decidir participar. Não haverá nenhum tipo de penalização ou prejuízo se você não aceitar participar ou retirar sua autorização em qualquer momento.

Emenda 001 – alteração da forma de assinatura e aceite do TCLE
Em decorrência da pandemia mundial do Covid-19, esse documento poderá ser assinado e armazenado em ambiente digital. O campo de assinatura poderá ser preenchido com uma foto da assinatura ou com assinatura digital (e-CPF). As rubricas em todas as páginas foram substituídas por caixas de checagem que devem ser marcadas por ambas as partes. Elas estão presentes em todas as páginas deste documento.

Justificativa e objetivos:
A construção civil é uma das indústrias mais nocivas para o meio ambiente. Ela é responsável por consumir entre 20% e 50% do total de recursos naturais existentes no planeta e, no Brasil, é a maior responsável pela geração de resíduos sólidos urbanos. Nesse cenário, a madeira é considerada como uma das poucas alternativas para o desenvolvimento sustentável deste setor.

Entretanto, para que seja viável sua maior aplicação no mercado como elemento construtivo, são necessários avanços tecnológicos de sistemas construtivos que se apropriem das características das madeiras. Por esses motivos, um dos propósitos da pesquisa é de ampliar o conhecimento sobre um tipo específico de sistema, conhecido como Estrutura Recíproca (ER). Dentre suas principais características, destacam-se: (1) a possibilidade de se construir grandes vãos; (2) a composição por elementos lineares ou bidimensionais de pequena dimensão, que possibilitam um melhor aproveitamento e economia do material; (3) os elementos são de fácil fabricação, transporte e a montagem; (4) os elementos sempre possuem quatro regiões de conexão, sendo duas para cada função; (5) a oportunidade de se obter complexidade geométrica com alto grau de liberdade; e (6) a estruturação é feita pela composição dos leques, que dependem de, no mínimo, três elementos diferentes.

Dessa forma, parte-se do pressuposto de que as Estruturas Recíprocas são capazes de responder às demandas de sustentabilidade e complexidade da arquitetura contemporânea. Essa pesquisa tem como objetivo geral a criação de um sistema computacional algorítmico adaptativo, utilizado para a produção de um sistema de ERs, solucionado, primariamente, pelos mecanismos de conexão entre os elementos lineares em madeira, fabricado digitalmente e embasado no conceito de personalização em massa.

Rubrica do pesquisador: ☒
Rubrica do(a) participante: ☐

Procedimentos:
Participando do estudo você está convidado(a) a compartilhar o produto de uma disciplina com o pesquisador responsável.

Durante o primeiro semestre de 2019, foi oferecida a disciplina AU 254, para os cursos de graduação em Arquitetura e Urbanismo e pós-graduação em Arquitetura, Tecnologia e Cidade, da Universidade Estadual de Campinas. Nessa disciplina, você desenvolveu uma estrutura tridimensional com o propósito de ativação do espaço público. Uma das etapas dessa disciplina foi a estruturação das geometrias projetadas e, para isso, foi aplicado o código de ERs, em desenvolvimento pelo autor da pesquisa referente a este TCLE.

Apesar de não ser uma etapa prevista no desenvolvimento desta pesquisa, os resultados alcançados por você e seu grupo foram além do previsto e, dessa forma, são objetos interessantes para a validação de um estágio parcial da pesquisa. Por isso, você está convidado(a) a compartilhar o produto desenvolvido com o pesquisador para fins de pesquisa e publicações científicas.

Caso você decida participar, deve estar ciente de que o pesquisador utilizará o código algoritmico desenvolvido e o registro fotográfico dos protótipos e não irão identificar você. Todos os outros dados fornecidos serão confidenciais e armazenados pelo pesquisador responsável em local seguro, por um período de cinco anos. As imagens utilizadas irão preservar a identidade de qualquer envolvido no desenvolvimento das maquetes, com exclusiva finalidade acadêmica e de forma anônima.

Desconfortos e riscos:
Considerando que o material referente a este TCLE já foi desenvolvido durante uma disciplina, os riscos apresentados são mínimos. No entanto, há a possibilidade de desconforto com relação a disponibilização de material ou decorrente de dúvidas ou não esclarecimento de tópicos referentes a pesquisa. O pesquisador se dispõe a esclarecer todas as dúvidas e a orientar processos ligados ao sistema computacional e à produção de protótipos desenvolvidos.

A fabricação das maquetes foi realizada pelo uso da cortadora a laser, disponível no LAPAC. O equipamento foi operado pelo técnico do laboratório de modelos e maquetes, usando os equipamentos de segurança e tendo disponibilidade do kit de primeiros socorros caso fosse necessário. Como todos os procedimentos foram feitos na Unicamp, durante uma disciplina eletiva, não foram previstos riscos de deslocamento.

Quanto ao uso de imagem, garante-se sigilo e privacidade.

Benefícios:

Como benefício direto a você, a pesquisa demonstra o potencial do uso de processos e equipamentos digitais para a produção de elementos personalizados e de melhor qualidade, dado os resultados de simulações e de adaptações do sistema algoritmico. Você também tem como ganho o aprofundamento de conhecimento sobre os benefícios das ferramentas digitais no processo de projeto.

Dentre os principais benefícios da pesquisa, de forma direta ou indireta, identificam-se i) a ampliação sobre a estruturação da forma arquitetônica pelo uso de sistemas construtivos alternativos, como as ERs; ii) compreensão sobre processos algoritmicos e paramétricos em arquitetura; iii) compreensão sobre processo *file-to-factory* e fabricação digital na arquitetura contemporânea e; iv) processos de montagem de formas complexas. Espera-se que os resultados

Rubrica do pesquisador: ☒
Rubrica do(a) participante: ☐

da pesquisa ainda possam contribuir com a inovação pela obtenção de uma patente de um novo sistema de conexões para ERs.

Dentre os principais benefícios da pesquisa, de forma direta ou indireta, identificam-se i) a ampliação sobre a estruturação da forma arquitetônica pelo uso de sistemas construtivos alternativos, como as ERs; ii) compreensão sobre processos algorítmicos e paramétricos em arquitetura; iii) compreensão sobre processo *file-to-factory* e fabricação digital na arquitetura contemporânea e; iv) processos de montagem de formas complexas. Espera-se que os resultados da pesquisa ainda possam contribuir com a inovação pela obtenção de uma patente de um novo sistema de conexões para ERs.

Acompanhamento e assistência:
Você tem o direito à assistência integral e gratuita devido a danos diretos e indiretos, imediatos e tardios, pelo tempo que for necessário. Você tem o direito de se recusar a participar ou retirar seu consentimento, em qualquer fase da pesquisa, sem nenhum prejuízo a você.

Sigilo e privacidade:
Você tem a garantia de que sua identidade será mantida em sigilo e nenhuma informação será dada a outras pessoas que não façam parte da equipe de pesquisadores envolvidos nesta pesquisa. Na divulgação de resultados desse estudo, seu nome não será citado e sua imagem não será exposta.

Ressarcimento e indenização:
Se você tiver algum gasto pela sua participação nessa pesquisa, ele será assumido pelo pesquisador e reembolsado para você. Você terá a garantia ao direito à indenização diante eventuais danos decorrentes da pesquisa.

Contato:
Em caso de dúvidas sobre a pesquisa, você poderá entrar em contato com o pesquisador responsável Caio Magalhães Castriotto, pelo telefone (11) 97023 4673 ou pelo e-mail caio.castriotto@gmail.com.

Em caso de denúncias ou reclamações sobre sua participação e sobre questões éticas do estudo, você poderá entrar em contato com a secretaria do Comitê de Ética em Pesquisas em Ciências Humanas e Sociais (CEP-CHS) da Unicamp, das 08h às 11h30 e das 13h às 17h30, na Av. Bertrand Russell, 801, 2º Piso, Bloco C, Sala 5. Cidade Universitária "Zeferino Vaz", Campinas-SP, Brasil. CEP 13083-865. Telefone: (19) 3521 6838; e-mail: cepchs@unicamp.br.

O Comitê de Ética em Pesquisa (CEP):
O papel do CEP é avaliar e acompanhar os aspectos éticos de todas as pesquisas envolvendo seres humanos. A Comissão Nacional de Ética em Pesquisa (CONEP), tem por objetivo desenvolver a regulamentação sobre proteção dos seres humanos envolvidos nas pesquisas. Desempenha um papel coordenador da rede de Comitês de Ética em Pesquisa (CEPs) das instituições, além de assumir a função de órgão consultor na área de ética em pesquisas.

Rubrica do pesquisador: ☒
Rubrica do(a) participante: ☐

Consentimento livre e esclarecido:
Após ter recebido esclarecimento sobre a natureza da pesquisa, seus objetivos, métodos, benefícios previstos, potenciais riscos e o incômodo que esta possa acarretar, aceito participar:

Nome do(a) participante da pesquisa: Clique ou toque aqui para inserir o texto.

Assinatura do(a) participante da pesquisa

Ou

Assinatura digital / e-CPF: Clique ou toque aqui para inserir o texto.

Data: Clique ou toque aqui para inserir uma data.

Responsabilidade do Pesquisador:
Asseguro ter cumprido as exigências da resolução 510/2016 CNS/MS e complementares na elaboração do protocolo e na obtenção deste Termo de Consentimento Livre e Esclarecido. Asseguro, também, ter explicado e fornecido uma via deste documento ao participante da pesquisa. Informo que o estudo foi aprovado pelo CEP perante o qual o projeto foi apresentado e pela CONEP, quando pertinente. Comprometo-me a utilizar o material e os dados obtidos nesta pesquisa exclusivamente para as finalidades previstas neste documento ou conforme o consentimento dado pelo participante da pesquisa.

Nome do pesquisador: Caio Magalhães Castriotto

Caio Magalhães Castriotto

Assinatura do pesquisador

Data: 30/06/2021

Rubrica do pesquisador: ☒
Rubrica do(a) participante: ☐

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO
PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA, TECNOLOGIA E CIDADE

APÊNDICE V: PROTOCOLO DO PEDIDO DE PATENTE

CAMPINAS – SP

JANEIRO 2023

INPI INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL

23/12/2021 870210120435 23:09

29409161944358683

Pedido nacional de Invenção, Modelo de Utilidade, Certificado de Adição de Invenção e entrada na fase nacional do PCT

Número do Processo: BR 10 2021 026403 9

Dados do Depositante (71)

Depositante 1 de 1

Nome ou Razão Social: UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - UNICAMP

Tipo de Pessoa: Pessoa Jurídica

CPF/CNPJ: 46068425000133

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Jurídica: Instituição de Ensino e Pesquisa

Endereço: Cidade Universitária Zeferino Vaz

Cidade: Campinas

Estado: SP

CEP: 13084-971

País: Brasil

Telefone:

Fax:

Email: patentes@inova.unicamp.br

Dados do Pedido

Natureza Patente: 10 - Patente de Invenção (PI)

Título da Invenção ou Modelo de Utilidade (54): MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DE GEOMETRIA DE CONEXÕES DE ESTRUTURAS RECÍPROCAS E CONEXÕES DE ESTRUTURAS RECÍPROCAS ASSIM OBTIDAS

Resumo: A presente invenção se refere a um método para determinação de geometria de conexões de estruturas recíprocas e conexões de estruturas recíprocas assim obtidas. A presente invenção é especificamente direcionada a Estruturas Recíprocas e o sistema apresenta grande liberdade de configurações, incorporando a complexidade geométrica, com aumento da rigidez estrutural e facilidade da incorporação de estruturas secundárias para sistemas de cobertura e/ou vedação

Figura a publicar: 4-B

Dados do Procurador

Procurador:

Nome ou Razão Social: Raquel Moutinho Barbosa

Numero OAB:

Numero API:

CPF/CNPJ: 30579878856

Endereço: Rua Roxo Moreira, 1831

Cidade: Campinas

Estado: SP

CEP: 13083-591

Telefone: 1935212620

Fax:

Email: raquel.barbosa@inova.unicamp.br

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO
PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA, TECNOLOGIA E CIDADE

APÊNDICE VI: DADOS OBTIDOS PELOS ENSAIOS FÍSICOS DAS CONEXÕES USADOS PARA CALCULAR AS CURVAS TENDÊNCIA

CAMPINAS – SP

JANEIRO 2023

TABELA A: ENSAIO 1 - RESULTADOS PARA A CURVA DE TENDÊNCIA MÉDIA

X	Y Curva Superior	Y Curva Inferior	Y Curva Média
0	47	-47	0
1	57,9581	-30,2354	13,86135
2	69,4184	-13,6408	27,8888
3	81,3359	2,767	42,05145
4	93,6656	18,9712	56,3184
5	106,3625	34,955	70,65875
6	119,3816	50,7016	85,0416
7	132,6779	66,1942	99,43605
8	146,2064	81,416	113,8112
9	159,9221	96,3502	128,1362
10	173,78	110,98	142,38
11	187,7351	125,2886	156,5119
12	201,7424	139,2592	170,5008
13	215,7569	152,875	184,316
14	229,7336	166,1192	197,9264
15	243,6275	178,975	211,3013
16	257,3936	191,4256	224,4096
17	270,9869	203,4542	237,2206
18	284,3624	215,044	249,7032
19	297,4751	226,1782	261,8267
20	310,28	236,84	273,56
21	322,7321	247,0126	284,8724
22	334,7864	256,6792	295,7328
23	346,3979	265,823	306,1105
24	357,5216	274,4272	315,9744
25	368,1125	282,475	325,2938
26	378,1256	289,9496	334,0376
27	387,5159	296,8342	342,1751
28	396,2384	303,112	349,6752
29	404,2481	308,7662	356,5072
30	411,5	313,78	362,64
31	417,9491	318,1366	368,0429
32	423,5504	321,8192	372,6848
33	428,2589	324,811	376,535
34	432,0296	327,0952	379,5624

TABELA B: ENSAIO 2 - RESULTADOS PARA A CURVA DE TENDÊNCIA MÉDIA

X	Y Curva Superior	Y Curva Inferior	Y Curva Média
0	47	-47	0
1	54,0846	-37,4361	8,32425
2	62,0874	-27,1084	17,4895
3	70,9274	-16,0889	27,41925
4	80,5236	-4,4496	38,037
5	90,795	7,7375	49,26625
6	101,6606	20,4004	61,0305
7	113,0394	33,4671	73,25325
8	124,8504	46,8656	85,858
9	137,0126	60,5239	98,76825
10	149,445	74,37	111,9075
11	162,0666	88,3319	125,1993
12	174,7964	102,3376	138,567
13	187,5534	116,3151	151,9343
14	200,2566	130,1924	165,2245
15	212,825	143,8975	178,3613
16	225,1776	157,3584	191,268
17	237,2334	170,5031	203,8683
18	248,9114	183,2596	216,0855
19	260,1306	195,5559	227,8433
20	270,81	207,32	239,065
21	280,8686	218,4799	249,6743
22	290,2254	228,9636	259,5945
23	298,7994	238,6991	268,7493
24	306,5096	247,6144	277,062
25	313,275	255,6375	284,4563
26	319,0146	262,6964	290,8555
27	323,6474	268,7191	296,1833
28	327,0924	273,6336	300,363
29	329,2686	277,3679	303,3183
30	330,095	279,85	304,9725
31	329,4906	281,0079	305,2493
32	327,3744	280,7696	304,072
33	323,6654	279,0631	301,3643
34	318,2826	275,8164	297,0495

TABELA C: ENSAIO 3 - RESULTADOS PARA A CURVA DE TENDÊNCIA MÉDIA

X	Y Curva Superior	Y Curva Inferior	Y Curva Média
0	47	-47	0
1	50,7614	-37,501	6,6302
2	55,7618	-27,5158	14,123
3	61,913	-17,0888	22,4121
4	69,1268	-6,2644	31,4312
5	77,315	4,913	41,114
6	86,3894	16,399	51,3942
7	96,2618	28,1492	62,2055
8	106,844	40,1192	73,4816
9	118,0478	52,2646	85,1562
10	129,785	64,541	97,163
11	141,9674	76,904	109,4357
12	154,5068	89,3092	121,908
13	167,315	101,7122	134,5136
14	180,3038	114,0686	147,1862
15	193,385	126,334	159,8595
16	206,4704	138,464	172,4672
17	219,4718	150,4142	184,943
18	232,301	162,1402	197,2206
19	244,8698	173,5976	209,2337
20	257,09	184,742	220,916
21	268,8734	195,529	232,2012
22	280,1318	205,9142	243,023
23	290,777	215,8532	253,3151
24	300,7208	225,3016	263,0112
25	309,875	234,215	272,045
26	318,1514	242,549	280,3502
27	325,4618	250,2592	287,8605
28	331,718	257,3012	294,5096
29	336,8318	263,6306	300,2312
30	340,715	269,203	304,959
31	343,2794	273,974	308,6267
32	344,4368	277,8992	311,168
33	344,099	280,9342	312,5166
34	342,1778	283,0346	312,6062

TABELA D: ENSAIO 4 - RESULTADOS PARA A CURVA DE TENDÊNCIA MÉDIA

X	Y Curva Superior	Y Curva Inferior	Y Curva Média
0	47	-47	0
1	53,5777	-36,2578	8,65995
2	60,8358	-25,286	17,7749
3	68,7209	-14,1128	27,30405
4	77,1796	-2,7664	37,2066
5	86,1585	8,725	47,44175
6	95,6042	20,3332	57,9687
7	105,4633	32,03	68,74665
8	115,6824	43,7872	79,7348
9	126,2081	55,5766	90,89235
10	136,987	67,37	102,1785
11	147,9657	79,1392	113,5525
12	159,0908	90,856	124,9734
13	170,3089	102,4922	136,4006
14	181,5666	114,0196	147,7931
15	192,8105	125,41	159,1103
16	203,9872	136,6352	170,3112
17	215,0433	147,667	181,3552
18	225,9254	158,4772	192,2013
19	236,5801	169,0376	202,8089
20	246,954	179,32	213,137
21	256,9937	189,2962	223,145
22	266,6458	198,938	232,7919
23	275,8569	208,2172	242,0371
24	284,5736	217,1056	250,8396
25	292,7425	225,575	259,1588
26	300,3102	233,5972	266,9537
27	307,2233	241,144	274,1837
28	313,4284	248,1872	280,8078
29	318,8721	254,6986	286,7854
30	323,501	260,65	292,0755
31	327,2617	266,0132	296,6375
32	330,1008	270,76	300,4304
33	331,9649	274,8622	303,4136
34	332,8006	278,2916	305,5461

TABELA E: ENSAIO 5 - RESULTADOS PARA A CURVA DE TENDÊNCIA MÉDIA

X	Y Curva Superior	Y Curva Inferior	Y Curva Média
0	47	-47	0
1	52,067	-36,3597	7,85365
2	57,8982	-25,5904	16,1539
3	64,451	-14,6975	24,87675
4	71,6828	-3,6864	33,9982
5	79,551	7,4375	43,49425
6	88,013	18,6688	53,3409
7	97,0262	30,0021	63,51415
8	106,548	41,432	73,99
9	116,5358	52,9531	84,74445
10	126,947	64,56	95,7535
11	137,739	76,2473	106,9932
12	148,8692	88,0096	118,4394
13	160,295	99,8415	130,0683
14	171,9738	111,7376	141,8557
15	183,863	123,6925	153,7778
16	195,92	135,7008	165,8104
17	208,1022	147,7571	177,9297
18	220,367	159,856	190,1115
19	232,6718	171,9921	202,332
20	244,974	184,16	214,567
21	257,231	196,3543	226,7927
22	269,4002	208,5696	238,9849
23	281,439	220,8005	251,1198
24	293,3048	233,0416	263,1732
25	304,955	245,2875	275,1213
26	316,347	257,5328	286,9399
27	327,4382	269,7721	298,6052
28	338,186	282	310,093
29	348,5478	294,2111	321,3795
30	358,481	306,4	332,4405
31	367,943	318,5613	343,2522
32	376,8912	330,6896	353,7904
33	385,283	342,7795	364,0313
34	393,0758	354,8256	373,9507

TABELA F: ENSAIO 6 - RESULTADOS PARA A CURVA DE TENDÊNCIA MÉDIA

X	Y Curva Superior	Y Curva Inferior	Y Curva Média
0	47	-47	0
1	54,154	-26,8074	13,6733
2	63,794	-6,9024	28,4458
3	75,635	12,6958	44,1654
4	89,392	31,968	60,68
5	104,78	50,895	77,8375
6	121,514	69,4576	95,4858
7	139,309	87,6366	113,4728
8	157,88	105,4128	131,6464
9	176,942	122,767	149,8545
10	196,21	139,68	167,945
11	215,399	156,1326	185,7658
12	234,224	172,1056	203,1648
13	252,4	187,5798	219,9899
14	269,642	202,536	236,089
15	285,665	216,955	251,31
16	300,184	230,8176	265,5008
17	312,914	244,1046	278,5093
18	323,57	256,7968	290,1834
19	331,867	268,875	300,371
20	337,52	280,32	308,92
21	340,244	291,1126	315,6783
22	339,754	301,2336	320,4938
23	335,765	310,6638	323,2144
24	327,992	319,384	323,688
25	316,15	327,375	321,7625
26	299,954	334,6176	317,2858
27	279,119	341,0926	310,1058
28	253,36	346,7808	300,0704
29	222,392	351,663	287,0275
30	185,93	355,72	270,825
31	143,689	358,9326	251,3108
32	95,384	361,2816	228,3328
33	40,73	362,7478	201,7389
34	-20,558	363,312	171,377

TABELA G: ANÁLISE - RESULTADOS PARA A CURVA DE TENDÊNCIA MÉDIA

X	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 6	Y Média Final
0	0	0	0	0	0	0	0
1	13,86135	8,32425	6,6302	8,65995	7,85365	13,6733	9,833783
2	27,8888	17,4895	14,123	17,7749	16,1539	28,4458	20,31265
3	42,05145	27,41925	22,4121	27,30405	24,87675	44,1654	31,3715
4	56,3184	38,037	31,4312	37,2066	33,9982	60,68	42,94523
5	70,65875	49,26625	41,114	47,44175	43,49425	77,8375	54,96875
6	85,0416	61,0305	51,3942	57,9687	53,3409	95,4858	67,37695
7	99,43605	73,25325	62,2055	68,74665	63,51415	113,4728	80,10473
8	113,8112	85,858	73,4816	79,7348	73,99	131,6464	93,087
9	128,1362	98,76825	85,1562	90,89235	84,74445	149,8545	106,2587
10	142,38	111,9075	97,163	102,1785	95,7535	167,945	119,5546
11	156,5119	125,1993	109,4357	113,5525	106,9932	185,7658	132,9097
12	170,5008	138,567	121,908	124,9734	118,4394	203,1648	146,2589
13	184,316	151,9343	134,5136	136,4006	130,0683	219,9899	159,5371
14	197,9264	165,2245	147,1862	147,7931	141,8557	236,089	172,6792
15	211,3013	178,3613	159,8595	159,1103	153,7778	251,31	185,62
16	224,4096	191,268	172,4672	170,3112	165,8104	265,5008	198,2945
17	237,2206	203,8683	184,943	181,3552	177,9297	278,5093	210,6377
18	249,7032	216,0855	197,2206	192,2013	190,1115	290,1834	222,5843
19	261,8267	227,8433	209,2337	202,8089	202,332	300,371	234,0692
20	273,56	239,065	220,916	213,137	214,567	308,92	245,0275
21	284,8724	249,6743	232,2012	223,145	226,7927	315,6783	255,394
22	295,7328	259,5945	243,023	232,7919	238,9849	320,4938	265,1035
23	306,1105	268,7493	253,3151	242,0371	251,1198	323,2144	274,091
24	315,9744	277,062	263,0112	250,8396	263,1732	323,688	282,2914
25	325,2938	284,4563	272,045	259,1588	275,1213	321,7625	289,6396
26	334,0376	290,8555	280,3502	266,9537	286,9399	317,2858	296,0705
27	342,1751	296,1833	287,8605	274,1837	298,6052	310,1058	301,5189
28	349,6752	300,363	294,5096	280,8078	310,093	300,0704	305,9198
29	356,5072	303,3183	300,2312	286,7854	321,3795	287,0275	309,2082
30	362,64	304,9725	304,959	292,0755	332,4405	270,825	311,3188
31	368,0429	305,2493	308,6267	296,6375	343,2522	251,3108	312,1865
32	372,6848	304,072	311,168	300,4304	353,7904	228,3328	311,7464
33	376,535	301,3643	312,5166	303,4136	364,0313	201,7389	309,9333
34	379,5624	297,0495	312,6062	305,5461	373,9507	171,377	306,682