



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

MAIKOL YOSHIE YABUKI

**ALTA TECNOLOGIA E SUSTENTABILIDADE: O
PROCESSO DE *UPCYCLING* EM RESÍDUOS
PLÁSTICOS POR MEIO DO USO DE SISTEMAS
CAD/CAM**

CAMPINAS

2019

MAIKOL YOSHIE YABUKI

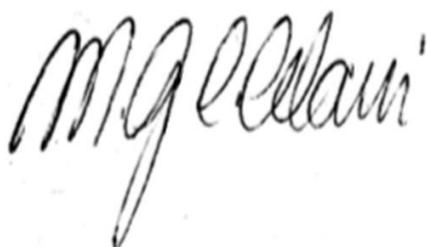
**ALTA TECNOLOGIA E SUSTENTABILIDADE: O
PROCESSO DE *UPCYCLING* EM RESÍDUOS
PLÁSTICOS POR MEIO DO USO DE SISTEMAS
CAD/CAM**

Dissertação de Mestrado apresentada a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Mestre em Arquitetura, Tecnologia e Cidade, na área de Arquitetura, Tecnologia e Cidade

Orientador(a): Profa. Dra. Maria Gabriela Caffarena Celani

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO MAIKOL YOSHIE YABUKI E ORIENTADO PELA PROFA. DRA. MARIA GABRIELA CAFFARENA CELANI.

ASSINATURA DO ORIENTADOR(A)



CAMPINAS

2019

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

Yabuki, Maikol Yoshie, 1983-
Y103a Alta tecnologia e sustentabilidade: o processo de upcycling em resíduos plásticos por meio do uso de sistemas CAD/CAM / Maikol Yoshie Yabuki. – Campinas, SP : [s.n.], 2019.

Orientador: Maria Gabriela Caffarena Celani.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Sistema CAD/CAM. 2. Sustentabilidade. 3. Ornamento. 4. Decoração e ornamento. 5. Conforto térmico. I. Celani, Maria Gabriela Caffarena, 1967-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: High technology and sustainability: the process of upcycling in plastic waste by using CAD/CAM systems

Palavras-chave em inglês:

CAD/CAM systems

Sustainability

Ornament

Decoration and ornament

Thermal confort

Área de concentração: Arquitetura, Tecnologia e Cidade

Titulação: Mestre em Arquitetura, Tecnologia e Cidade

Banca examinadora:

Maria Gabriela Caffarena Celani [Orientador]

Joana Carla Soares Gonçalves

Emilia Wanda Rutkowski

Data de defesa: 16-08-2019

Programa de Pós-Graduação: Arquitetura, Tecnologia e Cidade

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-0848-8413>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/1992963513730743>

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

**ALTA TECNOLOGIA E SUSTENTABILIDADE: O PROCESSO DE
UPCYCLING EM RESÍDUOS PLÁSTICOS POR MEIO DO USO
DE SISTEMAS CAD/CAM**

Maikol Yoshie Yabuki

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Prof. Dra. Maria Gabriela Caffarena Celani
Presidente e Orientador(a) / FEC / UNICAMP

Prof. Dra. Joana Carla Soares Gonçalves
Universidade de São Paulo

Prof. Dra. Emilia Wanda Rutkowski
FEC / UNICAMP

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 16 de Agosto de 2019

AGRADECIMENTOS

À orientação da Professora Gabriela Celani
pela amizade, carinho e confiança.

Aos professores da FEC – UNICAMP
pelos ensinamentos repassados.

À equipe de pesquisadores, funcionários do LAPAC e Maquetaria da FEC
pelo apoio no desenvolvimento desta pesquisa.

À FEC-UNICAMP pela oportunidade e apoio
imprescindível para o desenvolvimento desta pesquisa.

À Associação de reciclagem Novo Tempo
pela parceria e experiências compartilhadas.

À Faculdade de Arquitectura da Universidade de Lisboa
por meio do Programa Santander de Mobilidade Internacional e
Diretoria Executiva de Relações Exteriores - UNICAMP
pela oportunidade de crescimento acadêmico e pessoal em intercâmbio.

Aos meus pais, Laide e Antonio,
por sempre me amarem e apoiarem.

À minha irmã, Lauren,
por compartilhar de sua experiência e
conhecimento acadêmico e sempre me auxiliar.

Aos amigos,
por compartilharem de toda a expectativa,
frustrações e realizações de um sonho pessoal.

RESUMO

O século XXI expressa um intenso avanço tecnológico aplicado nos mais diversos equipamentos gradualmente mais acessíveis à sociedade. Ao mesmo tempo, para atender a essa demanda, os recursos naturais são consumidos exponencialmente gerando uma enorme quantidade de resíduos com destinação nem sempre adequada. Nos países em desenvolvimento, os principais agentes ligados à tentativa de redução desse impacto ambiental negativo por meio da reutilização de materiais são as cooperativas de reciclagem responsáveis pela seleção dos materiais descartados e encaminhamento a sua reintrodução no sistema produtivo. Apesar da maior conscientização da sociedade, os cooperados ainda são estigmatizados e situam-se à margem de um sistema de produção capaz de agregar valor aos produtos feitos com materiais reciclados ou reaproveitados. A incorporação de qualidades estéticas e tecnológicas visando a eficiência energética na produção de elementos construtivos a partir de materiais disponíveis nessas cooperativas poderia contribuir, por um lado, para agregar valor ao trabalho dos cooperados e, por outro, para reduzir a energia gasta tanto na reciclagem dos materiais descartados como no condicionamento artificial de edificações. Através da *Design Science Research*, esta pesquisa visa a criação de um artefato por meio do uso de sistemas CAD/CAM utilizando materiais descartados a fim de reintroduzi-los na cadeia produtiva sob a forma de elementos arquitetônicos de acabamento. Sua produção pretende aumentar a sustentabilidade no meio ambiente construído por meio do aumento da vida útil dos materiais empregados e auxiliar na redução do consumo de energia das edificações pelo controle passivo de temperaturas internas. Pela elevada representação nos materiais descartados, baixo índice de reaproveitamento e potencial de aplicação em equipamentos CNC, o plástico foi selecionado como matéria prima para o desenvolvimento do artefato. Em sequência, é utilizado o processo de *vacuum forming* como meio de transformação com a incorporação de sistemas CAD/CAM complementares e *Phase Change Materials*, resultando em efeitos estéticos e de bom desempenho térmico no artefato. A pesquisa procura novas possibilidades de aplicação da alta tecnologia no conceito da economia circular, aproximando a sustentabilidade de um sistema abrangente de pensamento, envolvendo consciência, meio ambiente, economia e sociedade.

Palavras-chave: fabricação digital; sistemas CAD/CAM; sustentabilidade ambiental; *upcycling*; ornamento; desempenho térmico.

ABSTRACT

The 21st century expresses an intense technological advance applied in diverse equipment gradually more accessible to society. At the same time, to satisfy this demand, natural resources are consumed exponentially generating a huge amount of waste with destination not always adequate. In developing countries, the main agents involved in attempting to reduce this negative environmental impact through the reuse of materials are the recycling cooperatives responsible for the sort of discarded materials and re-introduction into the production system. Despite the increased society's awareness, the strengthening of the idea of sustainable development and a greater quantity of recycled products available on the market, the cooperative is still stigmatized and is situated outside a production system capable of adding value to products made from recycled or reused materials. The incorporation of aesthetic and technological qualities aiming energy efficiency in the production of constructive elements from materials available in these cooperatives could contribute, on the one hand, to add value to the work of the cooperative and, on the other hand, to reduce the energy spent both in recycling of materials discarded as in the artificial conditioning of buildings. Through Design Science Research, this research aims to create an artifact through the use of CAD / CAM systems using discarded materials in order to reintroduce them in the production chain in the form of architectural finishing elements. Due to the high representation among the discarded materials, low reuse rate and potential of application in CNC equipment, the plastic was selected as raw material for the development of the artifact. In sequence, the vacuum forming process is used as a transformation medium with the incorporation of complementary CAD / CAM systems and Phase Change Materials, resulting in aesthetic effects and thermal performance. The research seeks new possibilities for the application of high technology in the concept of circular economy, bringing sustainability closer to a system of thinking involving consciousness, environment, economy and society.

Keywords: digital manufacturing; CAD / CAM systems; sustainability; upcycling; ornament; thermal performance.

Lista de Figuras

Figura 1: Conceitos chave para a pesquisa.....	17
Figura 2: Cobertura proposta reutilizando placas de campanhas política.....	20
Figura 3: Detalhe da cobertura proposta.....	20
Figura 4: Detalhe das células componentes da cobertura.....	20
Figura 5: Análise de conforto térmico pela cobertura.....	20
Figura 6: Matriz de fabricação com anéis cortados em fresadora CNC.....	21
Figura 7: Vista interna da torre central.....	21
Figura 8: Vista da conexão entre as torres.....	21
Figura 9: Estimativa da composição dos resíduos sólidos coletados no Brasil.....	25
Figura 10: Índice de recuperação dos resíduos recicláveis 2012-2017 (%).....	25
Figura 11: Nível de dificuldade na reciclagem de resíduos plásticos.....	27
Figura 12: Quadro resumo dos conceitos de Reciclagem, <i>Downcycling</i> e <i>Upcycling</i>	30
Figura 13: Tipos de PCM.....	37
Figura 14: PCM microencapsulado em líquido e pó.....	38
Figura 15: Exemplos de PCM macroencapsulados.....	39
Figura 16: Critérios para a Design Science Research.....	42
Figura 17: Etapas detalhadas da Design Science Research.....	44
Figura 18: Fases de estudo para a proposição dos artefatos.....	48
Figura 19: Mapa de coleta seletiva no Município de Rio Claro - SP.....	49
Figura 20: Esteira de triagem na Cooperviva.....	49
Figura 21: Esteira de triagem e materiais separados pelos cooperados.....	49
Figura 22: Barracão de instalação da Associação Novo Tempo.....	50
Figura 23: Trabalhadores da associação separando material coletado manualmente.....	50
Figura 24: Laboratório de automação e prototipagem para a Arquitetura e Construção.....	51
Figura 25: Pesquisadores entre a fresadora e cortadora a laser no LAPAC.....	51
Figura 26: Visitantes em atividades do LAPAC.....	52
Figura 27: Fresadora Vitor Ciola em funcionamento.....	52
Figura 28: Funcionamento de equipamentos de moldagem a vácuo.....	52
Figura 29: Laboratório de Prototipagem Rápida.....	53
Figura 30: CNC Router Pronum - Promaster.....	53
Figura 31: Impressoras 3D BCN3D Sigma.....	54
Figura 32: Impressora 3D Beethefirst.....	54
Figura 33: Montagem do molde.....	55
Figura 34: Equipamento de vacuum forming.....	55
Figura 35: Molde feito com perfis de madeira cortados a laser.....	55
Figura 36: Máscara resultante do processo.....	55
Figura 37: Mesa de vácuo original do equipamento.....	56
Figura 38: Prancha de madeira a ser sobreposta na mesa de vácuo do equipamento.....	56
Figura 39: Máscaras para fixar materiais plásticos descartados com diferentes dimensões no equipamento.....	57
Figura 40: Equipamento de termomoldagem a vácuo do LAPAC.....	57
Figura 41: Corte para planificação de embalagem plástica em HDPE.....	57
Figura 42: Resultado do teste com HDPE na vacuum forming utilizando molde em MDF.....	57
Figura 43: Resultado do teste com PP na vacuum forming utilizando moldes de madeira.....	58
Figura 44: Resultado do teste com PS na vacuum forming utilizando moldes de madeira.....	59
Figura 45: Tela aramada para suporte do painel.....	60
Figura 46: Encaixe de possíveis módulos.....	60
Figura 47: Painéis termomoldados preenchidos com PCM.....	62
Figura 48: (a) Temperatura do ar sem e com OC como PCM. A seta indica a redução na temperatura do ar com o OC. (b) Temperaturas do ar e do OC. A linha pontilhada indica o ajuste para a fase sólida sensível, fase latente e fase líquida sensível do OC.....	64
Figura 49: BASF Micronal® PCM Smartboard estruturado como drywall ou em forros.....	65
Figura 50: F.E.S-Board®.....	66

Figura 51: F.E.S-Board® estruturado em forro	66
Figura 52: Aplicação do Delta®-Cool 24 sobre placas de forro	66
Figura 53: Delta®-Cool 24 em diferentes formas de encapsulamento.....	66
Figura 54: DuPont™ Energain®.....	67
Figura 55: Placa de alumínio com PCM	67
Figura 56: Placa de fibra natural com PCM	67
Figura 57: KNAUF COMFORTBOARD.....	68
Figura 58: Modelos revestimento Formix 3D	69
Figura 59: Exemplo aplicação revestimento 3D plástico	69
Figura 60: Exemplo aplicação revestimento 3D plástico Revemix.....	69
Figura 61: Modelos revestimento 3D plásticos Habitarte	70
Figura 62: Especialistas envolvidos na pesquisa	70
Figura 63: Inter relações entre os temas de pesquisa.....	72
Figura 64: Sequência de atividades para o desenvolvimento do artefato	73
Figura 65: Dimensões da base do molde	75
Figura 66: Altura da base do molde.....	75
Figura 67: Divisão de aresta na quantidade de aletas deseja para o molde	75
Figura 68: Deslocamento dos pontos na altura para as aletas do molde.....	75
Figura 69: Perfil do molde em uma de suas direções	76
Figura 70: Extrusão do perfil	76
Figura 71: Prisma a ser subtraído do modelo	76
Figura 72: Metade diagonal do molde	76
Figura 73: Segunda metade diagonal do molde	77
Figura 74: Modelo final do molde	77
Figura 75: Resultado possível de modelo para molde (01)	77
Figura 76: Resultado possível de modelo para molde (02)	77
Figura 77: Modelo para o molde de testes.....	78
Figura 78: Molde impresso em impressora 3D	78
Figura 79: Molde inicial para testes em termomoldagem	78
Figura 80: Molde boleado para reduzir a fragilidade das aletas nas cápsulas	78
Figura 81: Processo de planificação por corte e resultado da termomoldagem	79
Figura 82: Resultado da termomoldagem em poliestireno	79
Figura 83: Espessura de 165µm em seção plana antes do processo de termomoldagem.....	79
Figura 84: Espessura de 147µm em seção curva antes do processo de termomoldagem.....	79
Figura 85: Espessura de 51,6µm depois da termomoldagem na seção plana	80
Figura 86: Espessura de 32,5µm depois da termomoldagem na seção curva.....	80
Figura 87: Teste de composição 01	80
Figura 88: Teste de composição 01	80
Figura 89: Teste de composição 02	81
Figura 90: Teste de composição 02	81
Figura 91: Teste de composição 03	81
Figura 92: Teste de composição 03	81
Figura 93: Encaixe do módulo na tela aramada de suporte	82
Figura 94: Encaixe do módulo na tela aramada de suporte	82
Figura 95: Cápsula preenchida com óleo de coco solidificado	82
Figura 96: Aspecto visual da cápsula preenchida	82
Figura 97: Tentativa de selamento da cápsula por encaixe.....	83
Figura 98: Tentativa de selamento da cápsula por encaixe.....	83
Figura 99: Aspecto visual da placa de forro depois de montada	83
Figura 100: Placa de forro selada com laminado de PVC autoadesivo	83
Figura 101: Estrutura de fixação de placas de forro de gesso como referência ao artefato	84
Figura 102: Instalação da placa de forro sob a tampa inferior da câmara.....	85
Figura 103: Instalação da placa de forro sob a tampa inferior da câmara.....	85
Figura 104: Placa de forro instalada no interior da câmara	86
Figura 105: Equipamentos instalados no interior da primeira câmara de teste	86

Figura 106: Corte esquemático maquete para simulação térmica.....	87
Figura 107: Vista longitudinal da câmara montada	87
Figura 108: Vista transversal da câmara montada.....	87
Figura 109: Localização de instalação das câmaras.....	88
Figura 110: Câmaras instaladas no local do experimento.....	88
Figura 111: Temperaturas medidas por convecção no período de 26/06/2019 a 30/06/2019	88
Figura 112: Temperaturas medidas por convecção no dia 29/06/2019 com comportamento típico para o período analisado pelo experimento.....	89
Figura 113: Temperaturas medidas por convecção e radiação no dia 29/06/2019 com comportamento típico para o período analisado pelo experimento	90
Figura 114: Temperaturas medidas por radiação no dia 29/06/2019 com comportamento típico para o período analisado pelo experimento.....	91

Lista de Tabelas

Tabela 1: Conceitos de <i>recycling</i> , <i>downcycling</i> e <i>upcycling</i>	29
Tabela 2: Etapas da Design Science Research	43
Tabela 3: Iniciativas de aplicação de sistemas CAD/CAM na reutilização de materiais	47
Tabela 4: Custos para produção de um metro quadrado de painel de forro	92
Tabela 5: Comparação entre preços de produtos existentes no mercado e forro desenvolvido em pesquisa	93

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	16
2.1 Objetivo geral	16
2.2 Objetivos específicos	16
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1 Sistemas CAD/CAM e Arquitetura <i>high-low</i>	17
3.1.1 Repurposed political ply – Arizona St. University – Jason Griffiths (2011)	19
3.1.2 Junk: Design Build Studio – Georgia Inst. of Technology (2011)	20
3.2 O ornamento na arquitetura contemporânea	22
3.3 Sustentabilidade sócio-ambiental	24
3.3.1 Panorama de resíduos sólidos no Brasil	24
3.3.2 O plástico como resíduo sólido descartado	26
3.3.3 Política Nacional de Resíduos Sólidos	27
3.3.4 O conceito de <i>upcycling</i>	28
3.3.5 Sustentabilidade socioeconômica das cooperativas de reciclagem	31
3.4 Desempenho térmico em edificações	32
3.4.1 Zoneamento bioclimático brasileiro e Campinas (SP)	33
3.4.2 Controle térmico passivo	34
3.4.3 Massa térmica	34
3.4.4 Phase Change Material	36
3.4.3.1 Encapsulamento	38
3.4.3.5 Estabilidade de longa duração	39
4. MATERIAIS E MÉTODOS	40
4.1 Caracterização do método	41
4.2 Desenvolvimento da pesquisa – etapas propositivas	45
4.2.1 Identificação do problema	45
4.2.2 Conscientização e caracterização do problema	45
4.2.3 Identificação dos artefatos como solução	46
4.2.4 Proposição dos artefatos	48
4.2.4.1 Levantamento de meios de transformação	51
4.2.4.2 Início do período de testes	55
4.2.4.3 HDPE - Polietileno de alta densidade	57
4.2.4.4 PP - Polipropileno	58
4.2.4.5 PS - Poliestireno	59
4.2.4.6 Composição de painel modular	59

4.2.4.7 Seleção de <i>Phase Change Material</i>	60
4.2.4.8 Conscientização do problema e identificação dos artefatos como solução	61
4.2.4.8.1 <i>Vacuum forming</i> e PCM	61
4.2.4.8.2 Óleo de coco como PCM	63
4.2.4.8.3 Elementos de acabamento com a incorporação de PCM existentes no mercado	65
4.2.4.8.2 Elementos ornamentais produzidos com plástico existentes no mercado	68
4.2.5 Projeto do artefato	70
4.2.6 Desenvolvimento do artefato (explicar cada fase)	73
4.2.6.1 Coleta de material	74
4.2.6.2 Limpeza do material coletado	74
4.2.6.3 Planificação dos objetos	74
4.2.6.4 Desenho paramétrico	74
4.2.6.5 Instanciação	77
4.2.6.6 Produção do modelo	78
4.2.6.7 Termomoldagem	79
4.2.6.8 Cápsulas modulares	80
4.2.6.9 Suporte em tela aramada	81
4.2.6.10 Preenchimento interior das cápsulas	82
4.2.6.11 Selamento das cápsulas	83
4.2.6.12 Mercado	84
4.2.6.13 Fixação	84
4.2.6.14 Descarte	84
5. AVALIAÇÃO DO ARTEFATO	84
5.1 Experimento - Desempenho térmico	84
5.2. Resultados - Desempenho térmico	88
5.3 Custo de produção	91
6. CONCLUSÕES	93
6.1 Generalização dos resultados	95
6.2 Comunicação dos resultados	96
6.2.1 Comunicações preliminares	96
6.2.2 Comunicações futuras	97
7. REFERÊNCIAS	98
8. ANEXOS	105
8.1 Relatório dados climáticos – Experimento de desempenho térmico	105

1. INTRODUÇÃO

O século XXI expressa um acelerado processo de subsequentes avanços tecnológicos e aumento na disponibilidade de equipamentos que incorporem essas inovações no mercado. Estas novas tecnologias provocam grandes alterações na sociedade de maneira geral, incluindo a arquitetura, alterando não só os modos como os projetos são desenvolvidos, mas também os processos de fabricação, construção de elementos arquitetônicos e até mesmo de edificações completas.

Os sistemas utilizados para realizar o *design* e manufatura desses artefatos são conhecidos pelos termos CAD/CAM (do inglês, *computer-aided design / computer-aided manufacturing*) e possuem como um dos resultados, sua difusão massiva na arquitetura pela possibilidade de geração de texturas e padronagens com uma facilidade sem precedente (PICON, 2013). A partir do uso de computadores, geometrias complexas tornam-se possíveis e equipamentos com controle numérico computacional (CNC) como impressoras 3D, cortadoras a laser, fresadoras e tornos simplificam a fabricação de complicados objetos, com a possibilidade de serem usados como elementos ornamentais, influenciando um retorno de seu uso na arquitetura contemporânea.

Outra significativa expressão da contemporaneidade é a acentuada preocupação sobre a relação do ser humano com o meio ambiente e, conseqüentemente, com sua sobrevivência no planeta Terra. Como resultado da intensa e desordenada utilização dos recursos naturais disponíveis, verifica-se um progressivo aumento na quantidade de resíduos gerados pela população. Segundo relatório publicado no ano de 2010 do Programa da ONU (Organização das Nações Unidas) para o Meio ambiente - PNUMA, cerca de 1,3 bilhões de toneladas de resíduos são gerados por ano no mundo com um crescimento previsto para 2,2 bilhões de toneladas em 2025.

A busca pelo equilíbrio na relação da humanidade com o meio em que está inserida ao longo do tempo pode ser entendida como sustentabilidade e envolve a habilidade de suprir suas necessidades atuais sem comprometer as gerações futuras de também as suprirem (ONU, 1987). Desta forma, um importante aspecto da sustentabilidade com relação ao meio ambiente é a reutilização de

materiais para conservação da matéria prima e energia empregada em sua produção, precedendo o sistema de reciclagem por evitar o reprocessamento, poupando gastos econômicos e energéticos, além de reduzir seu impacto ambiental.

Enquanto o Brasil recicla cerca de 13% do resíduo produzido (ABRELPE, 2017), quatro dos cinco maiores recicladores do mundo localizam-se na Europa e três pertencem à União Europeia, instituição em que as estratégias de sustentabilidade são frequentemente discutidas e atualizadas (FÓRUM ECONÔMICO MUNDIAL, 2017). Segundo Relatório da Agência Europeia do Meio Ambiente (2013), a taxa de reciclagem dos países europeus cresceu 21% entre os anos de 2001 e 2010 onde cerca de 35% do resíduo gerado é reutilizado ou reciclado e alguns países, como Alemanha e Áustria, já alcançam índices maiores que 50% e geram um rendimento de 1% do PIB do bloco econômico.

No Brasil, os principais agentes ligados a este processo são as cooperativas de reciclagem que realizam a coleta seletiva dos materiais descartados e os encaminham para retornar ao ciclo produtivo. Entre esses dois processos, há a oportunidade de intervenção dos próprios agentes de cooperativas sobre a reutilização dos resíduos sólidos urbanos com a possibilidade de gerar uma fonte alternativa de renda. Pelo empoderamento desses trabalhadores, pode-se tentar erradicar a marginalização e coibir o estigma do reuso de materiais descartados.

Os produtos fabricados com materiais reutilizados ou reciclados, geralmente, são caracterizados pela sociedade como artesanais, de baixa qualidade e frágeis. Dessa forma, há necessidade de incorporação de diversas funções e qualidades a esses artefatos para que a população se sinta atraída pela sua utilização. Com relação à arquitetura, dois importantes valores que podem ser agregados são a estética e o desempenho ambiental. Enquanto a utilização de *Phase Change Materials* (PCM) como sistema passivo de controle de temperaturas internas pode melhorar o desempenho térmico das edificações, a incorporação de qualidades estéticas torna os elementos arquitetônicos de acabamento mais agradáveis e pode-se agregar valor ao trabalho dos cooperados.

Aproximando a sustentabilidade de um sistema abrangente de pensamento, envolvendo consciência, meio ambiente, economia e sociedade, a pesquisa procura novas possibilidades de aplicação da alta tecnologia no conceito

da economia circular. Para isso, o destino de um material deixa de ser uma questão de gerenciamento de resíduos para ser parte do processo de *design* de produtos e sistemas. Dessa forma, pretende-se rediscutir o próprio conceito de resíduo em que cada material é aproveitado em fluxos cíclicos (MCDONOUGH, W; BRAUNGART, M.; 2002).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Desenvolver um artefato utilizando sistemas CAD/CAM em materiais plásticos descartados a fim de reintroduzi-los na cadeia produtiva sob a forma de elementos arquitetônicos de acabamento, tendo em vista o aumento da vida útil dos materiais empregados e a contribuição no desempenho térmico das edificações pelo controle passivo de temperaturas internas.

2.2 Objetivos específicos

- Analisar as possibilidades de combinação de alta tecnologia com materiais descartados por meio de uma metodologia de pesquisa que envolva a criação de artefatos por cooperativas de catadores;
- Verificar as possibilidades de reutilização de materiais com o uso de equipamentos CNC;
- Desenvolver elementos arquitetônicos de acabamento utilizando sistemas CAD/CAM para conferir funções estéticas a partir da reutilização de materiais, transformados pelo uso de equipamentos CNC.
- Combinar esses elementos a *Phase Change Materials* - PCM para conferir-lhes uma funcionalidade extra, ligado ao desempenho energético dos edifícios, por meio do controle passivo de temperatura.
- Testar fisicamente os elementos criados do ponto de vista de sua eficiência como material regulador da temperatura interna dos edifícios.
- Avaliar a viabilidade econômica da produção desses elementos, por meio de cálculos de custo e tempo de produção, comparando-os com o custo de

materiais semelhantes disponíveis no mercado.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O levantamento de informações como base de conhecimento para o desenvolvimento do trabalho configura a alta tecnologia dos sistemas CAD/CAM e equipamentos CNC como proposição central orbitando em três grandes temas envolvidos: a reinterpretação do ornamento na arquitetura contemporânea, a sustentabilidade socioambiental, principalmente relacionada a resíduos sólidos urbanos e o desempenho térmico por meio do controle passivo de temperaturas internas.

Figura 1: Conceitos chave para a pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor

3.1 Sistemas CAD/CAM e Arquitetura *high-low*

Nas últimas décadas, os avanços tecnológicos e o aumento da disponibilidade de equipamentos no mercado têm impactado o campo da arquitetura e da construção civil, abrindo novas oportunidades para a prática e para a produção arquitetônica. O Brasil já apresenta um significativo parque de equipamentos CNC em que o custo e a disponibilidade dos equipamentos não podem mais ser considerados fatores limitantes para a incorporação dessas técnicas nos processos de projeto e construção de edificações (SILVA *et al.*, 2009). Para Kolarevic (2003),

essas tecnologias desafiam não só a prática projetual, mas também o modo como os edifícios estão sendo fabricados e construídos.

Os processos de fabricação digital são notados com maior frequência na indústria de engenharia mecânica e *design* de produto. Enquanto isso, a assimilação no campo da arquitetura e construção ainda se mostra incipiente (CELANI; PUPO, 2008). Apesar disso, seu impacto pode ser medido pela presença de um número crescente de grupos de pesquisa e escritórios de arquitetura que buscam aprofundar os conhecimentos na técnica e transpor seu uso para o exercício da profissão (BARBOSA NETO, 2013).

Consonante a essas iniciativas, surgiram nos últimos anos, espaços abertos à comunidade equipados com ferramentas eletrônicas, softwares e equipamentos CNC: os chamados Fab Labs (*fabrication laboratory*) vinculados à rede de laboratórios de fabricação digital do Massachusetts *Institute of Technology* (MIT) que se estende por mais de 100 países com mais de 1.200 laboratórios pelo mundo e os *Makerspaces* com uma definição mais aberta de ambientes colaborativos para explorar e compartilhar o uso de ferramentas e equipamentos, inclusive computacionais e de alta tecnologia.

Segundo Save de Beaurecueil e Lee (2015), o conceito *high-tech*, ou alta tecnologia, em *design*, é definido como toda a geração de forma ou componente arquitetônico alcançada com o uso de ferramentas computacionais e com a fabricação digital, enquanto a *low-tech*, ou baixa tecnologia, caracteriza uma produção arquitetônica com base em processos locais manuais, não industrializados ou com uma tecnologia muito simples, e muitas vezes com o reuso de materiais. Dessa forma, os autores consideram que o conceito *high-low tech* na arquitetura estimula o reaproveitamento de materiais e componentes existentes na geração de formas arquitetônicas originais, além de servirem à fabricação digital de modelos e componentes construtivos propriamente ditos.

Ainda para os autores Save de Beaurecueil e Lee (2015, p.315):

A prática da arquitetura generativa *high-low tech* foi associada ao conceito denominado em inglês de *repurpose*, com o sentido de repropor o uso de materiais no lugar de reciclar, com o intuito de separar o uso de materiais existentes das conotações negativas a que são associados, às práticas de

reciclagem, em alguns casos. Esse conceito, portanto, enfatiza a ação de repensar o propósito de um objeto, nesse caso, o material ou um componente construtivo. Dessa forma, a exploração de materiais e componentes existentes tem o objetivo de criar soluções arquitetônicas culturalmente relevantes, indo além da abordagem ambiental de fechamento do ciclo de vida de um componente com técnicas de reuso e reciclagem.

A partir da compreensão do conceito de *high-low tech* na arquitetura, buscou-se referências práticas já desenvolvidas. A mais antiga delas pode ser observada nas cabanas de ossos de mamutes construídas por caçadores do período Paleolítico, entre 16.000 e 10.000 a.C. As cabanas serviam de habitação, possuíam em torno de 6 metros de diâmetro e eram formadas pelo intertravamento dos ossos de mamute (BAERLECKEN, D.; DUNCAN, D., 2011). Nos tempos atuais, os exemplos mais icônicos podem ser verificados em:

[...] a cobertura de latas de óleo recicladas do projeto *Jugaad*, de Sanjeev Shankar, em Nova Délhi; a cobertura *Repurposed Political Ply*, de Jason Griffiths, que é uma cobertura feita de posters eleitorais para *Arizona State University*, em Tempe, Arizona; e o *Recycled Toy Furniture*, de Greg Lynn, em Los Angeles, Califórnia, que utiliza brinquedos antigos na composição de componentes construtivos. (SAVE DE BEAURECUEIL, A.; LEE, F., pag.315, 2015)

3.1.1 *Repurposed political ply* – Arizona St. University – Jason Griffiths (2011)

A proposta de uma cobertura efêmera parte da reutilização de cartazes de campanhas políticas. A estrutura geodésica celular explora as propriedades físicas das placas que são adaptadas para formar unidades celulares individuais, utilizando técnicas de laminação (“fibras” cruzadas e conexões mecânicas em pontos de tensão) e manipulação de superfície.

Os componentes projetados em 3D como um domo celular hexagonal utilizam as placas duplas de plástico e foram construídos a partir de tiras contínuas planificadas por meio de um modelo produzido no *software Rhinoceros*. Cada tira pode ser dobrada em uma célula rígida e reforçada com um painel de enchimento contendo um orifício no centro para reduzir a pesagem e melhorar a rigidez

estrutural. O *plugin RhinoNest* também foi utilizado para otimizar a utilização das placas e reduzir o desperdício. A estrutura de suporte foi fabricada em madeira laminada com corte em equipamento CNC e conexões metálicas padrão.

Figura 2: Cobertura proposta reutilizando placas de campanhas política



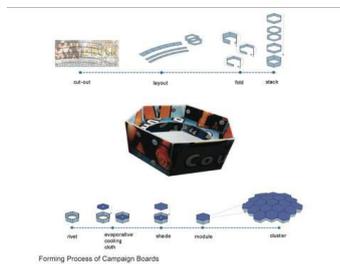
Fonte: GRIFFITHS, 2011

Figura 3: Detalhe da cobertura proposta



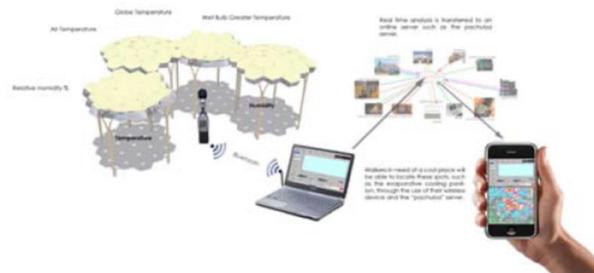
Fonte: GRIFFITHS, 2011

Figura 4: Detalhe das células componentes da cobertura



Fonte: GRIFFITHS, 2011

Figura 5: Análise de conforto térmico pela cobertura



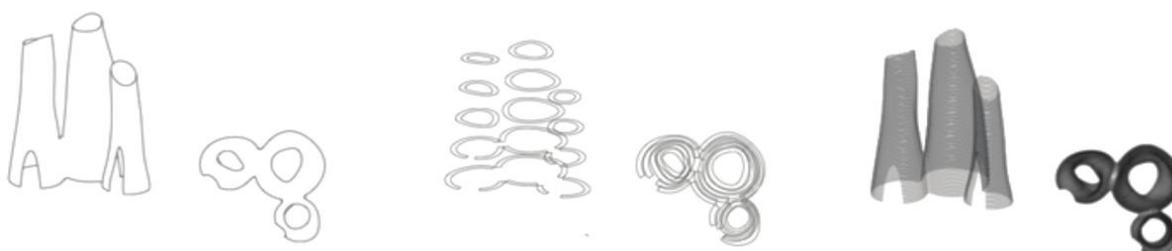
Fonte: GRIFFITHS, 2011

3.1.2 Junk: Design Build Studio – Georgia Inst. of Technology (2011)

Em janeiro de 2011, a *ETH Zürich* propôs uma competição para a Aliança Global de Universidades Tecnológicas em que os alunos deveriam construir uma torre usando apenas materiais locais, seu conhecimento e suas mãos como símbolo de seu país, região ou universidade. O grupo de alunos do Instituto de Tecnologia da Georgia resolveu explicitar visualmente a quantidade de desperdício gerado pela comunidade universitária desenvolvendo uma instalação utilizando a estimativa de garrafas plásticas descartadas no período de uma semana, ou seja, 19.000 unidades.

A torre de garrafas plásticas foi projetada em *software* utilizando curvas *Nurbs* e construída por meio do empilhamento das peças e fixação por cintas elásticas. A cada 25 fileiras de garrafas foram instalados anéis plásticos cortados em segmentos por uma fresadora CNC com o perfil da torre naquela instância, trabalhando como travamento e modelo para encaixe. Um *script* de *Visual Basic* também foi utilizado para estimar o número de garrafas necessárias a partir da geometria *Nurb*.

Figura 6: Matriz de fabricação com anéis cortados em fresadora CNC



Fonte: BAERLECKEN, D.; DUNCAN, D. (2011)

Figura 7: Vista interna da torre central



Fonte: BAERLECKEN; DUNCAN, 2011

Figura 8: Vista da conexão entre as torres



Fonte: BAERLECKEN; DUNCAN, 2011

As iniciativas apresentadas mostram um panorama reduzido da utilização de ferramentas computacionais e equipamentos CNC em soluções de *design* e arquitetura incentivadas principalmente por atividades acadêmicas que constituíram

a base de dados para o desenvolvimento da pesquisa em que este cenário foi ampliado e novas possibilidades de reuso de materiais foram propostas.

3.2 O ornamento na arquitetura contemporânea

O uso de computadores torna possível a proposição de geometrias complexas e os equipamentos CNC simplificam a fabricação de complicados elementos ornamentais, ocasionando o retorno de seu uso na arquitetura contemporânea de diversas formas. Segundo Jones (2001), o ornamento tem sido um elemento do projeto arquitetônico desde os tempos pré-históricos e seus conceitos de padrões decorativos foram regularmente inspirados pelas formas naturais e aplicados na arquitetura para mostrar o domínio do homem sobre a natureza. O estudo de Jones (2001), publicado pela primeira vez em 1856, foi e continua sendo um dos principais inventários da arte ornamental ao longo da história e dos diversos povos que os desenvolveram.

Ao longo dos capítulos de seu livro, Jones (2001) se esforça para estabelecer os seguintes fatos:

Primeiro. Sempre que um estilo de ornamento alcança a admiração universal, se verificará um acordo com as leis que regulam a distribuição da forma na natureza.

Segundo. De qualquer modo que variaram as manifestações de acordo com essas leis, as principais ideias sobre as quais elas são baseadas, são muito poucas.

Terceiro. As modificações e desenvolvimentos que tomaram lugar de um estilo para outro foram causadas por repentinas libertações de uma estrutura fixa, até que a nova ideia, como a velha, voltou a ser fixa para dar à luz, por sua vez, a novas invenções.

Finalmente. ... o futuro progresso da Arte Ornamental pode ser melhor assegurado implantando o conhecimento que apreendemos pelo retorno à Natureza para novas inspirações. ... devemos considerar como nossa herança todos os trabalhos de sucesso do passado, não seguindo-os cegamente, mas empregando-os simplesmente como guias para encontrar o verdadeiro caminho.

No começo do século XX, devido ao processo de industrialização e sua influência nas mudanças culturais, o ornamento perdeu muito valor, principalmente na arquitetura. De acordo com Loveridge e Strehlke (2006), a ênfase do movimento

moderno na forma sem adornos, combinada com o estabelecimento do *international style* e a substituição do trabalho a mão pela produção em massa, ocasionou uma sistemática eliminação do ornamento na arquitetura. Além disso, a habilidade para criar uma arquitetura expressiva, com personalidade, foi mais limitada por fatores econômicos que pelo *design* ou estilo arquitetônico.

Ainda para Loveridge e Strehlke (2006), a redução do ornamento na arquitetura pode ser diretamente atribuída à intensificação do uso de máquinas nos processos de fabricação. Paradoxalmente, o retorno ao ornamento pode ser possível exatamente pelo uso de tecnologias CAD/CAM. Promover uma aproximação racional e criativa entre arquitetura e ornamento requer uma combinação de novos conceitos de *design* e novas tecnologias com aceitação e reconhecimento do sucesso da arquitetura clássica com o público em geral. Diferentes processos têm sido desenvolvidos para criar componentes usando diferentes tipos de fontes de informações e entrada de dados, de qualquer modo, o método de trabalho foca sempre no ciclo completo de produção, da geração da geometria digital até a fabricação. A vantagem de usar sistemas CAD/CAM é a eficiência de gerar e fabricar variações como resultado.

O ornamento na arquitetura contemporânea ganha um novo significado e permite uma nova percepção pelos arquitetos por meio da aplicação desses novos métodos e tecnologias no processo de projeto. Picon (2013) descreve a relação entre ornamento e tecnologia:

O difundido retorno do ornamento que pode ser observado hoje é inseparável da difusão massiva do computador na profissão arquitetônica que teve início no meio dos anos 90. (...) Isso permitiu gerar texturas e padrões com uma facilidade não conhecida previamente. Geometrias complexas se tornaram acessíveis para qualquer um que sabe como usar um computador. A este respeito, impressoras 3D, cortadoras a laser, fresadoras e tornos tem simplificado a realização de complicados elementos ornamentais.

Ainda para Picon (2013), sob a influência de uma série de fatores variando do espetacular desenvolvimento das ciências dos materiais à ascensão dos computadores e suas possibilidades para oferecer visualização e operação em vários níveis, da escala macroscópica a nanoscópica, nosso entendimento sobre a materialidade tem evoluído rapidamente. O ornamento arquitetônico contemporâneo

é inseparável desse movimento geral e seu apelo deve algo ao desejo de experimentar em um campo que mais e mais se mostra como uma nova fronteira ao *design* e fabricação.

A evolução da materialidade causa impacto sobre uma preocupação maior com as superfícies arquitetônicas do que com sua estrutura. Picon (2010) diz que o surgimento da cultura digital na arquitetura foi acompanhado de um enfraquecimento da abordagem tectônica e de um aumento da importância ligada à superfície. Com respeito à tecnologia, a frente de batalha se modificou em direção à periferia do edifício com os novos requerimentos energéticos e ambientais implicados pela sustentabilidade.

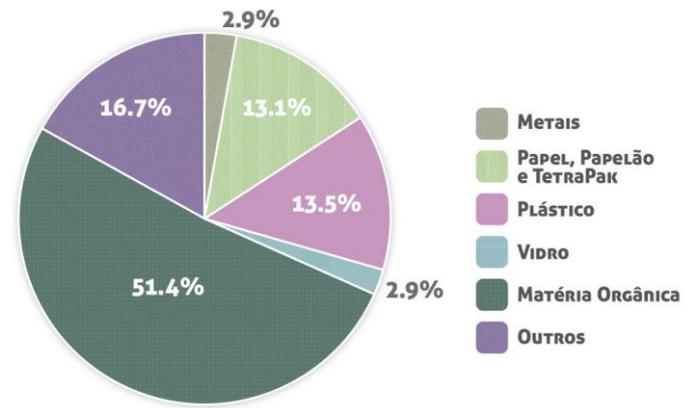
Ao explorar esses novos limites e seguir o pensamento de Loveridge e Strehlke (2006) de que a customização em massa e personalização na arquitetura podem atingir a grande escala, mas pode ser mais efetivo desenvolver inicialmente uma escala menor, esta pesquisa desenvolveu elementos arquitetônicos de acabamento sem limitar-se a fatores estilísticos de ornamentos na arquitetura. Ao contrário da falta de personalidade da arquitetura moderna, desenvolveu-se o ornamento contemporâneo que Picon (2013) considera como uma aproximação altamente pessoal com o mundo, chegando a compará-lo com o uso de tatuagens e piercings, que embora atualmente sejam uma característica de massa, objetivam afirmar a identidade e visão única de cada um.

3.3 Sustentabilidade socioambiental

3.3.1 Panorama de resíduos sólidos no Brasil

O relatório elaborado pela Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2017), afirma que são coletadas 214,8 mil toneladas de resíduos sólidos por dia em 91,2% do total de domicílios no país. Complementando a informação, a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia Estatística (IBGE, 2008), indica que 32,4% do total de resíduos gerado pela população é composto de material reciclável.

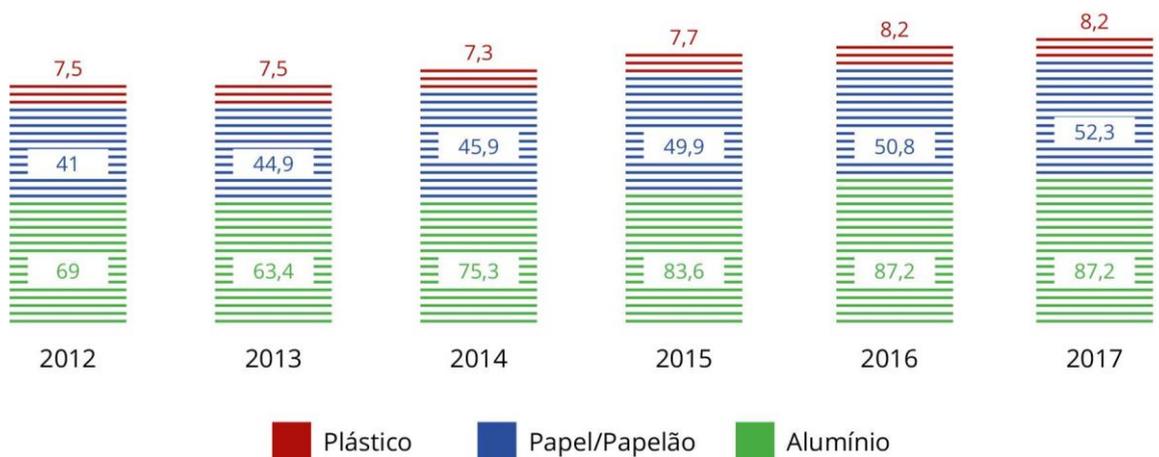
Figura 9: Estimativa da composição dos resíduos sólidos coletados no Brasil



Fonte: ABRELPE (2015)

O potencial de reaproveitamento desses materiais não chega a ser muito explorado pelos 70,4% de municípios brasileiros que possuem alguma iniciativa de coleta seletiva pois ainda há baixos índices de recuperação de materiais. Apesar disso, o Brasil possui certo destaque na indústria da reciclagem em alguns setores como o de alumínio, apresentando índice de 95% para recuperação deste material.

Figura 10: Índice de recuperação dos resíduos recicláveis 2012-2017 (%)



Fonte: ABRELPE (2017)

3.3.2 O plástico como resíduo sólido descartado

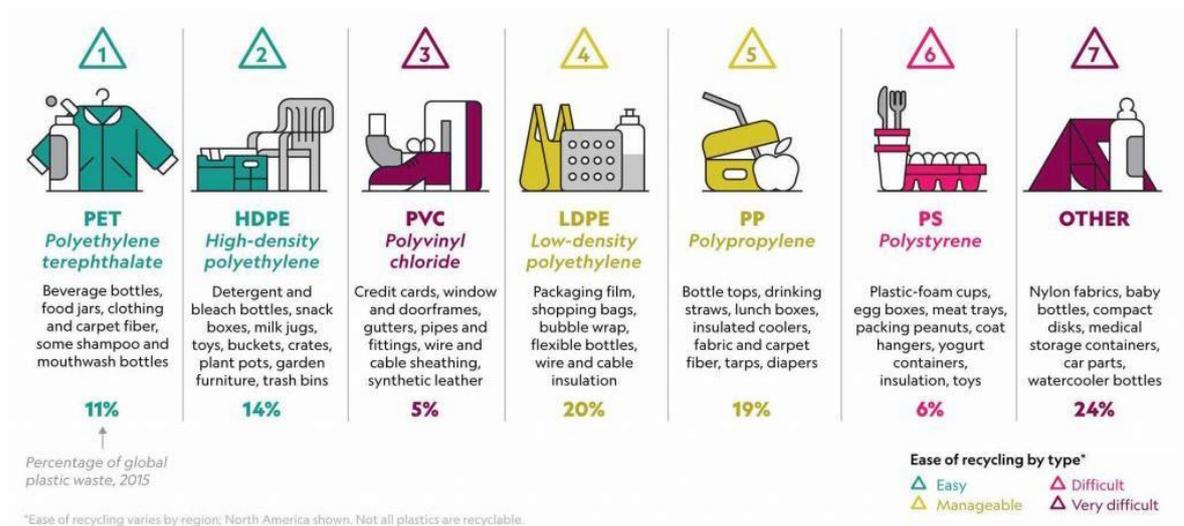
Pela grande quantidade de material descartado na composição total de resíduos sólidos e baixo nível de reaproveitamento, esta pesquisa buscou aprofundar o conhecimento sobre os materiais orgânicos poliméricos sintéticos.

Até os anos 90, os resíduos plásticos eram um mistério investigado por comunidades científicas. Segundo Parker (2018), os cientistas interrogavam-se por que razão não existia ainda mais plásticos no mar pela produção mundial deste material aumentar exponencialmente, de 2,1 milhões de toneladas em 1950, 147 milhões em 1993 e 407 milhões em 2015. No início dos anos 2000, pesquisadores descobriram que o plástico desaparecido estava se partindo em pedaços tão pequenos que não eram visíveis a olho nu e receberam o termo de microplásticos.

Segundo relatório da *International Solid Waste Association* (ISWA, 2009), estima-se que entre 4,8 e 12,7 milhões de toneladas de resíduos de plástico foram lançados no meio marinho a partir de populações costeiras em 2010. Mais 1,2 a 2,4 milhões de toneladas de plástico são estimadas a atingir os oceanos a partir de fontes localizadas no interior de rios. O impacto ambiental deste resíduo é enorme sobre a vida marinha chegando às impressionantes imagens da quantidade de plástico retirada do estômago de aves ou tartarugas mortas. Além disso, o retorno desses microplásticos no organismo humano começa a ser investigado pela alimentação de peixes e frutos do mar “contaminados” e seus possíveis efeitos na saúde.

Dados apresentados por Parker (2018) de relatórios conjuntos entre *ASTM International*, *Association of plastic recyclers* e o pesquisador da Universidade da Califórnia, Roland Geyer, apontam que cerca de 18% do plástico é reciclado atualmente em nível global. Dentre os tipos de plásticos, destacam a quantidade e nível de facilidade de reciclagem com base na América do Norte:

Figura 11: Nível de dificuldade na reciclagem de resíduos plásticos



Fonte: *National Geographic* (2018)

3.3.3 Política Nacional de Resíduos Sólidos

A Lei nº 12.305/2010 institui, de fato, um novo marco regulatório para os resíduos sólidos, tendo como diretriz principal o ordenamento das prioridades para gestão de resíduos: a não geração, a redução, a reciclagem, o tratamento dos resíduos sólidos e a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Nela são consideradas as variáveis ambiental, social, cultural, econômica, tecnológica e de saúde pública, bem como a promoção do desenvolvimento sustentável e da ecoeficiência (SOUSA, 2012). Entre pontos mais relevantes da Lei, pode-se ressaltar alguns objetivos:

- Não geração, redução, reutilização, tratamento e disposição final adequada dos resíduos sólidos;
- Intensificação de ações da educação ambiental;
- Objetivo de desenvolver a indústria da reciclagem no país;
- Incentivo à criação ou desenvolvimento de cooperativas de reciclagem;
- Gestão integrada dos resíduos sólidos.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) também prevê a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e a logística reversa que responsabiliza não só os fabricantes, mas todos os outros agentes envolvidos como importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores e o poder público em sua gestão. É uma iniciativa de envolver toda a sociedade para repensar suas atitudes com mais responsabilidade. Além disso, a PNRS incentiva o tratamento e recuperação dos resíduos sólidos por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis antes de sua disposição final, objetivos da presente pesquisa.

3.3.4 O conceito de *upcycling*

Conforme disposto na Política Nacional de Resíduos Sólidos, os resíduos gerados pela população possuem diversos destinos possíveis, os principais são: aterramento, incineração, reúso e reciclagem. Esta pesquisa se concentra na reutilização dos materiais descartados, não abordando os tratamentos de resíduos em aterros ou incineradoras.

O reúso de materiais está ligado à sua reutilização na mesma forma em que foi produzido, como exemplo, uma garrafa plástica de água que pode ser preenchida novamente para consumo até que essa função lhe seja permitida por condições sanitárias. Já a segregação pode ser definida como a separação de resíduos com a finalidade de trazê-los de volta à indústria para serem beneficiados (MONTEIRO, 2001) ou, de modo mais específico, o processo em que resíduos descartados são recolhidos, processados e reutilizados (O'LEARY *et al.*, 1999).

A ciclagem de resíduos abrange três conceitos de acordo com as características finais do produto resultante: *recycling*, *downcycling* e *upcycling*. O termo reciclagem é mais comumente usado para se referir aos processos de *recycling* e *downcycling* onde, no primeiro caso, os materiais mantêm suas características físico químicas depois de processadas ou, no segundo caso, perdem qualidade quando submetidas ao reprocessamento. McDonough e Braungart (2002) reafirmaram o termo usado pelo ambientalista e empresário alemão, Reine Pilz, *upcycling*, para designar o objetivo de evitar o desperdício de materiais potencialmente úteis, reduzindo o consumo de matérias-primas novas durante a

criação de novos produtos, bem como o consumo de energia, a poluição do ar e da água e as emissões de gases de efeito estufa, resultantes dos processos industriais da reciclagem. Isto torna a prática ainda mais positiva, do ponto de vista ecológico, do que a própria reciclagem.

Conforme relata Pereira (2017), a palavra *upcycle* ou *upcycling* foi adicionada recentemente aos dicionários. O Oxford *Dictionaries* descreve “*upcycle*” como “reúso (de materiais ou objetos descartados) de um modo que o produto criado tenha maior qualidade ou valor que o original”, mas definições mais superficiais também existem como “atividade de fazer novo mobiliário, objetos etc. a partir de coisas velhas, usadas ou materiais descartados” (*Cambridge Dictionary*, 2016).

Moreira *et al.* (2018) organizam os conceitos em um quadro resumo, abaixo apresentado:

Tabela 1: Conceitos de *recycling*, *downcycling* e *upcycling*

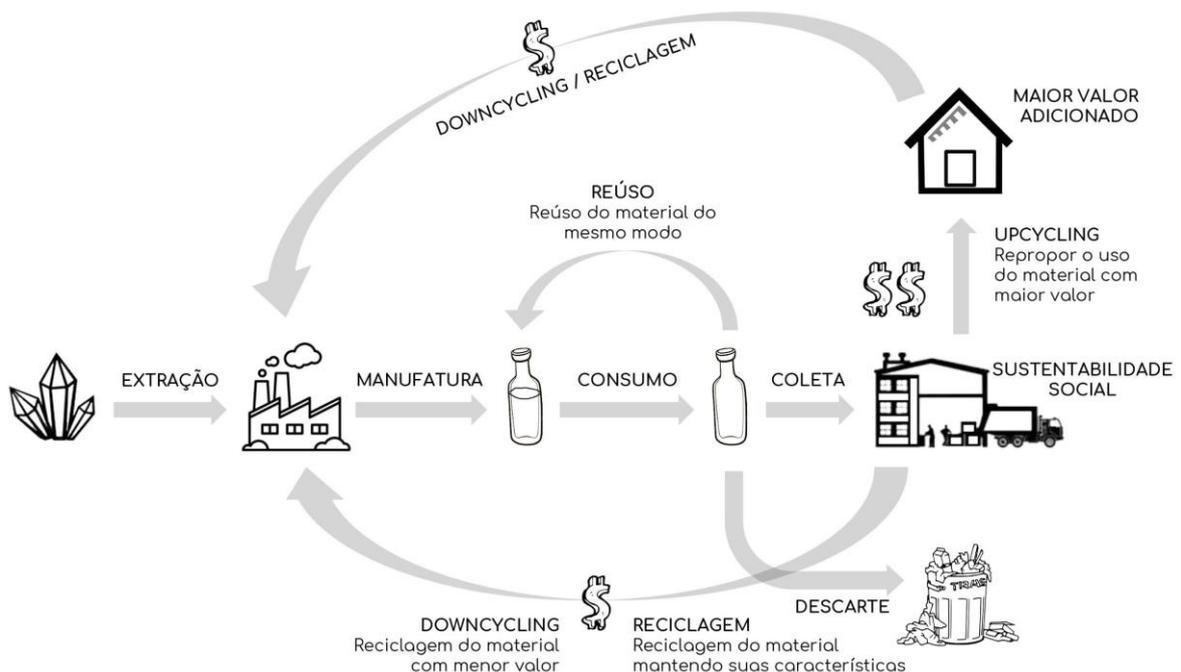
	Recycling	Downcycling	Upcycling
Conceito	Recuperação de um material ou produto para que possa ser reutilizado em um outro produto sem perder as suas características técnicas. O material é recuperado e se torna matéria prima para o mesmo produto do qual era feito originalmente (HARLOS, 2011)	É o processo de recuperação de um material para reuso em um produto com menor valor, ou seja, a integridade do material é de certa forma comprometida com o processo de recuperação. a reciclagem tradicional é geralmente descrita como downcycling (McFEDRIES, 2008) .	significa o reaproveitamento de um material já utilizado ou o resíduo de um produto da maneira com que foi encontrado, sem que seja realizada a reciclagem (McDONOUGH e BRAUNGART, 2002).
Símbolo			
Exemplos de Resíduos e Resultados de Produtos Ecológicos			

Fonte: Moreira *et al.* (2018)

Pereira (2017) diz que o *upcycling* é uma atividade de experimentação que requer um conhecimento substantivo envolvendo a criatividade, o repertório e a capacidade de visualização espacial. A computação permite todas essas atividades melhorando seu valor, minimizando erros e falhas durante o processo. A autora ainda define a principal diferença entre o *design* para o *upcycling* e o *design* tradicional como a necessidade, não convencional, de que a informação sobre o material seja apreendida antes do início do processo. Assim, uma fonte de informação apropriada se torna crucial para o *design* para o *upcycling*.

Apesar da crescente atenção ao tema, o *upcycling* permanecerá como prática marginal pelo menos no futuro previsível, enquanto os recursos para produzir novos produtos a partir da matéria-prima são baratos e prontamente disponíveis. Embora a literatura sobre processos e definições ainda seja crua e contraditória, a atividade tem sido incentivada como um meio de estender o ciclo de vida dos materiais. (PEREIRA, 2017)

Figura 12: Quadro resumo dos conceitos de Reciclagem, *Downcycling* e *Upcycling*



Fonte: Elaborado pelo autor

3.3.5 Sustentabilidade socioeconômica das cooperativas de reciclagem

Apesar da origem de organizações de catadores de resíduos em cooperativas nos anos 90 no Brasil, principalmente com auxílio de comunidades católicas, ainda são encontradas dificuldades para gestão eficaz destes empreendimentos coletivos, por exigir um pleno entendimento da estrutura de produção, dos deveres e direitos de cada um dos associados em seu funcionamento (BENVINDO, 2010). De acordo com estimativa do IPEA (2010), com base em relatos de gestores públicos e das próprias organizações de catadores, o percentual de trabalhadores ligados a cooperativas e associações nesse setor está em torno de apenas 10%.

O grande desafio para o desenvolvimento do cooperativismo se baseia na construção de canais de confiança e reciprocidade entre os participantes, exigindo um longo processo de aprendizagem e prática. De acordo com relatório do IPEA (2010), os integrantes das cooperativas são, de maneira geral, pessoas inseridas em jornadas informais de trabalho, com baixa escolaridade e convivem em um ambiente de múltiplas precariedades. Tais dificuldades levam os catadores a buscar soluções imediatas de resolução de suas carências individuais e familiares, e, conseqüentemente, não dispõem de tempo necessário para a consolidação de um empreendimento cooperativo.

As organizações que conseguem ultrapassar estas barreiras iniciais para a formação do empreendimento, muitas vezes com o apoio técnico e financeiro de entidades de fomento ou poder público, tendem a inserir-se de maneira mais vantajosa na cadeia de valor da reciclagem. Ao se organizarem, os catadores conseguem estabelecer relações de mercado diferenciadas, além de poderem inclusive avançar em alguns elos no âmbito da cadeia produtiva, com a agregação de valor ao material reciclável por meio de algum processo de beneficiamento. Além disso, o trabalho coletivo em cooperativas permite viabilizar o investimento em infraestrutura, como a construção de galpões e maquinários para melhorar as condições de trabalho, o que, individualmente, não seria possível (IPEA, 2013).

Dessa forma, esta pesquisa se concentrou em buscar meios para o beneficiamento de materiais descartados para ir além da possibilidade de gerar uma fonte alternativa de renda a esses trabalhadores, como também tentar capacitá-los

em novas tecnologias, aumentar sua responsabilidade ambiental e tentar estabelecer um meio de reconhecimento, valorização social e redução da marginalização dessa população.

3.4 Desempenho térmico em edificações

Segundo Borges (2008), o conceito de desempenho na construção civil está, há muitos anos, associado ao comportamento no uso de edificações, dentro de determinadas condições. O edifício é um produto que deve apresentar determinadas características que o capacite a cumprir objetivos e funções para os quais foi projetado, quando submetido a determinadas condições de exposição e uso. Assim, ele é considerado “bem-comportado” quando atende aos requisitos para o qual foi projetado.

Ainda para Borges (2008), do ponto de vista técnico, o conceito de desempenho não se aplica apenas a sistemas, mas também a elementos e componentes. O edifício é percebido como um grande sistema constituído de sistemas, elementos e componentes que interagem entre si, cada um com uma função determinada para a obtenção do desempenho global e de cada parte.

No Brasil, o conceito de desempenho começou a ser discutido na década de 70, quando houve um grande crescimento da economia e grandes investimentos na construção civil. Houve um estímulo à racionalização e industrialização da construção e o surgimento de novos sistemas construtivos como alternativa aos produtos e processos tradicionais. Os agentes envolvidos no setor perceberam que se tornava fundamental a criação de instrumentos para avaliar tecnicamente as soluções inovadoras com base em critérios que permitissem prever o comportamento das edificações durante sua vida útil esperada (BORGES, 2008). Dessa forma, surge a norma brasileira NBR 15220 que, segundo Giglio e Barbosa (2006), apresenta um método simplificado de avaliação do desempenho térmico de componentes construtivos consistindo em recomendações de limites para as propriedades térmicas de transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar, além da proposição de estratégias bioclimáticas variáveis conforme a zona da região em estudo.

3.4.1 Zoneamento bioclimático brasileiro e Campinas (SP)

O zoneamento bioclimático brasileiro constitui-se de oito zonas relativamente homogêneas, sobre as quais se propôs um conjunto de recomendações técnico-construtivas, objetivando aperfeiçoar o desempenho térmico das edificações, por meio de sua melhor adequação climática (ABNT, 2005). A região de estudo da pesquisa localiza-se na cidade de Campinas – São Paulo abrangido pela transição entre as zonas bioclimáticas 3 e 4. De acordo com a norma, as orientações para essas regiões são:

- Aberturas para ventilação: médias (3 e 4)
- Sombreamento das aberturas: permitir sol durante o inverno (3) e sombrear aberturas (4)
- Vedações externas:
 - Paredes: leves refletora (3) ou pesadas (4)
 - Cobertura: leve isolada (3 e 4)
- Estratégias de condicionamento térmico passivo:
 - Verão: ventilação cruzada (3); resfriamento evaporativo, massa térmica para resfriamento e ventilação seletiva nos períodos quentes em que a temperatura interna seja superior à externa (4)
 - Inverno: Aquecimento solar da edificação e vedações internas pesadas (inércia térmica) (3 e 4)

Além das estratégias estabelecidas em norma, o Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura (CEPAGRI, 2014), caracteriza o clima da cidade de Campinas como tropical de altitude (tipo *CWA* segundo Koppen), com invernos secos, amenos e verões chuvosos com temperaturas moderadamente altas. A temperatura média anual é de 20,7 °C variando a temperatura média de 23,4 °C no mês mais quente e 17,2 °C no mês mais frio. Segundo o Instituto Nacional de Meteorologia, a temperatura máxima recorde no período de 1961 a 1990 chegou a 37,7 °C, a mínima a 0,6 °C e o índice pluviométrico médio é de 1350 mm anuais, concentrados de outubro a março, sendo janeiro o mês de maior precipitação.

Considerando as características climáticas da região de Campinas, com temperaturas elevadas nas estações mais quentes e significativa amplitude térmica,

a pesquisa se concentra nas estratégias de condicionamento térmico passivo relativas aos conceitos de massa térmica e inércia térmica para incorporá-las ao desenvolvimento do artefato da atual pesquisa.

3.4.2 Controle térmico passivo

A partir da utilização de aparelhos mecânicos e elétricos para condicionar artificialmente os espaços por meio de aquecimento, arrefecimento, ventilação e iluminação, o entorno dos edifícios deixou de ser o principal moderador dos ambientes internos e os projetistas reduziram sua responsabilidade sobre a climatização natural e eficiência energética. Com a atual e crescente preocupação ambiental, há uma busca por alternativas que solucionem essa dependência por meio de estratégias passivas de climatização que melhorem o desempenho térmico das edificações.

Para Gonçalves e Graça (2004), os sistemas passivos se referem a dispositivos construtivos integrados nos edifícios, cujo objetivo é o de contribuir para o seu aquecimento ou arrefecimento natural. No caso do aquecimento (estação fria), estes sistemas pretendem maximizar a captação do sol no inverno, através de vãos envidraçados bem orientados e dimensionados, aos quais se podem associar elementos massivos, que permitirão o armazenamento da energia solar e sua utilização em horas posteriores. No caso do arrefecimento (estação quente), pretende-se tirar partido de fontes frias que permitirão resfriar o edifício como, por exemplo: o ar exterior, que em determinadas horas do dia apresenta uma temperatura inferior à temperatura interna, podendo pois ser muito efetiva a estratégia de ventilação nesses períodos, principalmente à noite e início da manhã.

3.4.3 Massa térmica

O conceito de massa térmica está relacionado à capacidade de absorção e retenção de energia térmica de um determinado material. Uma alvenaria de tijolo maciço é considerada como um componente construtivo de elevada massa térmica por absorver grande quantidade de calor para se aquecer, levando maior tempo para o aquecimento e arrefecimento. Enquanto uma alvenaria em madeira ganha e perde energia térmica de maneira mais rápida, sendo considerado um material de baixa massa térmica.

No ambiente construído, esse maior tempo de aquecimento e arrefecimento pode ser considerado como um efeito de inércia térmica frente a variações de temperatura, ou seja, ligado ao sentido da palavra inércia de manter-se na situação original. Gonçalves e Graça (2004), afirmam que a massa térmica desempenha um papel estabilizador das condições climáticas, atenuando a amplitude térmica de uma região no interior dos edifícios. Durante o período diurno, um material de elevada massa térmica absorve maior quantidade de calor resultante da incidência direta da radiação solar e, pela sua maior capacidade de retenção de energia térmica, devolve-o ao espaço durante o período noturno.

Segundo o LABEEE (2018), a utilização da inércia térmica em uma edificação proporcionará uma redução das amplitudes térmicas internas e um atraso térmico no fluxo de calor devido a sua alta capacidade de armazenar calor, fazendo com que o pico de temperatura interna apresente uma defasagem e um amortecimento em relação ao externo. Os componentes utilizados para a inércia térmica funcionam como uma espécie de bateria térmica: durante o verão absorvem o calor, mantendo a edificação confortável; no inverno, se bem orientado, podem armazenar o calor para liberá-lo à noite, ajudando a edificação a permanecer aquecida. Essa característica é particularmente benéfica em regiões de clima mais seco onde há uma grande diferença entre as temperaturas diurnas e noturnas externas (acima de 7°C).

Ainda para o LABEEE (2018), o uso da estratégia de inércia térmica no envelope só tem efeito se a ventilação natural através dos ambientes internos for restringida ao longo do dia, uma vez que com a ventilação a temperatura interna varia de acordo com o meio externo diretamente, sem o atraso térmico característico do fluxo de calor através das paredes e teto. A ventilação natural só é desejada nas estações quentes em determinados períodos do dia como início da manhã e final da noite para dispersar o calor liberado pelos materiais de elevada massa térmica.

É necessária grande quantidade de energia térmica para mudar a temperatura de elementos com alta densidade como concreto, tijolos e telhas. Apesar de serem considerados como elementos construtivos sustentáveis, materiais mais leves como a madeira possuem baixa massa térmica, mas podem se utilizar de dispositivos construtivos integrados para alcançar melhores condições de

desempenho térmico. Combinando duas estratégias térmicas, elementos de elevada massa térmica e ventilação natural em determinados períodos do dia, pode-se oferecer a oportunidade de melhor desempenho térmico para edificações em condições climáticas semelhantes a apresentada pela região de Campinas.

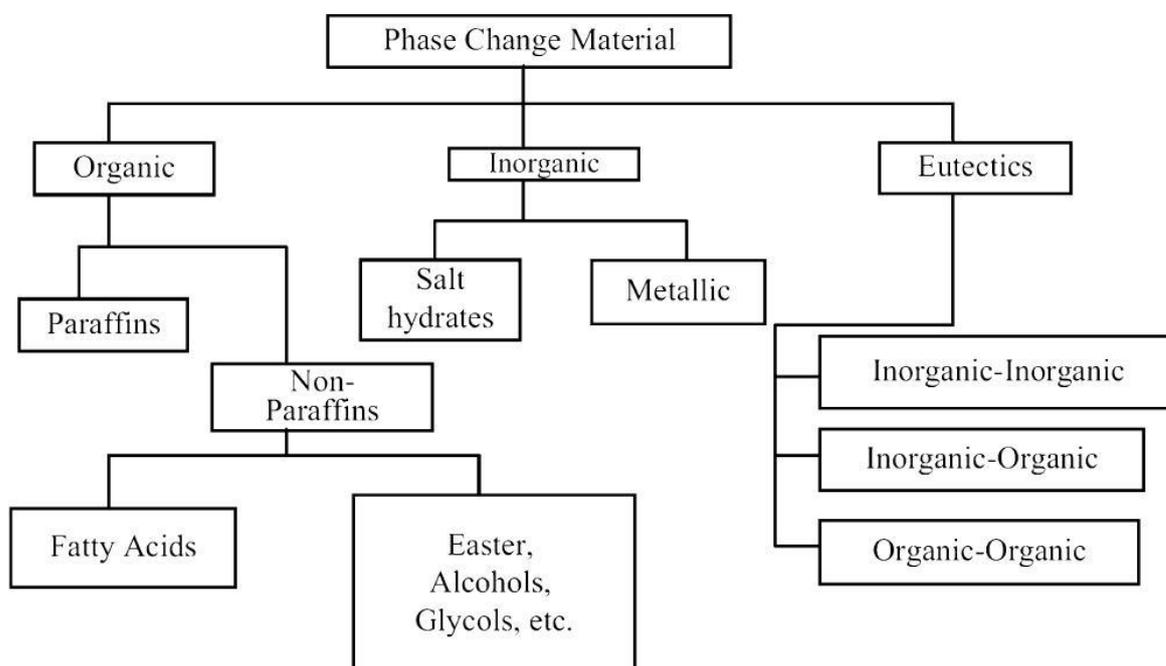
3.4.4 Phase Change Material

Um dos dispositivos que pode ser integrado para auxiliar o desempenho relacionado a massa térmica de elementos construtivos são os materiais de mudança de fase, melhor conhecidos em inglês: *Phase Change Materials* (PCM). A tecnologia promissora que recebeu atenção considerável ao longo da última década utiliza o princípio de armazenamento térmico por calor latente ou *latent heat thermal storage* (LHTS) para absorver energia em grandes quantidades quando há um excedente e liberá-la quando há um déficit. Para Kalnaes e Jelle (2015), o uso correto de PCMs pode reduzir o pico de aquecimento e reduzir o uso de energia gasto em equipamentos técnicos para aquecimento e resfriamento. Um benefício adicional é sua capacidade de manter o ambiente interno mais confortável devido a menores flutuações de temperatura.

Os PCMs utilizam o calor latente da mudança de fase para controlar as temperaturas dentro de uma faixa específica. Quando a temperatura sobe acima de um certo ponto, as ligações químicas no material começam a se romper e o material absorve o calor em um processo endotérmico, em que ele mudará do estado sólido para o líquido. Quando a temperatura cai, o material libera energia e retorna ao estado sólido. A energia usada para alterar a fase do material, uma vez que a temperatura da mudança de fase está em torno da temperatura ambiente desejada, levará a um clima interno mais estável e confortável, além de reduzir as cargas de resfriamento e aquecimento (Baetens *et al.*, 2010). Essa estabilidade é devida ao fato que, ao mudar de estado, os materiais absorvem ou dissipam energia sem alteração em sua temperatura.

Há vários materiais que podem ser utilizados como PCMs e podem ser distinguidos nas categorias: orgânicos, inorgânicos e eutéticos.

Figura 13: Tipos de PCM



Fonte: Rathod e Banerjee (2013)

Os PCMs orgânicos são divididos em parafinas e não-parafinas. As parafinas apresentam uma ampla faixa de temperatura, permitindo o uso em várias áreas, incluindo aplicações relacionadas à construção. Segundo Sharma *et al.* (2009), as parafinas apresentam algumas desvantagens como baixa condutividade térmica, não são compatíveis com contentores plásticos e são moderadamente inflamáveis. As não-parafinas incluem ácidos graxos, ésteres de ácidos graxos, álcoois e glicóis. Alguns óleos vegetais com alto ponto de fusão como o óleo de coco, composto por cerca de 90% de ácidos graxos, começaram a ser estudados para uso como PCM no auxílio ao desempenho térmico de edificações. Apesar de algumas desvantagens, os PCMs orgânicos são indicados para o meio ambiente construído com atenção, principalmente, sobre a inflamabilidade.

Os PCMs inorgânicos consistem em sais hidratados e metálicos. Não possuem aplicações na construção por não possuírem uma faixa de temperatura desejada para o conforto térmico e peso elevado.

Os PCMs eutéticos são compostos da fusão de, no mínimo, dois componentes que derretem e congelam ao mesmo tempo, agindo como um único elemento. As misturas podem ser de compostos orgânicos e inorgânicos, resultando em três tipos: orgânico-orgânico, orgânico-inorgânico e inorgânico-inorgânico. Os benefícios das misturas eutéticas são a capacidade de obter mais propriedades desejáveis como um ponto de fusão específico e/ou uma maior capacidade de armazenamento de calor por unidade de volume.

3.4.3.1 Encapsulamento

Com relação ao encapsulamento, o material envolvente não pode reagir com o PCM ou deteriorar-se ao longo do tempo. Dessa forma, dois modos principais são usados para encapsular PCMs: microencapsulamento e macroencapsulamento. Os dois métodos resultam em vários tamanhos e formas como os PCMs podem ser incorporados em um elemento construtivo.

Segundo Hawlader *et al.* (2003), o microencapsulamento envolve os PCMs em cápsulas que variam de menos de um micrômetro até cerca de 300 micrômetros. O produto final consiste em um invólucro exterior com o PCM no centro. As vantagens da microencapsulação incluem uma maior superfície de troca de calor, proporcionando uma maior transferência de calor, menor reatividade com os materiais adjacentes e o volume da PCM pode se expandir sem afetar a estrutura em torno dela. Devido ao pequeno tamanho dos PCMs microencapsulados, eles podem ser produzidos na forma de pó ou dispersos em um líquido e não precisam de proteção adicional contra a destruição (TYAGI, 2011).

Figura 14: PCM microencapsulado em líquido e pó



Fonte: Kalnaes e Jelle (2015)

O macroencapsulamento refere-se a PCMs encapsulados em qualquer tipo de recipiente, como tubos, esferas ou painéis que podem ser incorporados em elementos construtivos ou servir como trocadores de calor por si mesmos. Como muitos PCMs têm uma baixa condutividade térmica, uma desvantagem do macroencapsulamento é a tendência de solidificar ou derreter nas bordas, levando a uma absorção e liberação de energia mais lenta, o que pode impedir que o sistema mude de estado completamente. O tamanho das macrocápsulas implica que elas devem ser protegidas contra a destruição ou perfuração e também pode torná-las mais difíceis de integrar-se à estrutura do edifício, o que pode tornar esses sistemas mais caros (SCHOSSIG *et al.*, 2005).

Figura 15: Exemplos de PCM macroencapsulados



Fonte: Kalnaes e Jelle (2015)

3.4.3.5 Estabilidade de longa duração

Para uma aplicação bem-sucedida em larga escala de PCMs no setor da construção, é crucial que o sistema de contentores e os próprios PCMs possam suportar seus ciclos de funcionamento durante um longo período sem mostrar sinais de degradação. Existem dois fatores principais que podem desafiar esta estabilidade: a baixa estabilidade dos PCMs, ou seja, resfriamento excessivo e segregação de fases; e a corrosão entre o PCM e o sistema de contenção ((MEHLING *et al.* (2007), SHUKLA *et al.* (2008)).

Segundo Sari e Kaygusuz (2003), os ácidos esteáricos e ceras de parafina tiveram bom desempenho e não mostraram degradação regular do seu ponto de fusão ao longo de 1500 ciclos térmicos. No entanto, os ácidos graxos como ácido palmítico e ácido mirístico mostraram ter melhor estabilidade a longo prazo.

A partir das informações levantadas, pode-se considerar que os PCMs mais indicados para o desenvolvimento da pesquisa são os ácidos graxos orgânicos macroencapsulados por considerar a reutilização de materiais plásticos descartados para conformação de seus contentores. Os pontos de atenção baseiam-se na possível inflamabilidade do PCM, a possível corrosão entre o PCM e o contentor de plástico e a rigidez da cápsula para maior durabilidade e estabilidade do produto final.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Segundo Goldratt (1986, p.7), “[...] o conhecimento que nos rodeia não é um objetivo a ser alcançado por si só. Ele deve ser perseguido, acredito, para tornar o nosso mundo um lugar melhor e a vida mais gratificante [...]”. Apesar do consenso a respeito da ideia, Dresch *et al.* (2015) apresentam o levantamento da revista *The Economist* de agosto de 2007 que revela que os periódicos acadêmicos publicam mais de 20.000 artigos por ano. A maior parte deles é altamente quantitativo, orientado a hipóteses e esotérico. Segundo os autores, o resultado é que as pesquisas publicadas quase não são lidas pelos gestores do mundo real.

Além disso, Dresch *et al.* (2015) também apresentam a opinião de pesquisadores como Simon Schwartzman, ex-presidente do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, dizendo que “No Brasil, a pesquisa acadêmica não se transforma em produtos ou serviços úteis a sociedade [...]” e Freek Vermeulen, professor da *London Business School* e consultor nas áreas de estratégia e inovação, em artigo publicado no site da revista *Forbes*: “[...] nós precisamos traduzir melhor a nossa pesquisa para os gestores [...]”, ou seja “descrever os achados da pesquisa em linguagem mais acessível, sem grandes explicações metodológicas ou teóricas, ajudando os executivos a identificar a relevância e usufruir das constatações”.

O fato de ser relevante para os profissionais não dispensa a pesquisa da necessidade de ser reconhecida pela comunidade acadêmica, garantindo, assim, o avanço do conhecimento, segundo Daft e Lewin (2008). O rigor é outro predicado que deve estar presente desde a sua condução até a apresentação dos resultados (VAN AKEN, 2005; HATCHUEL, 2009). A maior precisão metodológica auxilia a

assegurar a validade da pesquisa e o reconhecimento com boa condução e confiabilidade.

4.1 Caracterização do método

Um possível esclarecimento para a distância encontrada entre o meio acadêmico (teoria) e organizações (prática) pode ser encontrado nos métodos utilizados para o desenvolvimento de pesquisas em ciências naturais e sociais. Apesar de ambas serem consideradas ciências baseadas em fatos empíricos, elas são essencialmente diferentes.

Segundo Simon (1996), a ciência natural se refere a um conjunto de conhecimentos sobre uma classe de objetos e/ou fenômenos (características, comportamentos e interações). Nesse sentido, é tarefa das disciplinas científicas naturais pesquisarem e ensinarem como as coisas são e como elas funcionam. No entanto, para Dresch *et al.* (2015), não basta compreender profundamente um fenômeno (o fenômeno em si, seus antecedentes, suas consequências, seus mediadores). Precisamos desenvolver conhecimentos sobre como intervir em determinada situação e gerar os resultados desejados.

Dessa forma, Simon (1996) levanta a possibilidade de estudos sobre o universo artificial, definindo que as ciências do artificial se ocupam da concepção de artefatos que realizem objetivos. O autor salienta a necessidade de criar uma ciência (i.e., um corpo de conhecimento rigoroso e validado) que se dedique à proposição de artefatos com propriedades desejadas, ou seja, uma ciência de projeto ou *Design Science*. A missão principal da *Design Science* é, portanto, desenvolver conhecimento para a concepção e desenvolvimento de artefatos (VAN AKEN, 2004).

No que diz respeito aos métodos de pesquisa, podemos conceituá-los como um conjunto de passos reconhecidos pela comunidade acadêmica e utilizados pelos pesquisadores para a construção do conhecimento científico (ANDERY *et al.*, 2004). Dessa forma, a *Design Science Research* é um método que fundamenta e operacionaliza a condução da pesquisa quando o objetivo a ser alcançado é um artefato ou uma prescrição. Como método de pesquisa orientado à solução de problemas, a *Design Science Research* busca, a partir do entendimento do

problema, construir e avaliar artefatos que permitam transformar situações, alterando suas condições para estados melhores ou desejáveis (DRESCH *et al.*, 2015).

Dresch *et al.* (2015) apresentam um quadro síntese com os sete critérios para a condução de pesquisas que utilizam a *design science research*, elencados pelo professor e pesquisador da *University of South Florida*, Alan Hevner:

Figura 16: Critérios para a *Design Science Research*



Fonte: Hevner *et al.* (2004)

Além dos critérios apresentados, March e Storey (2008) apontaram elementos necessários a uma adequada contribuição, teórica e prática, da *design science research*: o primeiro é a formalização de um problema que seja de fato relevante; o segundo é a demonstração de que ainda não existem soluções ou de que possam existir melhores soluções para o problema formalizado; o terceiro é o desenvolvimento e apresentação de um novo artefato que possa ser utilizado para solucionar o problema e, finalmente, o quarto é a avaliação dos artefatos desenvolvidos em relação a sua utilidade e viabilidade com o intuito de mostrar sua validade, tanto prático quanto acadêmica.

A partir dos critérios e elementos da *design science research*, vários autores discorreram sobre vários métodos para operacionalizar a *design science* por meio de suas etapas componentes. Dentre eles, vale ressaltar o trabalho de Manson (2006), baseado no método inicialmente proposto por Vijay Vaishnavi e Bill Kuechler

em 2004, com as cinco principais etapas de projeto e as saídas possíveis para cada uma delas:

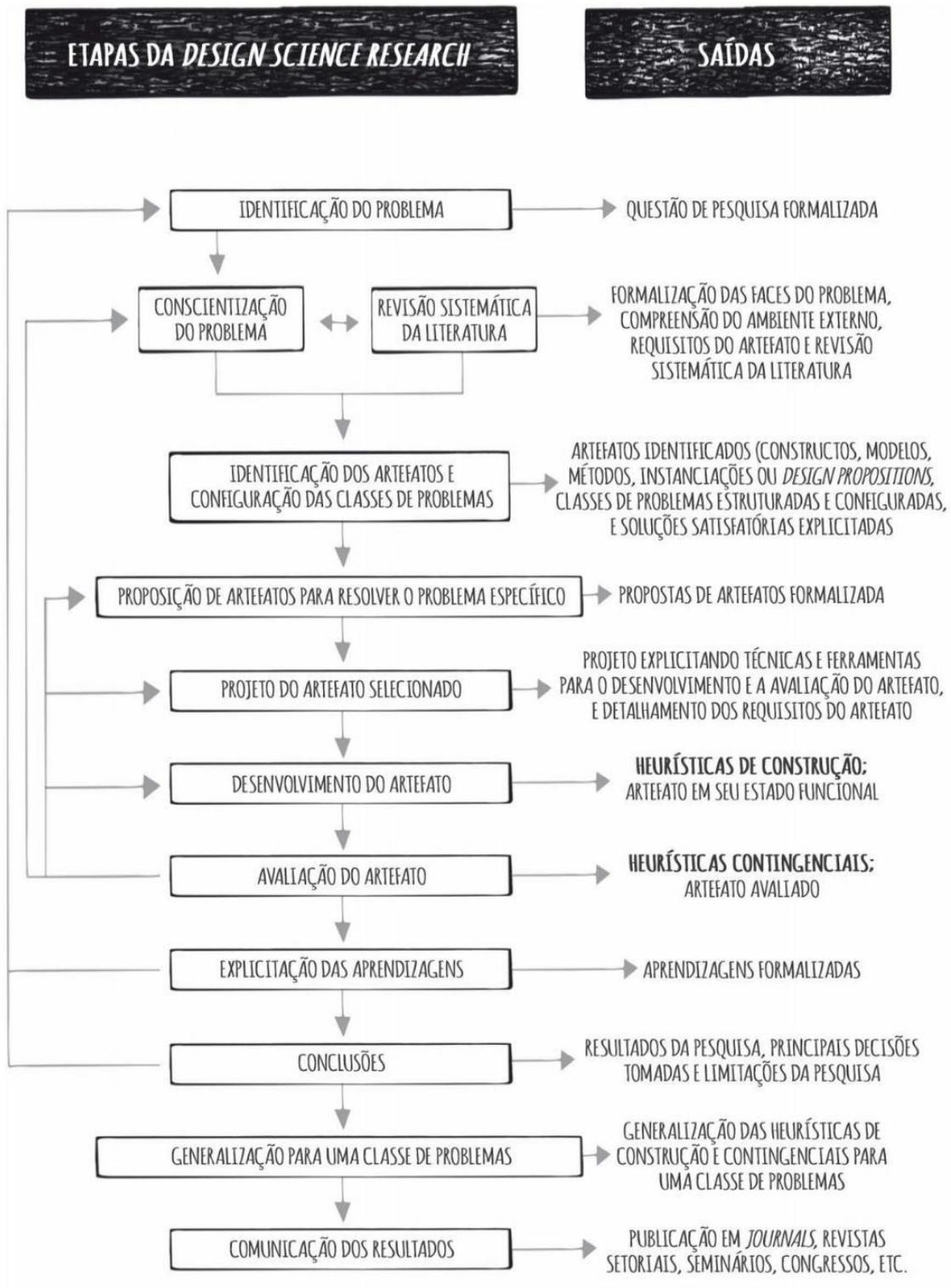
Tabela 2: Etapas da *Design Science Research*

ETAPAS DO PROCESSO	SAÍDAS
CONSCIENTIZAÇÃO DO PROBLEMA	PROPOSTA
SUGESTÃO	TENTATIVA
DESENVOLVIMENTO	ARTEFATO
AValiação	MEDIDAS DE DESEMPENHO
CONCLUSÃO	RESULTADOS

Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de Vaishnavi e Kuechler (2004)

A etapa de conscientização de problema deve se basear na identificação e compreensão do problema que se deseja estudar e solucionar. Nessa fase, o pesquisador já tem condições de elaborar uma proposta com evidências do problema e características do ambiente e interações com o artefato a ser desenvolvido. Na segunda etapa, o método científico abduutivo é utilizado para sugerir tentativas de soluções baseadas em seu conhecimento prévio para a melhoria da situação atual. A terceira etapa é constituída pelo desenvolvimento em si do artefato proposto onde os mais adequados para solucionar o problema serão avaliados na quarta etapa por suas medidas de performance. Caso o artefato não atenda às necessidades da pesquisa, o investigador poderá retornar à etapa de conscientização para compreender melhor o problema e, posteriormente, retomar o ciclo de estudos. Na etapa final, de conclusão, o pesquisador apresenta os resultados obtidos.

Considerando a condução da *design science research* de diversos autores, Dresch *et al.* (2015) apresentam um método composto por doze passos principais em que a ordenação é apresentada a seguir em um quadro resumo com as saídas de cada uma das etapas. A pesquisa atual segue a metodologia DSR e se utilizará das etapas para descrever seu desenvolvimento.

Figura 17: Etapas detalhadas da *Design Science Research*

Fonte: Dresch *et al.* (2015)

4.2 Desenvolvimento da pesquisa – etapas propositivas

4.2.1 Identificação do problema

A alta tecnologia de sistemas CAD/CAM e equipamentos CNC tem seu desenvolvimento voltado principalmente para a criação de novos sistemas e produtos com um nível de consciência modesto a respeito da procedência de sua matéria prima ou da destinação final com o término de sua vida útil. A partir de uma quantidade de 214,8 mil toneladas de resíduos sólidos por dia no Brasil, sendo que 31,9% do total de resíduo gerado pela população é composto de material reciclável (ABRELPE, 2017), verifica-se uma possibilidade de pensar a sustentabilidade como um sistema abrangente de pensamento, envolvendo responsabilidade, meio ambiente, economia e sociedade, para a aplicação da alta tecnologia no conceito da economia circular.

Para quebrar o estigma da reutilização de resíduos, há necessidade de incorporação de diversas funções e qualidades ao artefato desenvolvido para que a população se sinta atraída pela sua utilização. Na arquitetura, dois importantes valores que podem ser agregados a seus elementos são a estética e o desempenho térmico. No caso específico da pesquisa, a estética está envolvida em elementos ornamentais incorporando *Phase Change Materials* (PCM) em sua composição para auxiliar o desempenho térmico como sistema passivo de condicionamento de temperatura.

Dessa forma, a questão de pesquisa se formaliza em: Quais as possibilidades de aplicação de alta tecnologia na reintrodução de resíduos na cadeia produtiva, incorporando aspectos estéticos e de desempenho térmico no desenvolvimento de um elemento arquitetônico de acabamento?

4.2.2 Conscientização e caracterização do problema

Além das informações levantadas na fundamentação teórica, também há necessidade de considerar as dificuldades limitantes para o desenvolvimento do artefato em cada um dos temas envolvidos na pesquisa.

Apesar dos avanços tecnológicos e aumento na disponibilidade de equipamentos CNC no mercado brasileiro, não podendo mais ser considerado como

fator limitante a sua incorporação nos processos de projeto e construção de edificações, ainda há uma falta de conhecimento técnico para uma maior expressão na utilização desses processos no ambiente construído. Dessa forma, há necessidade de desenvolver uma solução de baixa complexidade para capacitação, principalmente, de agentes ligados às cooperativas de reciclagem.

Os plásticos representam 14% da composição de resíduos sólidos coletados no Brasil, atrás apenas de resíduos orgânicos (51%) (ABRELPE, 2017). Com a grande quantidade de material descartado, houve a necessidade de investigar quais tipos de plásticos utilizados principalmente em embalagens e utensílios domésticos (poliestireno, polipropileno, polietileno de baixa densidade, polietileno de alta densidade, polietileno tereftalato e policloreto de vinila) podem ser submetidos a sistemas CAD/CAM e equipamentos CNC.

As questões estéticas envolvem diversos fatores culturais. Dessa forma, o desenvolvimento do elemento arquitetônico de acabamento pretendeu ser adaptável a diferentes estilos e personalizável para maior aceitação no mercado.

A incorporação de *phase change materials* - PCM na arquitetura vem ganhando destaque para auxílio em desempenho térmico de componentes construtivos e edificações. Possuem características bastante específicas, geralmente compostos de alta complexidade produtiva, induzindo a um elevado valor para o produto final. A pesquisa buscou uma solução alternativa de baixo custo para viabilizar o artefato economicamente.

Além das características levantadas acima, o elemento arquitetônico de acabamento desenvolvido buscou considerar características como funcionalidade, durabilidade, estabilidade e estanqueidade.

4.2.3 Identificação dos artefatos como solução

Além dos exemplos de arquitetura *high-low* apresentados no capítulo 3, foram levantadas outras iniciativas de aplicação de alta tecnologia em materiais descartados que se relacionam com o desenvolvimento do artefato. A partir da busca por referências projetuais, o quadro abaixo apresenta os resultados principais e suas características conceituais e práticas.

Tabela 3: Iniciativas de aplicação de sistemas CAD/CAM na reutilização de materiais

PROPOSTA	AUTORES	ANO	LOCAL	TIPOLOGIA	LIGAÇÃO ACADÊMICA	MATERIAIS REUTILIZADOS	FERRAMENTAS CAD UTILIZADAS PARA DESIGN	FERRAMENTAS CAM UTILIZADAS PARA FABRICAÇÃO
JUNK	Alunos do Georgia Institute of Technology	2011	Atlanta - USA	Arquitetura efêmera	Georgia Institute of Technology	Garrafas plásticas de refrigerante / elásticos / anéis de acrílico	Modelagem tridimensional / desenho bidimensional	CNC - fresadora para corte dos anéis de acrílico
RECYCLED TOY FURNITURE	Greg Lynn	2008	Los Angeles - USA para Bienal de Veneza	Mobiliário / instalação artística	---	Brinquedos infantis plásticos	Digitalização 3D por laser / Modelagem tridimensional	Braço robótico de 6 eixos para cortar peças
JUGAAD	Sanjeev Shankar	2008	Nova Delhi - Índia	Arquitetura efêmera	Goethe Institute / German Technical Cooperation (GTZ)	Latas de óleo metálicas	Modelagem tridimensional	---
REPURPOSED POLITICAL PLY	Jason Griffiths / alunos da Arizona State University	2009	Tempe - USA	Arquitetura efêmera	Arizona State University	Posteres de campanhas políticas	Modelagem tridimensional / planificação de volumes (Rhinceros)	CNC - fresadora para corte e frisos de dobras nos painéis
PLAYSCAPE	Cameron Acheson / Bill Batey / Courtney Mathias / Jamie	2010	Alabama - USA	Arquitetura efêmera	Auburn University	Galões galvanizados	Modelagem tridimensional / desenho bidimensional	---
WATER BRANCH HOUSE	Kengo Kuma	2008	New York - USA	Arquitetura efêmera	---	Tanques plásticos	Modelagem tridimensional / desenho bidimensional	---
GRINDSHELL STRUCTURE	Ayodh Vasant Kamath	2015	Pennsylvania - USA	Arquitetura efêmera	University of Pennsylvania	Tapumes de madeira recuperados	Modelagem tridimensional / Scripts Rhinceros	CNC - fresadora para corte das peças de madeira
PERPETUAL PLASTIC PROJECT	Better Future Factory	2012	Rotterdam - Holanda	Filamento impressoras 3D	---	Plástico descartável	Repositórios de modelos 3D para impressão	Impressora 3D

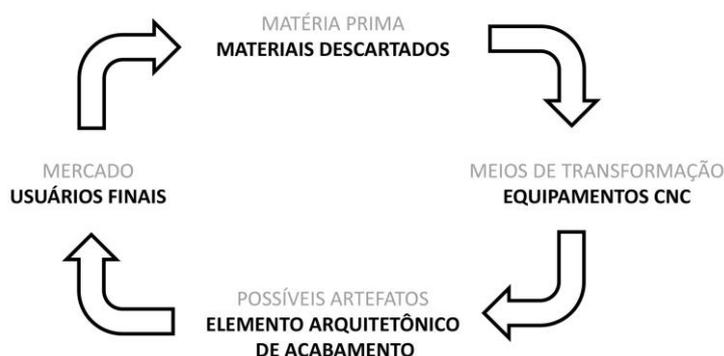
Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com o levantamento de informações, pode-se verificar que todos os processos criativos são destinados a arquiteturas efêmeras ou instalações artísticas. Por possuir características singulares e tempo de exposição controlado, questões como estabilidade (dos materiais empregados) e durabilidade deixam de serem consideradas como fatores essenciais em seu desenvolvimento. A maioria das iniciativas possuem relação com o meio acadêmico demonstrando um interesse de pesquisa, mas que não necessariamente alcançam o mercado produtivo. A grande parte dos exemplos são recentes, últimos dez anos, o que pode refletir nessa ausência de ligação com o mercado pelo pouco tempo de estudos para que os resultados encontrados sejam absorvidos no desenvolvimento de novos produtos. Os materiais empregados são bastante diversos e quase todos os projetos passam por sistemas CAD na fase de projeto. Mas a produção não acompanha essa tendência; a manufatura assistida por computador não é empregada ou utilizada apenas em etapas ou partes do *design*, podendo mostrar uma dificuldade na conciliação dos materiais descartados com equipamentos CNC.

4.2.4 Proposição dos artefatos

A partir dos requisitos necessários ao desenvolvimento do artefato, puderam ser previstas algumas fases de estudo nessa etapa:

Figura 18: Fases de estudo para a proposição dos artefatos

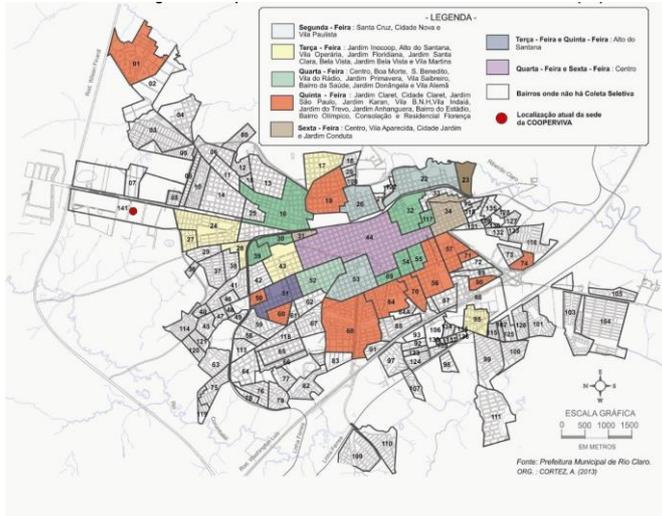


Fonte: Elaborado pelo autor

A fase prática da pesquisa foi iniciada com visitas a cooperativas de reciclagem na cidade de Rio Claro – SP, pela facilidade de acesso do autor a esses locais. A área urbana do município é dividida entre as duas cooperativas existentes

para coleta de materiais descartados: Cooperviva e Novo Tempo.

Figura 19: Mapa de coleta seletiva no Município de Rio Claro - SP



Os setores coloridos são coletados pela Cooperviva e os setores em branco são coletados pela Novo Tempo.

Fonte: Prefeitura Municipal de Rio Claro - SP

A Cooperviva é formada por antigos catadores de lixo do aterro sanitário da cidade que tiveram sua entrada proibida no local por questões sanitárias. A partir disso, a cooperativa foi criada e possui 16 anos de funcionamento com aproximadamente 42 trabalhadores que participam dos lucros com garantia de seus direitos. A Cooperviva comercializa, em média, 120 toneladas de material reciclável por mês.

Figura 20: Esteira de triagem na Cooperviva



Fonte: Jornal Cidade de Rio Claro
(Arvolea, 2014)

Figura 21: Esteira de triagem e materiais separados pelos cooperados



Fonte: Jornal Cidade de Rio Claro (Arvolea, 2014)

A Associação Novo Tempo foi formada há cerca de dois anos e possui 24 trabalhadores comercializando aproximadamente 20 toneladas de materiais recicláveis por mês. As instalações da associação ainda são provisórias e possuem baixa produção por abranger apenas um quarto da área do município que não era atendida pela Cooperviva.

Figura 22: Barracão de instalação da Associação Novo Tempo



Fonte: EPTV (2018)

Figura 23: Trabalhadores da associação separando material coletado manualmente



Fonte: EPTV (2018)

Ambas organizações possuem apoio da Prefeitura Municipal de Rio Claro para organização e regularização dos espaços ocupados e coleta seletiva do município. Os materiais coletados seguem a tendência apresentada no panorama de resíduos sólidos apresentado pela ABRELPE (2017) com destaque para embalagens plásticas, papel/papelão e metais (em menor quantidade).

O interesse por trabalhar com resíduos plásticos nesta pesquisa deve-se não apenas à facilidade de sua transformação, mas também pela grande quantidade de descarte e baixo reaproveitamento observado em levantamentos estatísticos e visitas a cooperativas. Durante essas visitas foram coletadas amostras dos principais materiais plásticos presentes nas cooperativas. Os tipos de plástico mais encontrados nas embalagens descartadas são compostos principalmente de HDPE - Polietileno de alta densidade (materiais de limpeza), PP - Polipropileno (potes de sorvete), PET - Polietileno tereftalato (garrafas) e PS - Poliestireno (pratos e copos descartáveis).

4.2.4.1 Levantamento de meios de transformação

A partir do material definido e coletado, foram investigados os principais meios de transformação a que podem ser submetidos. Assim, foram visitados diversos laboratórios de fabricação digital para estudo dos equipamentos existentes. O primeiro foi o LAPAC - Laboratório de Automação e Prototipagem para a Arquitetura e Construção localizado na Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). O LAPAC possui os seguintes equipamentos:

- CNC Router Vitor Ciola (3 eixos, 1000x2000mm, mesa de vácuo)
- CNC Router Roland MDX540 (4 eixos, 500x400x155mm)
- Cortadora a laser Combat (100w, 1200x900mm)
- Impressora 3D Cube FDM (140x140x140mm) - filamento
- Impressora 3D Felix 3.0 Single extruder (255x205x225mm) - filamento
- 3D digitalizador MicroScribe G2X
- *Vacuum Forming* VFBDP3036 Brawel (290x350x150mm, thick.0.1-3mm)

Figura 24: Laboratório de automação e prototipagem para a Arquitetura e Construção



Fonte: LAPAC (2015)

Figura 25: Pesquisadores entre a fresadora e cortadora a laser no LAPAC



Fonte: LAPAC (2015)

Figura 26: Visitantes em atividades do LAPAC



Fonte: LAPAC (2015)

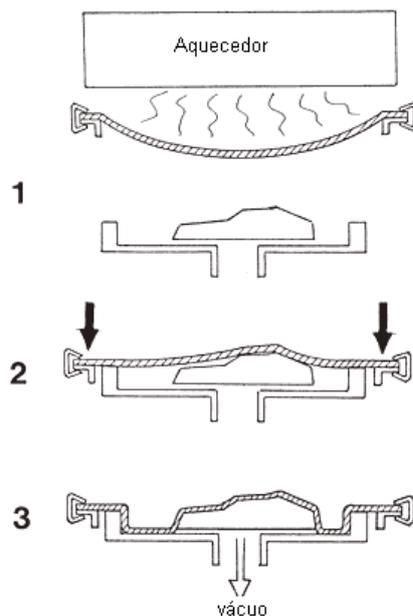
Figura 27: Fresadora Vitor Ciola em funcionamento



Fonte: LAPAC (2015)

Dentre os equipamentos existentes, destaca-se a termoformadora a vácuo, por ser um dispositivo que exige um menor nível de conhecimento técnico para operação, baixo custo e indicação para o trabalho com materiais plásticos. A tecnologia da moldagem a vácuo consiste no aquecimento de uma prancha plástica até que ela alcance um estado maleável e a partir disso, o material é forçado contra um molde por meio de vácuo.

Figura 28: Funcionamento de equipamentos de moldagem a vácuo.



Fonte: Instituto NCB (2018)

Os moldes a serem utilizados no equipamento podem ser desenhados parametricamente por sistemas CAD (*3DS Max, Rhinoceros, Grasshopper*) para atender a diferentes estilos e gostos pessoais dos usuários, e produzidos por equipamentos de controle numérico (CNC) como impressoras 3D ou fresadoras. Dessa forma, o processo de produção consegue envolver diversas frentes de trabalho em sistemas CAD/CAM.

Por intermédio do Programa Santander de Mobilidade Internacional em cooperação com a Pró-reitoria de Extensão e Cultura da UNICAMP, houve a possibilidade de cursar algumas disciplinas na Faculdade de Arquitectura da Universidade de Lisboa em Portugal no primeiro semestre de 2018. As matérias envolveram temas ligados à pesquisa como Laboratório de Desenho Paramétrico, Digitalização 3D, Realidade Virtual e Animação. Além disso, houve a oportunidade de estágio no Laboratório de Prototipagem Rápida, coordenado pelo Prof. Dr. Pedro Januário, da Faculdade de Arquitectura, oportunidade de conhecer o funcionamento de seus equipamentos:

- Impressora 3D - Beethefirst (190x135x125mm) - filamento
- Impressora 3D - BCN3D Sigma (210x297x210mm) - filamento
- CNC Router - ProNum ProMaster (3 eixos, 3000 x 2000mm)
- Cortadora de vinil
- Cortadora a laser Universal Laser Systems Inc. (800 x 450 mm)

Figura 29: Laboratório de Prototipagem Rápida



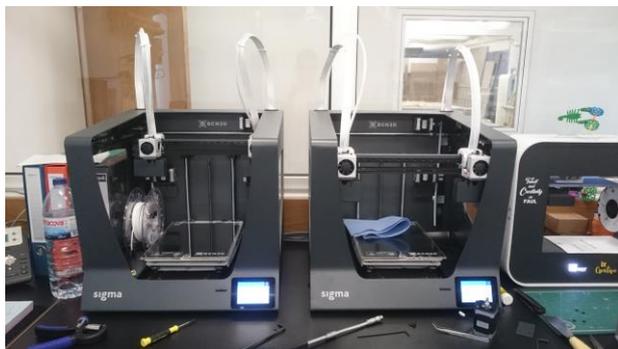
Fonte: Autor

Figura 30: CNC Router Pronum - Promaster



Fonte: Autor

Figura 31: Impressoras 3D BCN3D Sigma



Fonte: Autor

Figura 32: Impressora 3D Beethefirst



Fonte: Autor

Durante a estadia em Lisboa pelo intercâmbio acadêmico, também foi possível conhecer o FabLab Lisboa, um espaço criado pela Câmara Municipal de Lisboa como um Laboratório Municipal de Fabricação Digital. O Espaço conta com os seguintes equipamentos:

- CNC Router - Ouplan 2015 (3 eixos, 2000x1500mm)
- CNC Router - Roland MDX-20 (3 eixos, 203x152mm)
- Cortadora a laser GCC Mercury III (635x458mm)
- Impressora 3D - Blocks One (200x210x210mm)
- Impressora 3D - Liquid Crystal 10 (121x68x160mm)
- Cortadora de vinil - Silhouette Cameo (305x3000x8mm)
- Digitalizador 3D - Shinig 3D EinScan-SE
- *Vaccum forming* - Formech Compac Mini
- Cortador de fio térmico - Proxxon Thermocut 230 (440x335x115mm)
- Máquina de costura - Elna Sew Zebra

Por meio de um *workshop* oferecido pelo FabLab Lisboa durante o período de Carnaval do ano de 2018, houve a oportunidade de aproximação com a técnica de termomoldagem a vácuo. O evento, organizado para aproximar cidadãos comuns a técnicas de fabricação digital, consistiu na apresentação do espaço do laboratório aos participantes, uma breve introdução teórica a respeito de fabricação digital / *vacuum forming* e uma parte prática na qual um molde composto por perfis de madeiras cortados a laser alinhados foi utilizado para moldar chapas de plástico transparente (PLA - Poliacido láctico) no formato de máscaras de carnaval.

Figura 33: Montagem do molde



Fonte: Autor

Figura 34: Equipamento de *vacuum forming*

Fonte: Autor

Figura 35: Molde feito com perfis de madeira cortados a laser



Fonte: Autor

Figura 36: Máscara resultante do processo



Fonte: Autor

O contato com os técnicos do FabLab Lisboa através do *workshop* foi interessante para explicar a ideia da pesquisa e realizar os primeiros testes com materiais não convencionais em equipamentos de termomoldagem a vácuo. Alguns tipos de garrafas PET foram coletados e planificados por corte para se aproximar de uma prancha reta a ser presa no equipamento. Pela instabilidade do material com o aquecimento, não há como segurá-lo na forma de prancha para ser submetido posteriormente ao vácuo contra o molde. Assim, verificou-se que PET não poderia ser utilizado para o desenvolvimento da pesquisa.

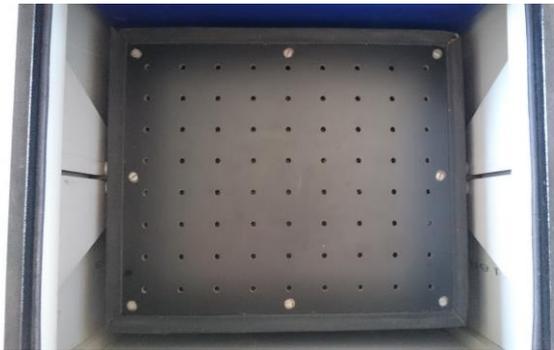
4.2.4.2 Início do período de testes

Após o retorno ao Brasil, os testes com diferentes tipos de plásticos continuaram com o equipamento existente no LAPAC - UNICAMP. Algumas

adaptações do equipamento foram necessárias para torná-lo mais eficiente na utilização de materiais descartados. A primeira delas foi o nivelamento da mesa de vácuo. Originalmente, o equipamento possui um desnível de cerca de 3 cm entre a prancha aquecida e a mesa de vácuo, acarretando uma perda de material para o contato entre as duas seções do equipamento. Assim, foi cortada uma prancha de madeira na espessura desse espaçamento com furos coincidentes com a sucção de ar para que o vácuo continuasse a funcionar com a instalação desse suporte.

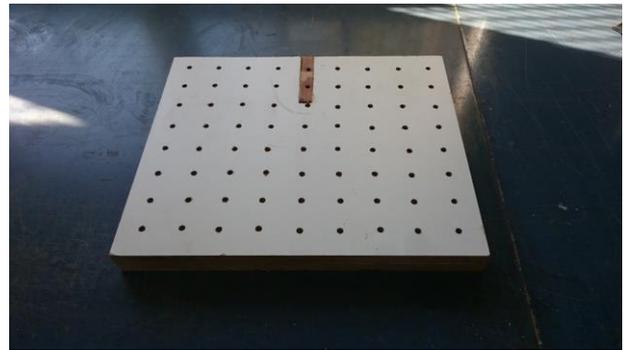
Além disso, também foram utilizadas máscaras recortadas em aço galvanizado para permitir a fixação de pedaços de plástico menores que o quadro de fixação original da máquina e reduzir a área a ser exposta ao calor. Dessa forma, podem ser utilizadas pranchas com menores dimensões no equipamento. Foram recortadas duas máscaras de cada dimensão do vão para que o material pudesse ser fixado entre elas.

Figura 37: Mesa de vácuo original do equipamento



Fonte: Autor

Figura 38: Prancha de madeira a ser sobreposta na mesa de vácuo do equipamento



Fonte: Autor

Figura 39: Máscaras para fixar materiais plásticos descartados com diferentes dimensões no equipamento



Fonte: Autor

Figura 40: Equipamento de termomoldagem a vácuo do LAPAC



Fonte: Autor

Foram coletados materiais plásticos descartados na Associação Novo Tempo para a realização de testes em laboratório. Foram recolhidos diferentes tipos de embalagens de materiais de limpeza, potes de sorvete e pratos ou copos plásticos descartados. Abaixo serão relatados os testes com os diferentes tipos de plástico:

4.2.4.3 HDPE - Polietileno de alta densidade

O Polietileno de alta densidade é utilizado principalmente em embalagens de materiais de limpeza e sua espessura não é regular em torno das embalagens, dificultando a manipulação na *vacuum forming*. Novamente, as embalagens foram planificadas o máximo possível, através de corte, para serem presas no equipamento.

Figura 41: Corte para planificação de embalagem plástica em HDPE



Fonte: Autor

Figura 42: Resultado do teste com HDPE na *vacuum forming* utilizando molde em MDF



Fonte: Autor

As principais dificuldades na utilização do material são relacionadas à espessura das embalagens (aproximadamente 0,7 mm), o que exige maior tempo de aquecimento para torná-lo maleável (cerca de 90 segundos) e submetê-lo ao vácuo (cerca de 30 segundos). O resultado da moldagem não é satisfatório pois a forma do molde não é transferida com eficiência e pode ser verificada uma redução na área do material exposto ao calor.

4.2.4.4 PP - Polipropileno

O Polipropileno é utilizado principalmente em embalagens alimentícias e as mais indicadas para a pesquisa foram potes de sorvete, por apresentarem maiores áreas de faces planas.

Figura 43: Resultado do teste com PP na *vacuum forming* utilizando moldes de madeira



Fonte: Autor

As principais dificuldades na utilização do material também são relacionadas à espessura (aproximadamente 0,5 mm) exigindo maior tempo de aquecimento (entre 45 e 60 segundos) com um tempo de vácuo de aproximadamente 30 segundos. O resultado da moldagem também não é satisfatório por não assumir completamente a forma do molde quando pouco aquecido ou alteração em suas características quando muito aquecido.

4.2.4.5 PS - Poliestireno

O poliestireno possui diversas aplicações, dentre elas estão isolante térmico em sua forma expandida (EPS) em elementos construtivos ou produtos alimentícios podendo também ser encontrado em pratos e copos descartáveis com baixa espessura, ocasionando um baixo custo de produção. Assim, os produtos descartáveis são consumidos e descartados em grande quantidade e, em geral, são produzidos pela mesma técnica de termo conformação aqui utilizada. Os pratos são mais indicados para o trabalho da pesquisa pois apresentam maior parte de sua constituição na forma plana.

Figura 44: Resultado do teste com PS na *vacuum forming* utilizando moldes de madeira



Fonte: Autor

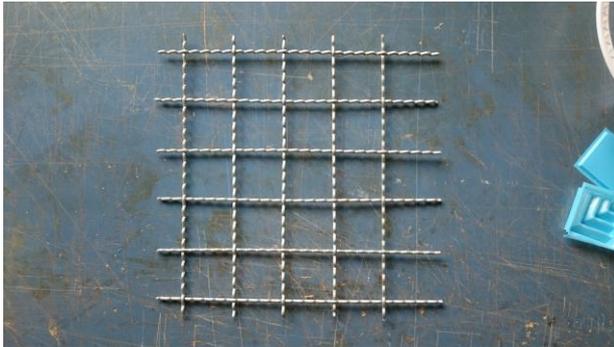
Os resultados dos testes foram bastante satisfatórios pelo baixo tempo de aquecimento (cerca de 30 segundos) com um tempo de 15 segundos sob o vácuo, estabilidade quando aquecido e boa transferência da forma do molde para o material.

4.2.4.6 Composição de painel modular

A termomoldagem a vácuo permite a configuração de pequenos módulos que podem compor placas de maiores dimensões pela justaposição destas peças em diferentes combinações. Dessa forma, verificou-se a possibilidade de usar telas aramadas para suporte dos elementos e, assim, configurá-los como placas de forro

ou painéis decorativos internos. Contudo, em uma possível aplicação na vertical seria difícil garantir a estanqueidade do material líquido dentro das cápsulas.

Figura 45: Tela aramada para suporte do painel



Fonte: Autor

Figura 46: Encaixe de possíveis módulos



Fonte: Autor

As telas aramadas podem apresentar diferentes formatos e dimensões de seus vãos, permitindo a personalização de acordo com os desejos dos usuários finais. Além disso, também podem receber coloração para melhorar o aspecto final do produto.

4.2.4.7 Seleção de *Phase Change Material*

A partir da proposição do material que conterá o PCM e de suporte para os módulos, também foram avaliadas as possibilidades de utilização de diferentes materiais como *phase change material* em substituição às opções existentes no mercado com custo elevado. Para isso, foram consultados especialistas e pesquisadores parceiros:

- Prof. Dr. Watson Loh e Prof. Dr. Caio Otoni do Inst. de Química da UNICAMP
- Profa. Dra. Sabine Hoffmann do Department of Built Environment da Technische Universitat Kaiserslautern na Alemanha
- Profa. Dra. Lucila Labaki do Lab. de conforto ambiental e física aplicada da FEC - UNICAMP

A seleção do PCM iniciou-se pelo levantamento das informações climáticas da cidade de Campinas - SP para definir as características necessárias a seu melhor funcionamento. Dessa forma, a Profa. Dra. Sabine Hoffmann calculou que o *phase change material* deveria ter uma temperatura de mudança de estado em torno dos 28°C. A primeira sugestão, endossada pelos Profs. Drs. Watson Loh e Caio Otoni, foi a utilização de parafinas específicas para este ponto de fusão. As parafinas possuem baixa toxicidade, mas há necessidade de atenção à carga de fogo em caso de incêndio.

Um material orgânico, comumente usado no Brasil para outros fins, chamou atenção por ter um ponto de fusão bastante próximo do necessário, entre 26 e 28 °C: o óleo de coco. Conhecido como azeite ou manteiga de coco, é um óleo vegetal composto por aproximadamente 90% de ácidos graxos extraídos pela prensagem da polpa do fruto. Ele é muito empregado na indústria cosmética e gastronomia de alguns países asiáticos.

4.2.4.8 Conscientização do problema e identificação dos artefatos como solução

A partir das proposições, houve a necessidade de retornar para a etapa de conscientização do problema e identificação dos artefatos para investigar as soluções preexistentes sobre elas.

4.2.4.8.1 *Vacuum forming* e PCM

A respeito da utilização de *vacuum forming* em conjunto com *phase change materials*, foi verificado o trabalho desenvolvido em conjunto entre o escritório de arquitetura Kieran Timberlake na Philadelphia e o *Centre for information technology and architecture* em Copenhagen. A ideia central dessa pesquisa foi considerar o estudo de termodinâmica em arquitetura como um modelo multiescalar e não incorporando seletivamente duas ou três dimensões como equações de transferência de calor para condução, convecção e radiação. Para Faircloth *et al.* (2018), um modelo multiescalar envolve o contexto dos edifícios, a vegetação e suas espécies e as dinâmicas das estações do ano.

Pelo interesse em trabalhar com uma abordagem multidomínio, os pesquisadores do escritório de arquitetura e centro de pesquisa buscaram identificar

materiais que apresentassem uma reação visível ao fluxo de calor e, assim, chegaram ao PCM. Segundo Faircloth *et al.* (2018), as aplicações de PCM em tetos, paredes e pisos têm sido estudadas há várias décadas com modelos físicos e protótipos. Mas o comportamento do PCM durante a mudança de fase ainda permanece difícil de presumir e modelar persistindo como uma rica área de pesquisa com abordagens experimentais múltiplas no campo da ciência da construção, termodinâmica e engenharia de materiais.

Para o estudo, foi desenvolvido um protótipo com 23 painéis em formato de losangos preenchidos com PCM comercial e compostos verticalmente como uma mesa de testes. Cada painel, modelado como superfícies NURBS, recebeu um dos cinco padrões de textura variando espaçamento, profundidade e direção da parte mais elevada, resultando em diferenças na exposição direta ao sol, auto sombreamento e quantidade de PCM instalada. O material foi encapsulado com PETG pela boa visibilidade (alta transparência) e facilidade no trabalho com termomoldagem. O *phase change material* foi derramado em uma prancha termomoldada com *vacuum forming* e selada com outra prancha não moldada.

Figura 47: Painéis termomoldados preenchidos com PCM



Fonte: FAIRCLOTH *et al.* (2018)

Como o interesse da pesquisa não era o funcionamento térmico do painel, mas sim sua transparência à luz como resultado de fatores multidomínio, os pesquisadores não detalham a diferença nos resultados dos cinco tipos de textura aplicadas nos painéis da mesa de testes. Como conclusão, Faircloth *et al.* (2018) dizem que o modelo incorpora métodos dos campos da arquitetura, ecologia urbana e termodinâmica em uma plataforma integrada que permite a *designers* testarem

hipóteses sobre o comportamento de transição de fase dos PCMs em resposta à geometria das superfícies, orientação solar, contexto de inserção (árvores e edifícios) e o tempo.

A pesquisa apresentada mostra um exemplo de aplicação de *vacuum forming* no estudo de comportamento térmico dos *phase change materials*. Dessa forma, apesar de haver poucas experiências práticas relatadas neste campo, houve um ponto de partida a ser considerado.

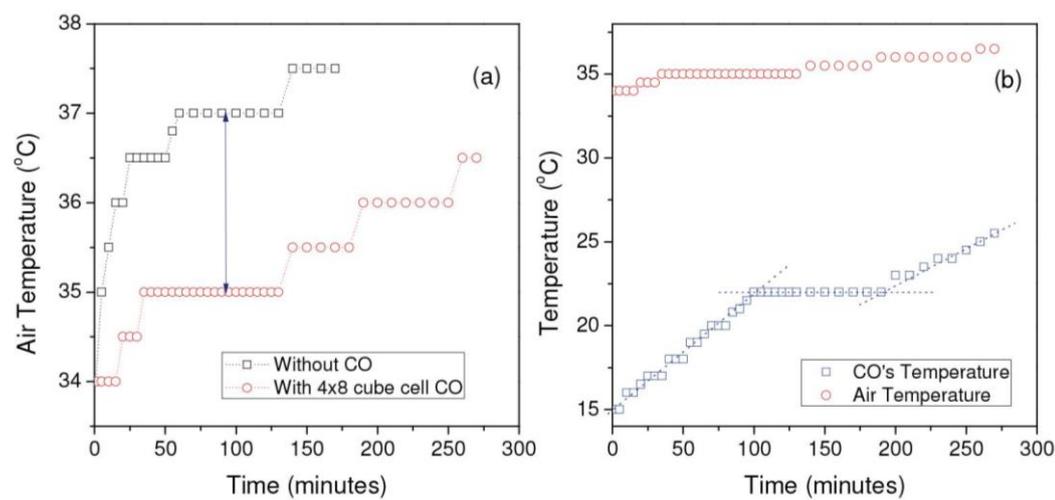
4.2.4.8.2 Óleo de coco como PCM

O uso de óleo de coco (OC) como PCM também foi investigado para levantar experiências e possibilidades a serem consideradas no desenvolvimento do artefato. Surpreendentemente, o potencial do OC como PCM tem sido amplamente explorado para o armazenamento de energia térmica (calor latente) em edifícios, segundo Saleel *et al.* (2018). Para o mesmo autor, as características do OC que comprovam seu potencial são as propriedades termofísicas com uma mudança de fase dentro da variação de temperatura de conforto (24-27 °C), baixo custo pela oferta abundante do material, estabilidade em temperaturas altas pelo seu alto ponto de fumaça (temperatura a qual, sob determinadas condições, o material começa a produzir uma fumaça claramente visível), alto ponto de ebulição, seguro, não reativo e de congelamento rápido.

A pesquisa de Saleel *et al.* (2018) resultou em uma redução de até 17 °C em relação à temperatura ambiente no interior de carros expostos ao sol. Para esse resultado, foram instalados cerca de 2 Kg de OC no teto do veículo encapsulados em folhas de borracha extrafinas.

Um país que se destacou na pesquisa do OC como PCM foi a Indonésia, por ser um dos principais produtores do material no mundo. Irsyad e Harmen (2017) destacam a necessidade de considerar a espessura do material contentor do OC pelo impacto no tempo de mudança de fase. Já Putri *et al.* (2016) conseguiram uma redução de 2 °C na utilização de 2 Kg de OC em uma câmara térmica de 0,64 m³.

Figura 48: (a) Temperatura do ar sem e com OC como PCM. A seta indica a redução na temperatura do ar com o OC. (b) Temperaturas do ar e do OC. A linha pontilhada indica o ajuste para a fase sólida sensível, fase latente e fase líquida sensível do OC.



Fonte: Putri *et al.* (2016)

Wonorahardjo *et al.* (2018) realizaram teste com esferas plásticas de 8, 12 e 16 cm de diâmetro em uma câmara térmica para verificar o comportamento do OC em diferentes tamanhos de células através da variação de sua temperatura em resposta às condições naturais do ar no meio ambiente. As conclusões dos autores são que as temperaturas de todas as células de OC seguiram a dinâmica da temperatura ambiente, com pequenas células de OC apresentando menores diferenças na temperatura do ar e menores tempos de atraso. Apesar disso, a célula de 16 cm mostrou uma média de temperatura relativamente baixa e constante, o que sugere que apenas parte da amostra contribuiu para o armazenamento de energia. Dessa forma, a célula de 12 cm apresentou um equilíbrio entre a capacidade de carga e descarga de energia, podendo constatar-se como o tamanho ideal para o contendor de OC.

Com um clima tropical parecido com a Indonésia, é possível aproveitar o resultado dessas pesquisas utilizando o OC como PCM e também da significativa produção do material no país. É importante lembrar que houve a necessidade de atenção à espessura do material selecionado para conter o PCM para que não fosse muito espesso a ponto de impedir a transferência de calor ou fina demais, não garantindo a durabilidade do artefato. É imprescindível considerar a quantidade de

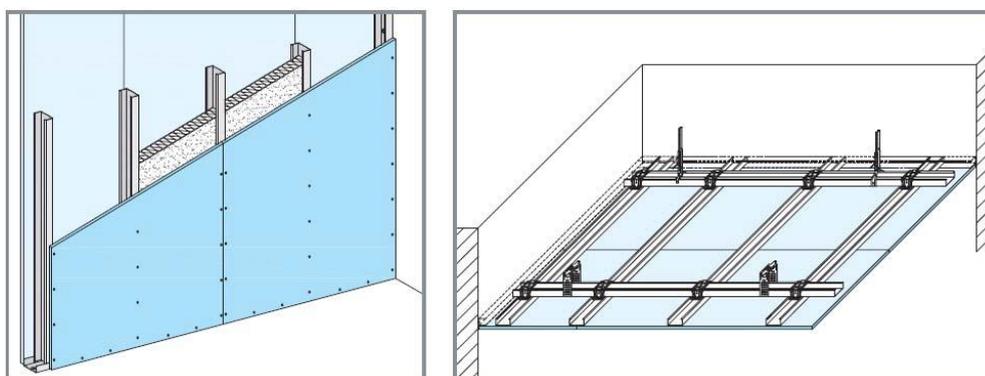
OC que será encapsulada para que todo o material empregado trabalhe no armazenamento de energia térmica.

4.2.4.8.3 Elementos de acabamento com a incorporação de PCM existentes no mercado

Além dos temas acadêmicos, também foram verificados os elementos presentes no mercado que utilizam PCM como meio passivo de controle térmico. Assim, chegamos a alguns produtos apresentados a seguir.

- BASF Micronal® PCM *Smartboard* - placa de aplicação interna de gesso com PCM microencapsulado com espessura de 1,5 cm cujo desempenho é comparável ao de uma parede de concreto de 9 cm ou a uma parede de tijolos de 12 cm. O produto pode ser instalado tanto em paredes quanto em forros.

Figura 49: BASF Micronal® PCM *Smartboard* estruturado como *drywall* ou em forros



Fonte: BASF

A empresa BASF vendeu a tecnologia Micronal® para a empresa Microtek Laboratories que, não deu continuidade à produção do PCM *Smartboard*.

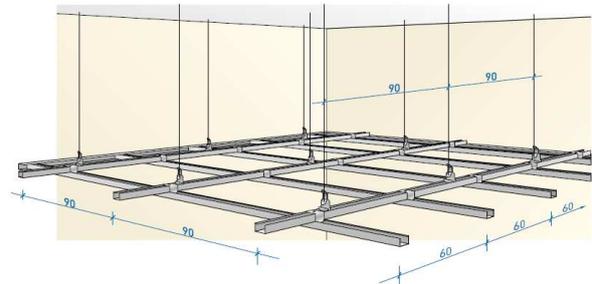
- Datum Phase Change LTD F.E.S-Board® - placa produzida a partir de minerais naturais abundantes incorporando os mais recentes PCMs (informações do fabricante). As placas também são para uso interno, podendo ser aplicadas em paredes e forros.

Figura 50: F.E.S-Board®



Fonte: Datum Phase Change LTD

Figura 51: F.E.S-Board® estruturado em forro



Fonte: Datum Phase Change LTD

- DORKEN Delta®-Cool 24 - Tecnologia passiva de controle de temperatura que utiliza PCM encapsulado de diferentes formas: bolsas, painéis, bolas e pranchas onduladas.

Figura 52: Aplicação do Delta®-Cool 24 sobre placas de forro



Fonte: DORKEN

Figura 53: Delta®-Cool 24 em diferentes formas de encapsulamento

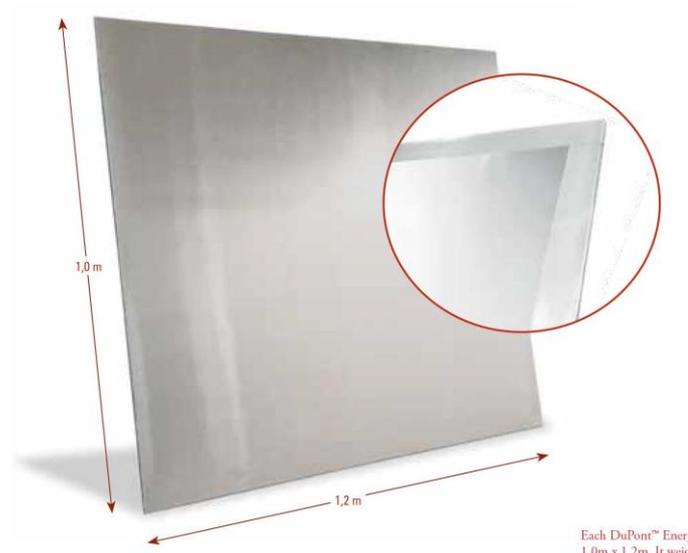


Fonte: DORKEN

- DuPont™ Energain® - Painéis de alumínio laminado selados com fita de alumínio que contém um composto de copolímero e cera de

parafina como PCM. Instalados no interior de edifícios em paredes e forros juntamente com sistema de ventilação mecânica.

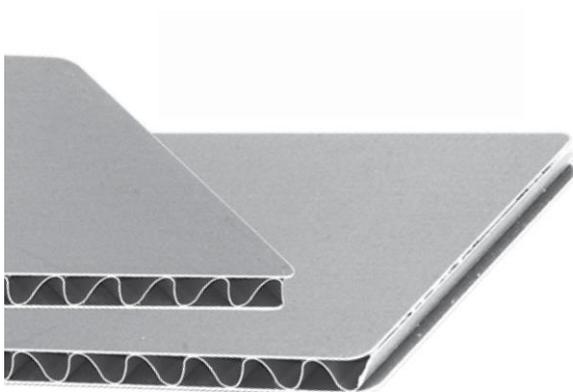
Figura 54: DuPont™ Energain®



Fonte: DuPont™

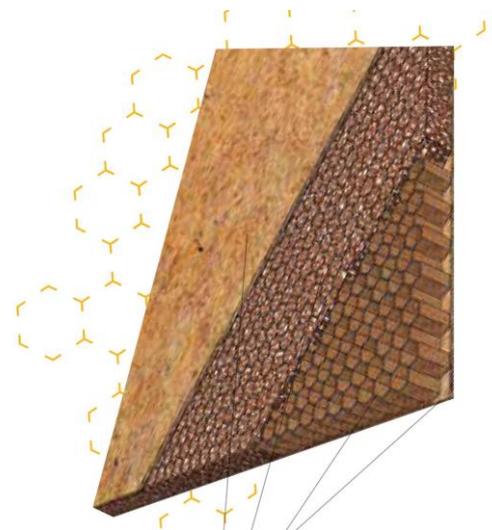
- EBB™ Eco Building Boards® - Painéis de alumínio ou fibra natural com PCM no interior. Tanto a estrutura como o PCM são 100% recicláveis (informações do fabricante)

Figura 55: Placa de alumínio com PCM



Fonte: EBB

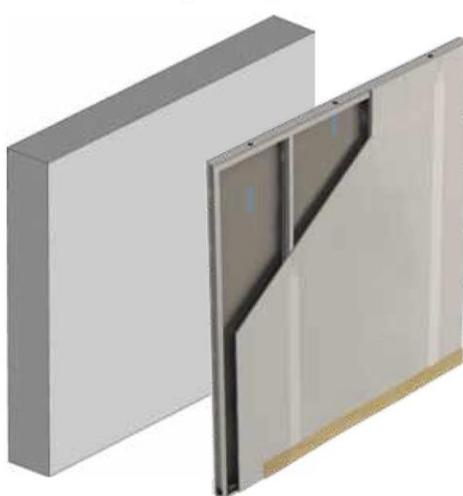
Figura 56: Placa de fibra natural com PCM



Fonte: EBB

- KNAUF COMFORTBOARD - Placa de gesso com incorporação de PCM microencapsulado para aplicações em ambientes internos.

Figura 57: KNAUF COMFORTBOARD



Fonte: KNAUF

Verifica-se uma grande quantidade de materiais que começaram a incorporar PCM em suas composições. Apesar disso, o preço elevado dos produtos finais ocasiona uma baixa utilização no mercado. Segundo reportagem da *Homebuilding & Renovating* de 2012, a F.E.S-Board® custa de £25/m² a £75/m² (segundo cotação de 29/01/2019, em torno de R\$121,50/m² a R\$364,50/m²) dependendo da quantidade de PCM na placa. Outros produtos como DuPont™ Energain® e KNAUF COMFORTBOARD chegam a valores como £40/m² e £70/m² (segundo cotação de 29/01/2019, em torno de R\$194,40/m² a R\$340,20/m²), respectivamente, em 2014. Dessa forma, reforça-se a necessidade de desenvolver um artefato fabricado com materiais alternativos que possam oferecer uma solução mais sustentável em todos os seus aspectos.

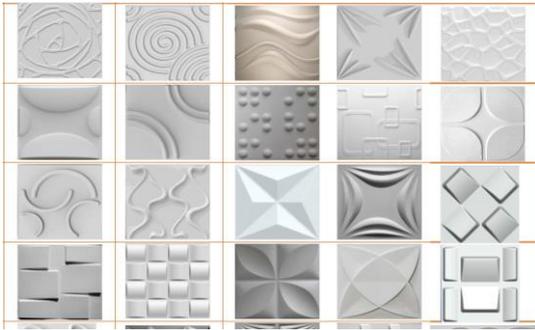
4.2.4.8.2 Elementos ornamentais produzidos com plástico existentes no mercado

Também foram investigados revestimentos decorativos para paredes e tetos em relevo, produzidos em plástico (PS - poliestireno), disponíveis no mercado. Verificou-se a existência de painéis de revestimento 3D fabricados por meio de

modelagem bidimensional, tridimensional e termomoldados a vácuo. Esses painéis são vendidos em grandes lojas de materiais de acabamento e comércio eletrônico.

- Formix 3D - Fábrica de Osasco - SP, que produz 38 modelos de painéis com 50x50 cm e dois modelos com 62,5x80 cm. São fabricados em PS e podem receber acabamento em pintura.

Figura 58: Modelos revestimento Formix 3D



Fonte: Formix 3D

Figura 59: Exemplo aplicação revestimento 3D plástico



Fonte: Formix 3D

- Revemix Revestimentos - Fabricante de revestimentos 3D em poliestireno com dimensões de 50x50 cm

Figura 60: Exemplo aplicação revestimento 3D plástico Revemix



Fonte: Revemix

- Habitarte - Fabricante de venda *online* para diversos países. Placas com 50x50 cm em 10 modelos.

Figura 61: Modelos revestimento 3D plásticos Habitarte

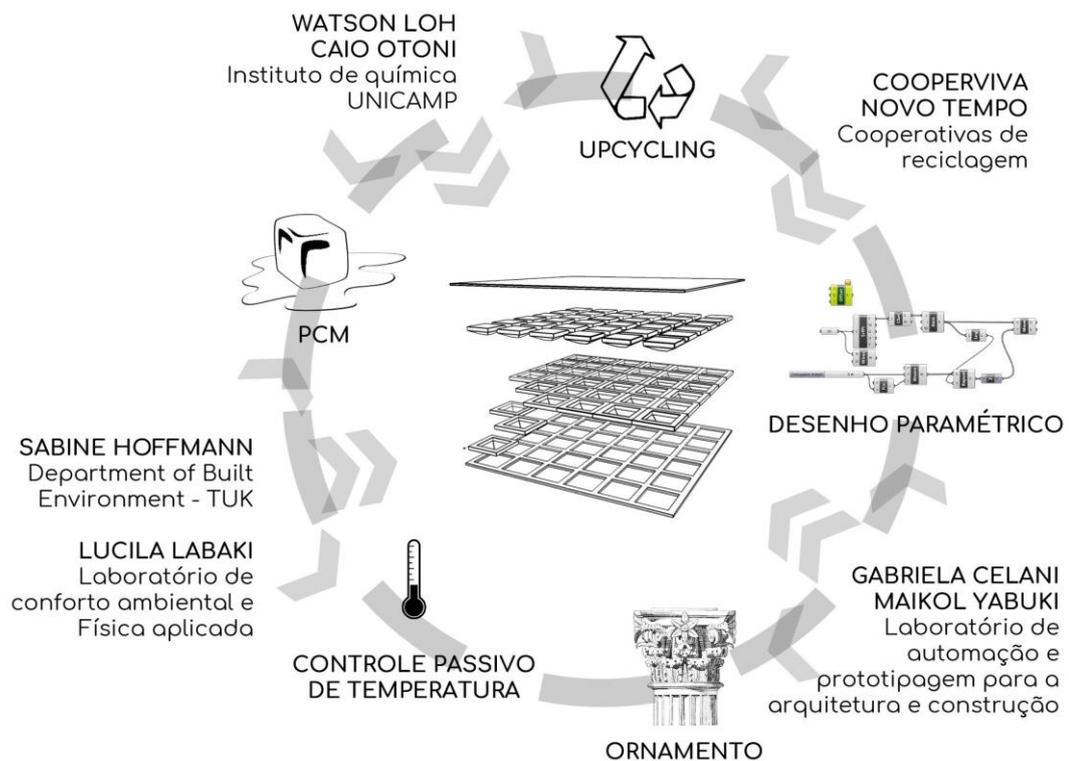


Fonte: Habitarte

4.2.5 Projeto do artefato

A partir das proposições levantadas na etapa anterior, o projeto do artefato define os principais meios que serão considerados em cada um dos temas envolvidos para o desenvolvimento da pesquisa. Por se tratar de uma pesquisa multidisciplinar, foi necessário contar com o apoio de especialistas na pesquisa.

Figura 62: Especialistas envolvidos na pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor

As relações entre os temas de pesquisa foram abordadas ao longo do levantamento de informações principalmente em pares:

SUSTENTABILIDADE	CAD/CAM
<i>Upcycling</i>	Modelagem tridimensional / fresadoras / braços robóticos
Levantamento de iniciativas de aplicação de sistemas CAD/CAM na reutilização de materiais	

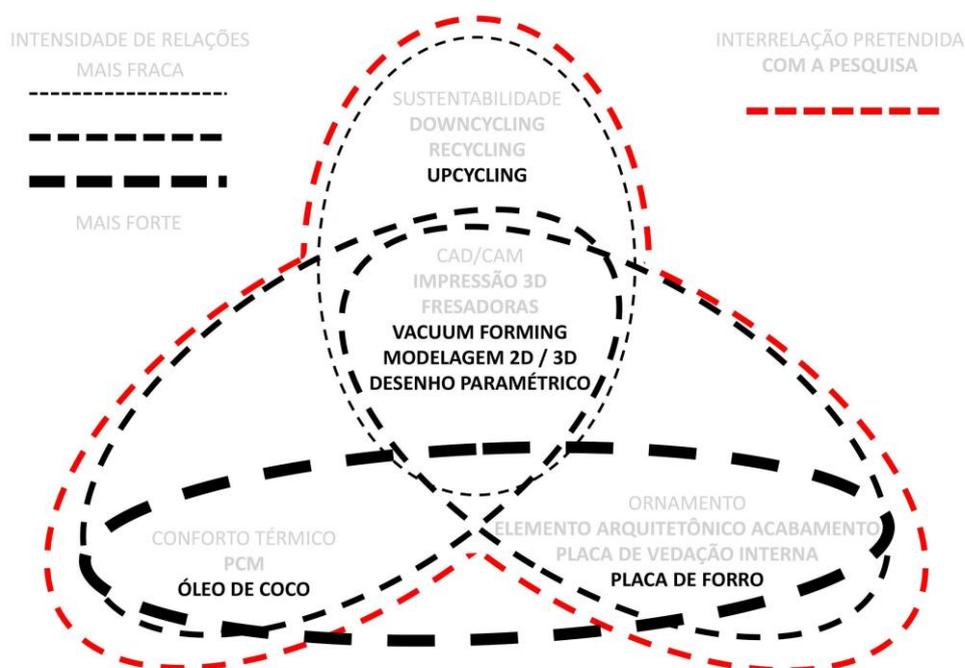
DESEMPENHO TÉRMICO	CAD/CAM
<i>Phase Change Materials</i>	<i>Vacuum forming</i> , modelagem bidimensional e tridimensional
Trabalho desenvolvido entre o escritório de arquitetura Kieran Timberlake e <i>Centre for information technology and architecture</i>	

ORNAMENTO	CAD/CAM
Placas decorativas	<i>Vacuum forming</i> , modelagem bidimensional e tridimensional
Produtos comerciais - Revestimentos 3D produzidos em plástico com diferentes texturas e produzidos através de <i>vacuum forming</i>	

DESEMPENHO TÉRMICO	ELEMENTOS DE ACABAMENTO (ornamento)
<i>Phase Change Materials</i>	Placas de aplicação interna em paredes e forros
Produtos comerciais - Placas de acabamento interno incorporando PCM para controle passivo de temperaturas	

O infográfico da figura 61 mostra a relação entre os diversos temas da pesquisa.

Figura 63: Inter relações entre os temas de pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor

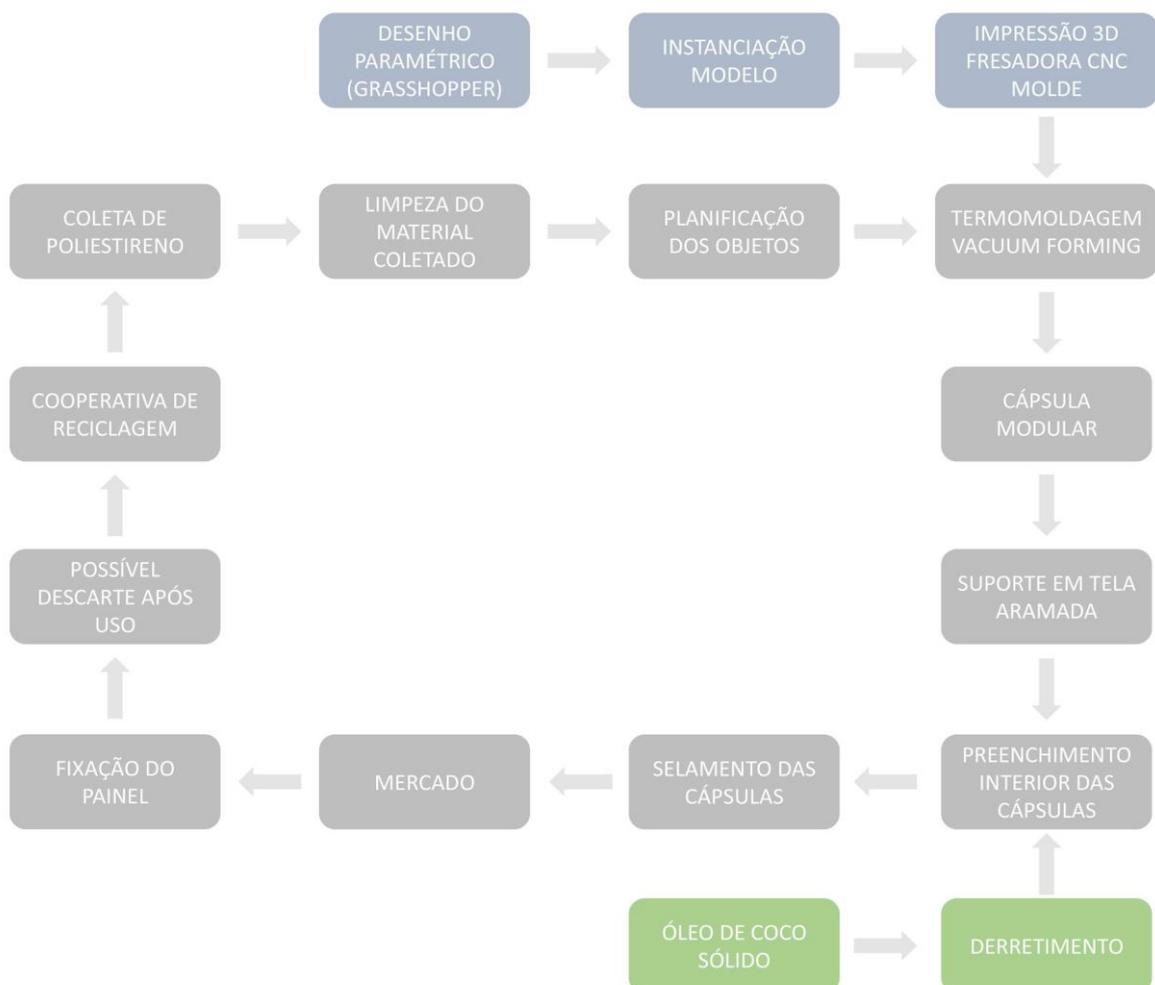
O infográfico evidencia que a relação mais forte é entre os elementos arquitetônicos de acabamento e o PCM, pela grande quantidade de produtos já encontrados no mercado. A relação entre os elementos arquitetônicos de acabamento com sistemas CAD/CAM já apresenta produtos no mercado como os revestimentos 3D fabricados através de termomoldagem, mas ainda é uma iniciativa incipiente e sem grandes desdobramentos até o momento. Pelo trabalho desenvolvido entre o escritório de arquitetura Kieran Timberlake e o *Centre for information technology and architecture*, pode-se perceber que já foi pensada a utilização de *vacuum forming* para contenção de PCM em painéis. Dessa forma, a pesquisa continua nessa linha de desenvolvimento. A relação mais fraca encontrada, com necessidade de atenção no desenvolvimento do projeto, foi o *upcycling* de materiais descartados utilizando sistemas CAD/CAM. Apesar de serem encontradas iniciativas nesse sentido, o foco é voltado para arquiteturas efêmeras e instalações artísticas com características diferentes de sistemas construtivos duráveis empregados na arquitetura.

Outras informações que podem ser verificadas no infográfico são os destaques com letras em negrito sobre as definições do que foi considerado dentro de cada um dos temas. O UPCYCLING de materiais descartados utilizando DESENHO PARAMÉTRICO para MODELAGEM 2D / 3D e produção em VACUUM FORMING de PLACAS DE FORRO incorporando ÓLEO DE COCO como *phase change material*.

4.2.6 Desenvolvimento do artefato

A partir das definições de projeto, elaborou-se uma sequência de atividades para o desenvolvimento do artefato, desde a matéria prima até sua produção final.

Figura 64: Sequência de atividades para o desenvolvimento do artefato



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.6.1 Coleta de material

Pelos resultados positivos com o poliestireno, esse material foi selecionado para dar prosseguimento à pesquisa, mas sua reduzida espessura foi um fator que exigiu atenção e alterações no desenvolvimento pois, apesar de favorecer as trocas térmicas, pode reduzir a durabilidade do artefato;

4.2.6.2 Limpeza do material coletado

O plástico recolhido passou por um processo de limpeza para retirada de impurezas e uniformidade do material empregado na produção do artefato;

4.2.6.3 Planificação dos objetos

Os materiais coletados em diferentes formas foram planificados para serem submetidos à termomoldagem a vácuo (*vacuum forming*). Na maior parte dos casos, o material consistiu em pratos de festa que tiveram suas abas cortadas para reduzir a área apenas a parte plana.

Concomitantemente, foram efetuadas atividades relativas ao desenvolvimento do molde para a termomoldagem:

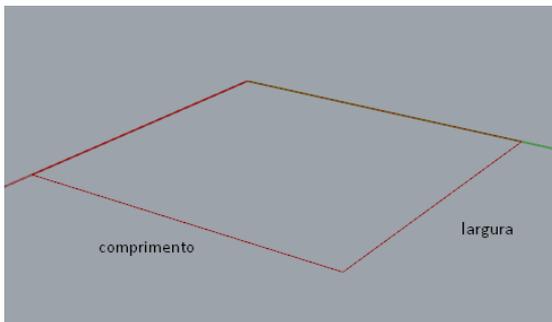
4.2.6.4 Desenho paramétrico

A modelagem do molde é realizada por meio de um algoritmo computacional desenvolvido no plugin Grasshopper do software Rhinoceros, possibilitando sua personalização por diferentes usuários e características. De acordo com Hart (1996), o conceito de personalização em massa está intimamente ligado à lógica produtiva da indústria e se diferencia da produção em massa por permitir que o usuário obtenha produtos adaptados às suas necessidades com alterações a partir de um produto base. Além disso, mantém-se o aspecto de se fabricar um produto de alta performance garantido pela precisão industrial. A personalização do processo produtivo implica no encurtamento do ciclo de vida produtivo e no tempo de espera para a introdução de novos produtos no mercado de maneira a atender consumidores individuais e pequenos segmentos do mercado globalizado por meio de uma abrangente rede de informações.

Os parâmetros a serem considerados no algoritmo computacional relacionam-se às dimensões da base para se adaptar a diferentes telas aramadas comerciais como suporte ao painel de forro a ser composto, altura da base para início das aletas, quantidade de aletas a serem instaladas no módulo e altura das aletas para especificar o volume de PCM em seu interior.

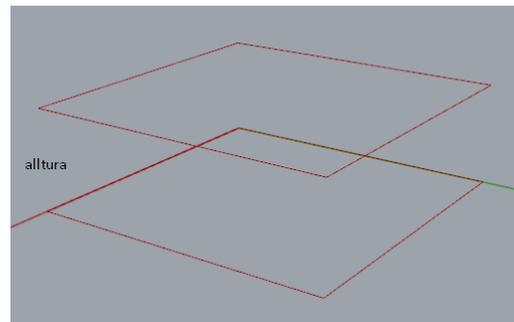
O algoritmo computacional desenvolvido em grasshopper se inicia com um retângulo controlando o comprimento e a largura da base do molde. Em seguida, o retângulo é deslocado no eixo Z regulando a altura da base para se iniciar as aletas acima desse parâmetro.

Figura 65: Dimensões da base do molde



Fonte: Elaborado pelo autor

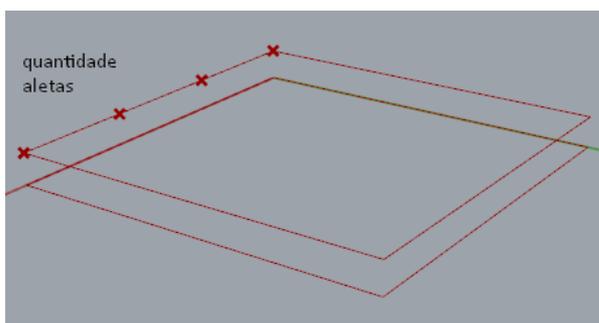
Figura 66: Altura da base do molde



Fonte: Elaborado pelo autor

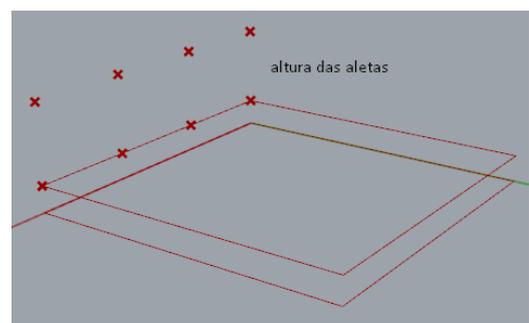
A partir da base elevada, divide-se uma das arestas na quantidade de aletas desejada e os pontos encontrados são movidos no eixo Z determinando a altura das aletas do molde.

Figura 67: Divisão de aresta na quantidade de aletas desejada para o molde



Fonte: Elaborado pelo autor

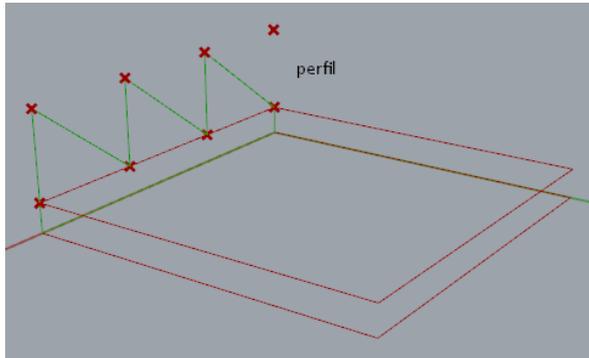
Figura 68: Deslocamento dos pontos na altura para as aletas do molde



Fonte: Elaborado pelo autor

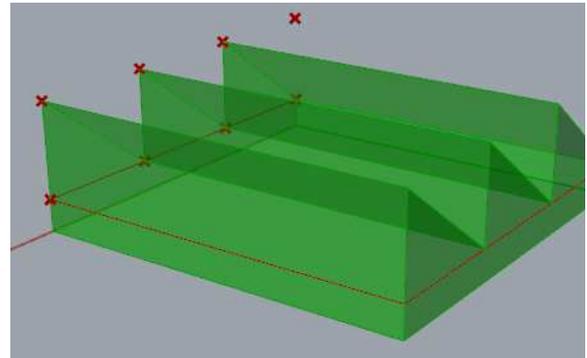
Com os pontos delimitados, o perfil do molde é traçado e serve de polígono a ser extrudado em uma das direções do molde.

Figura 69: Perfil do molde em uma de suas direções



Fonte: Elaborado pelo autor

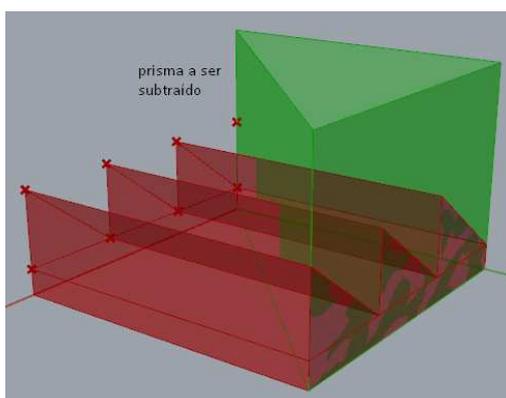
Figura 70: Extrusão do perfil



Fonte: Elaborado pelo autor

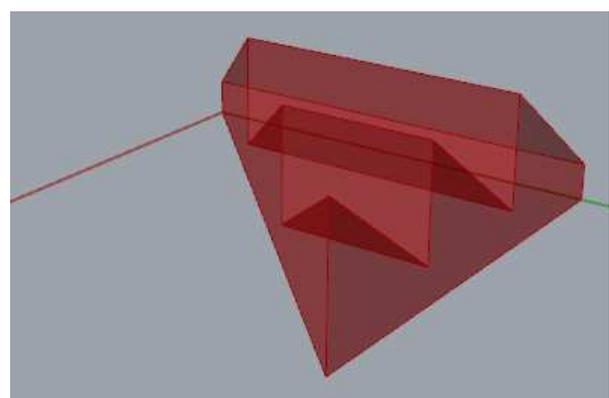
O perfil extrudado é trabalhado com uma simetria diagonal para que as aletas possuam um desenho e possam ser configuradas de diversas maneiras na base do painel de forro. Assim, o modelo desenvolvido até o momento é subtraído por um prisma composto pela metade diagonal da base.

Figura 71: Prisma a ser subtraído do modelo



Fonte: Elaborado pelo autor

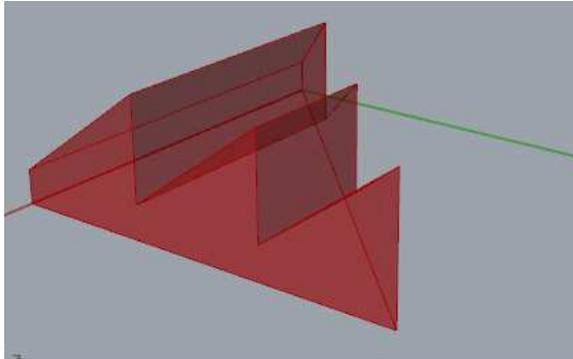
Figura 72: Metade diagonal do molde



Fonte: Elaborado pelo autor

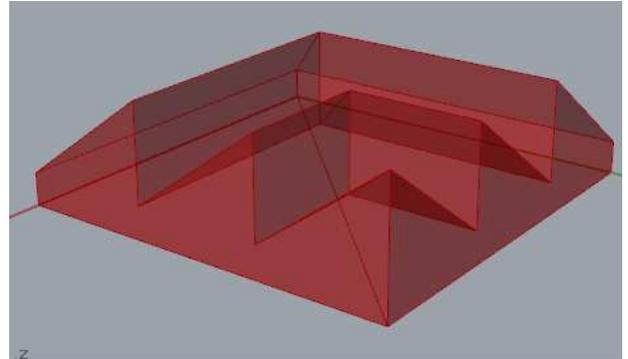
A outra metade simétrica do modelo é desenvolvida da mesma maneira e são unidas para configurar o molde final.

Figura 73: Segunda metade diagonal do molde



Fonte: Elaborado pelo autor

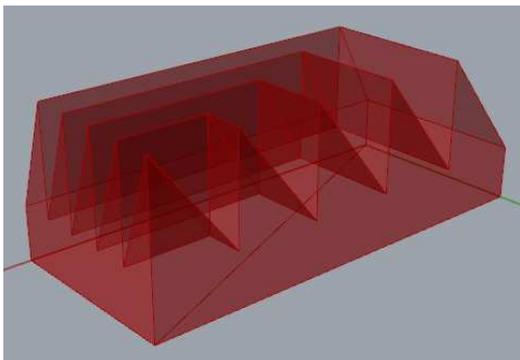
Figura 74: Modelo final do molde



Fonte: Elaborado pelo autor

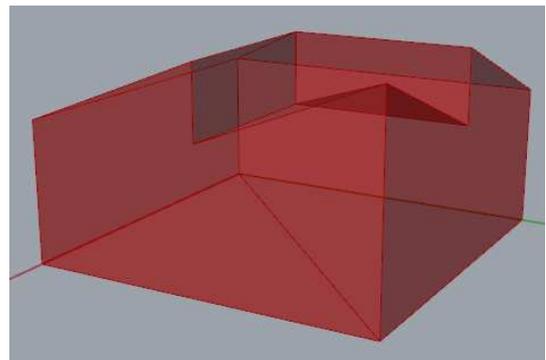
A partir dos parâmetros estabelecidos, diversos modelos podem ser configurados de maneira rápida e fácil para usuários leigos. Em etapas futuras, uma interface simplificada pode ser desenvolvida deixando apenas os parâmetros acessíveis aos usuários e oferecendo o molde como resultado.

Figura 75: Resultado possível de modelo para molde (01)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 76: Resultado possível de modelo para molde (02)



Fonte: Elaborado pelo autor

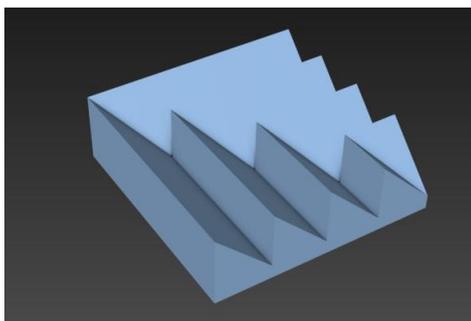
4.2.6.5 Instanciação

Com as diversas possibilidades de modelos, o usuário pode selecionar a que melhor atende suas expectativas e gerar uma instanciação desse algoritmo para produção do molde.

4.2.6.6 Produção do modelo

A partir da instanciação, o molde é produzido com auxílio computacional em impressoras 3D ou fresadoras CNC dependendo do material disponível ou melhor indicado para a termomoldagem. O modelo de molde desenvolvido para a atual pesquisa consistiu em uma base quadrada de 45 mm, altura da base de 5 mm com 4 aletas de 10 mm de altura. Dessa forma, o molde foi obtido por meio de impressão 3D FDM (*fused deposition modeling*) – modelagem por deposição de filamentos plásticos aquecidos por um extrusor. O dimensionamento é compatível com os materiais de pequenas dimensões (copos e pratos descartáveis) usualmente encontrados em cooperativas de reciclagem.

Figura 77: Modelo para o molde de testes



Fonte: Elaborado pelo autor

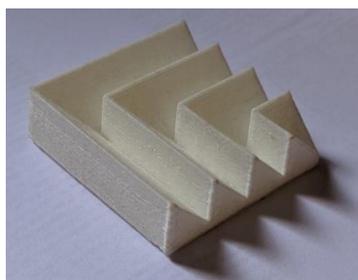
Figura 78: Molde impresso em impressora 3D



Fonte: Elaborado pelo autor

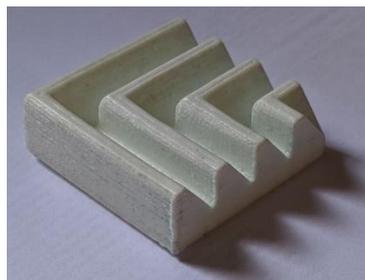
Foram realizados testes preliminares do molde em termomoldagem e verificou-se a necessidade de bolear as arestas superiores das aletas do molde para reduzir a fragilidade da cápsula depois de termo moldada.

Figura 79: Molde inicial para testes em termomoldagem



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 80: Molde boleado para reduzir a fragilidade das aletas nas cápsulas

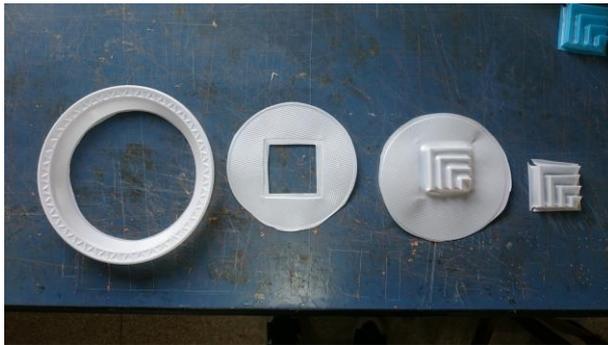


Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.6.7 Termomoldagem

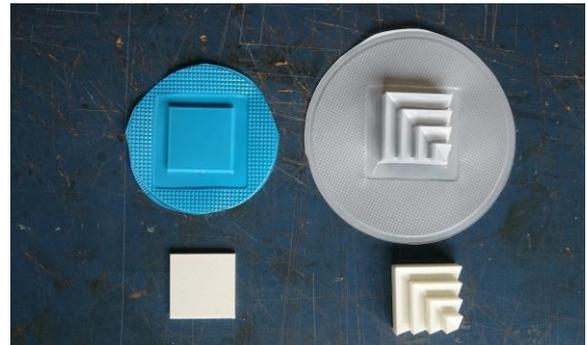
Voltando ao fluxo principal de desenvolvimento da placa de forro, o material plástico planificado é moldado por meio termomoldagem à vácuo utilizando o molde produzido em impressão 3D.

Figura 81: Processo de planificação por corte e resultado da termomoldagem



Fonte: Elaborado pelo autor

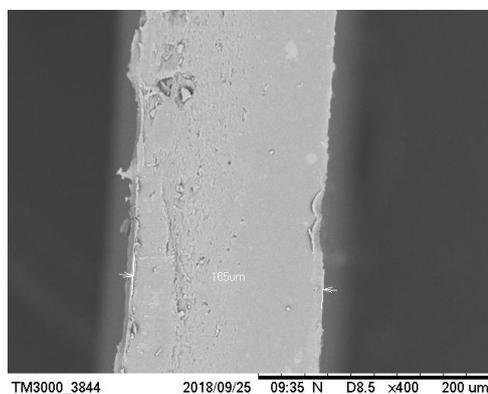
Figura 82: Resultado da termomoldagem em poliestireno



Fonte: Elaborado pelo autor

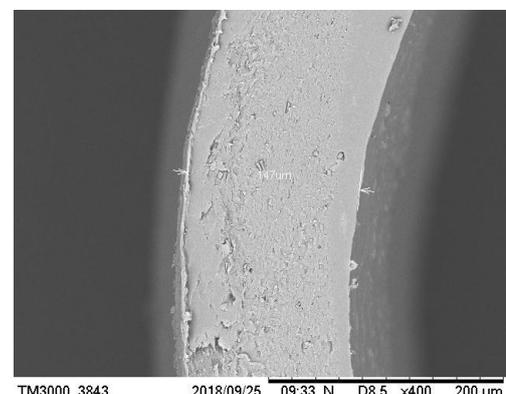
Após a termomoldagem, a primeira avaliação realizada nos modelos físicos foi a verificação de sua espessura antes e depois do processo, através de microscópio eletrônico de varredura. As análises contaram com o apoio do Laboratório de Microscopia Eletrônica da Unesp - Rio Claro e do técnico e professor Antonio Yabuki.

Figura 83: Espessura de 165 μ m em seção plana antes do processo de termomoldagem



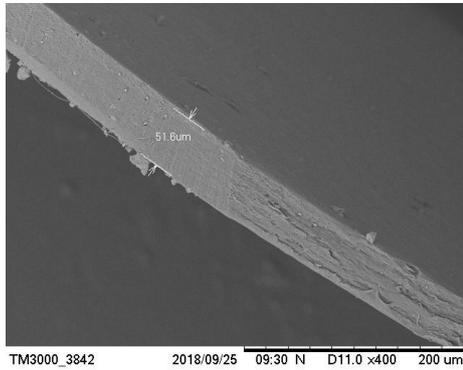
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 84: Espessura de 147 μ m em seção curva antes do processo de termomoldagem



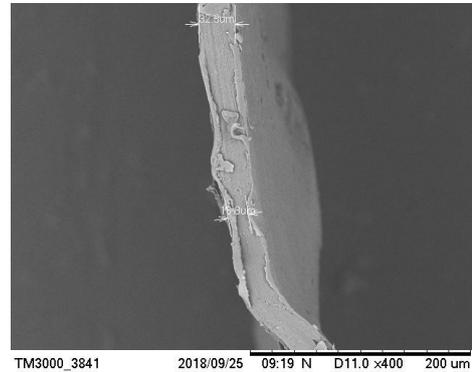
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 85: Espessura de 51,6 μ m depois da termomoldagem na seção plana



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 86: Espessura de 32,5 μ m depois da termomoldagem na seção curva



Fonte: Elaborado pelo autor

As espessuras finais exigem maior cuidado no manuseio das peças, mas não apresentaram problemas relacionadas à fragilidade durante os testes realizados na pesquisa.

4.2.6.8 Cápsulas modulares

As cápsulas resultantes do processo de termomoldagem foram armazenadas e também foram realizados testes de composição para efeitos estéticos com o mesmo módulo e diferentes configurações.

Figura 87: Teste de composição 01



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 88: Teste de composição 01



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 89: Teste de composição 02



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 90: Teste de composição 02



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 91: Teste de composição 03



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 92: Teste de composição 03

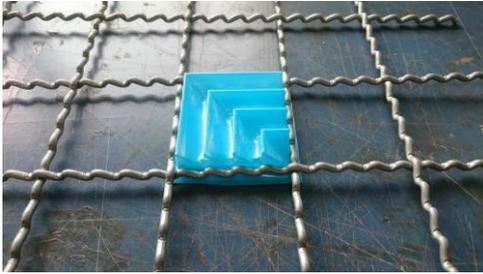


Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.6.9 Suporte em tela aramada

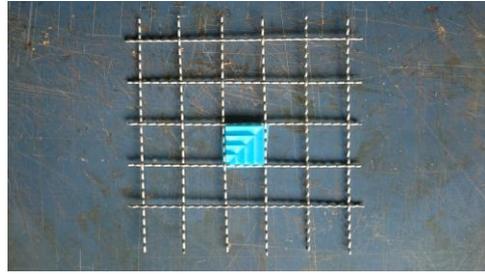
O suporte das cápsulas é baseado em uma tela aramada para encaixe dos módulos. Os vãos da tela não são regulares, variando alguns milímetros, mas o fato não apresentou problemas para a inserção das cápsulas.

Figura 93: Encaixe do módulo na tela aramada de suporte



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 94: Encaixe do módulo na tela aramada de suporte



Fonte: Elaborado pelo autor

O dimensionamento da base do molde para a termomoldagem relaciona-se diretamente aos vãos apresentados pela tela aramada de suporte para que as cápsulas possam ser encaixadas. A altura da base também se relaciona com a espessura da tela para que as aletas fiquem mais expostas para efeito visual.

4.2.6.10 Preenchimento interior das cápsulas

O óleo de coco a ser colocado nos módulos é aquecido para facilitar seu preenchimento e com o retorno à temperatura ambiente, o material se solidifica auxiliando a manipulação.

Figura 95: Cápsula preenchida com óleo de coco solidificado



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 96: Aspecto visual da cápsula preenchida



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.6.11 Selamento das cápsulas

Inicialmente, o selamento das cápsulas foi pensado de maneira mecânica por encaixe. Mas nos primeiros testes, verificou-se a dificuldade na manipulação do material por sua baixa espessura.

Figura 97: Tentativa de selamento da cápsula por encaixe



Fonte: Elaborado pelo autor

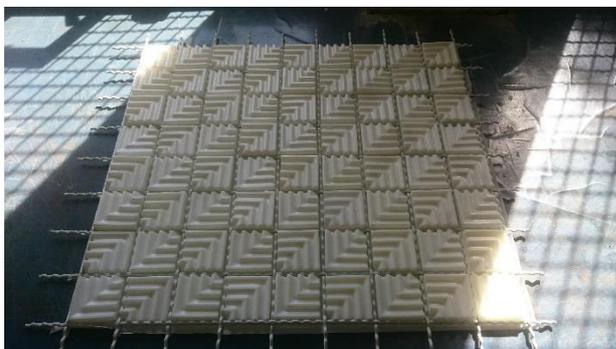
Figura 98: Tentativa de selamento da cápsula por encaixe



Fonte: Elaborado pelo autor

Como alternativa ao selamento mecânico, após o preenchimento das cápsulas e encaixe na tela aramada de suporte, a placa de forro foi selada com um laminado de PVC autoadesivo. Pela viscosidade do óleo de coco em contato com o poliestireno, a adesão não foi completamente eficiente, deixando pontos de contato do ar com o material encapsulado.

Figura 99: Aspecto visual da placa de forro depois de montada



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 100: Placa de forro selada com laminado de PVC autoadesivo



Fonte: Elaborado pelo autor

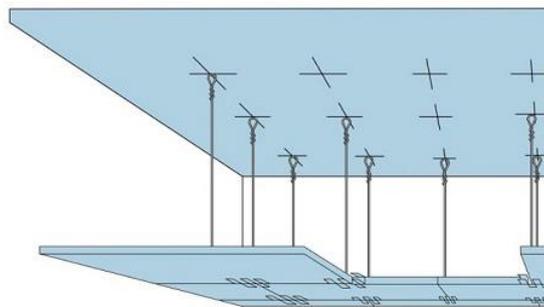
4.2.6.12 Mercado

A montagem da placa de forro permite a visualização de um protótipo de produto com a possibilidade de ser disponibilizado no mercado pelas cooperativas de reciclagem.

4.2.6.13 Fixação

A fixação das placas de forro pode ser realizada através de hastes metálicas presas na tela aramada de suporte e no teto do local onde será instalada. O funcionamento seria semelhante às estruturas para placas de forro de gesso.

Figura 101: Estrutura de fixação de placas de forro de gesso como referência ao artefato



Fonte: Autor desconhecido

4.2.6.14 Descarte

Em caso de posterior desuso do painel, ele poderá ser descartado com a separação de seus materiais componentes e encaminhados novamente às cooperativas de reciclagem.

5. AVALIAÇÃO DO ARTEFATO

5.1 Experimento - Desempenho térmico

Para avaliação do artefato, foi desenvolvido um experimento controlado. Duas caixas foram produzidas em compensado de madeira com 5 mm de espessura

com uma camada externa de isolamento térmico em EPS – Poliestireno expandido (isopor) de 20 mm de espessura. A dimensão final das câmaras é de 650 mm de comprimento, 590 mm de largura e 600mm de altura com acabamento na cor natural do EPS, branco. Os fundos das caixas, que não serão expostos ao sol, possuem espessura de 15 mm e acabamento na cor preta.

As tampas das caixas também foram produzidas em compensado de madeira com 5 mm de espessura e isolamento externo térmico em EPS de 10 mm de espessura. Para simular a proteção térmica das vedações, uma placa adicional de EPS com dimensões de 1000 mm de comprimento, 820 mm de largura e 3 mm de espessura foi instalada com um espaçamento de 50 mm entre as placas para permitir a circulação de ar entre elas e configurar um beiral em suas extremidades.

O painel de forro constituído pelas cápsulas preenchidas com PCM foi fixado na tampa de uma das câmaras com uma distância de 50 mm da mesma, enquanto a outra, sem dispositivo de controle ambiental que pudesse interferir em suas condições climáticas, serviu de controle. Por possuírem pequenas dimensões, os módulos do painel não foram escalados de acordo com a maquete, foram instalados em suas dimensões reais. Dessa forma, os resultados encontrados não serão diretamente proporcionais às condições reais, mas servirão de base para comparação entre as diferentes condições experimentadas.

Figura 102: Instalação da placa de forro sob a tampa inferior da câmara



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 103: Instalação da placa de forro sob a tampa inferior da câmara



Fonte: Elaborado pelo autor

Os instrumentos para medições das condições térmicas tiveram apoio do Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada coordenado pela Profa. Dra. Lucila Labaki e foram constituídos por:

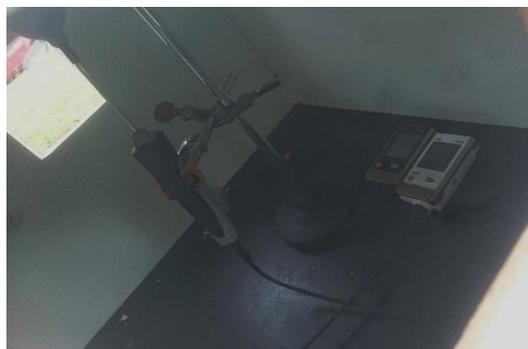
- *Data logger* de temperatura e umidade, modelo 175-H1, marca Testo
- *Data logger* de temperatura com 2 canais, modelo 175-T2, marca Testo – medição por convecção e radiação (temperatura de globo)

Figura 104: Placa de forro instalada no interior da câmara



Fonte: Elaborado pelo autor

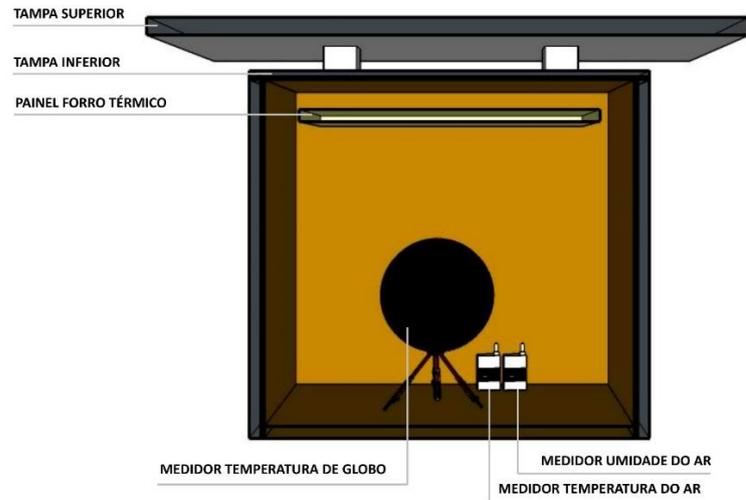
Figura 105: Equipamentos instalados no interior da primeira câmara de teste



Fonte: Elaborado pelo autor

Inicialmente, o experimento foi pensado com aberturas em faces paralelas das câmaras para simular a ventilação natural cruzada pelo ambiente conforme indicado pela norma NBR 15220. Mas em testes preliminares, os resultados mostraram que a circulação de ar reduzia a interferência da placa de forro térmico nas condições do ambiente, dificultando a visualização e análise comparativa entre os resultados obtidos pelas diferentes câmaras. Os resultados preliminares condizem com as estratégias bioclimáticas indicadas pelo LABEEE (2018) em que a inércia térmica só tem efeito se a ventilação natural através dos ambientes internos for restringida ao longo do dia, uma vez que com a ventilação a temperatura interna varia de acordo com o meio externo diretamente, sem o atraso térmico característico do fluxo de calor através dos materiais envoltórios. Dessa forma, as aberturas foram fechadas com as mesmas características da vedação adjacente para regularizar as condições experimentadas.

Figura 106: Corte esquemático maquete para simulação térmica



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 107: Vista longitudinal da câmara montada



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 108: Vista transversal da câmara montada



Fonte: Elaborado pelo autor

O experimento ocorreu em ambiente externo da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas sem interferência de sombra de edifícios ou árvores no período de 26/06/2019 a 30/06/2019.

Figura 109: Localização de instalação das câmaras



Fonte: Google Maps

Figura 110: Câmaras instaladas no local do experimento



Fonte: Elaborado pelo autor

5.2. Resultados - Desempenho térmico

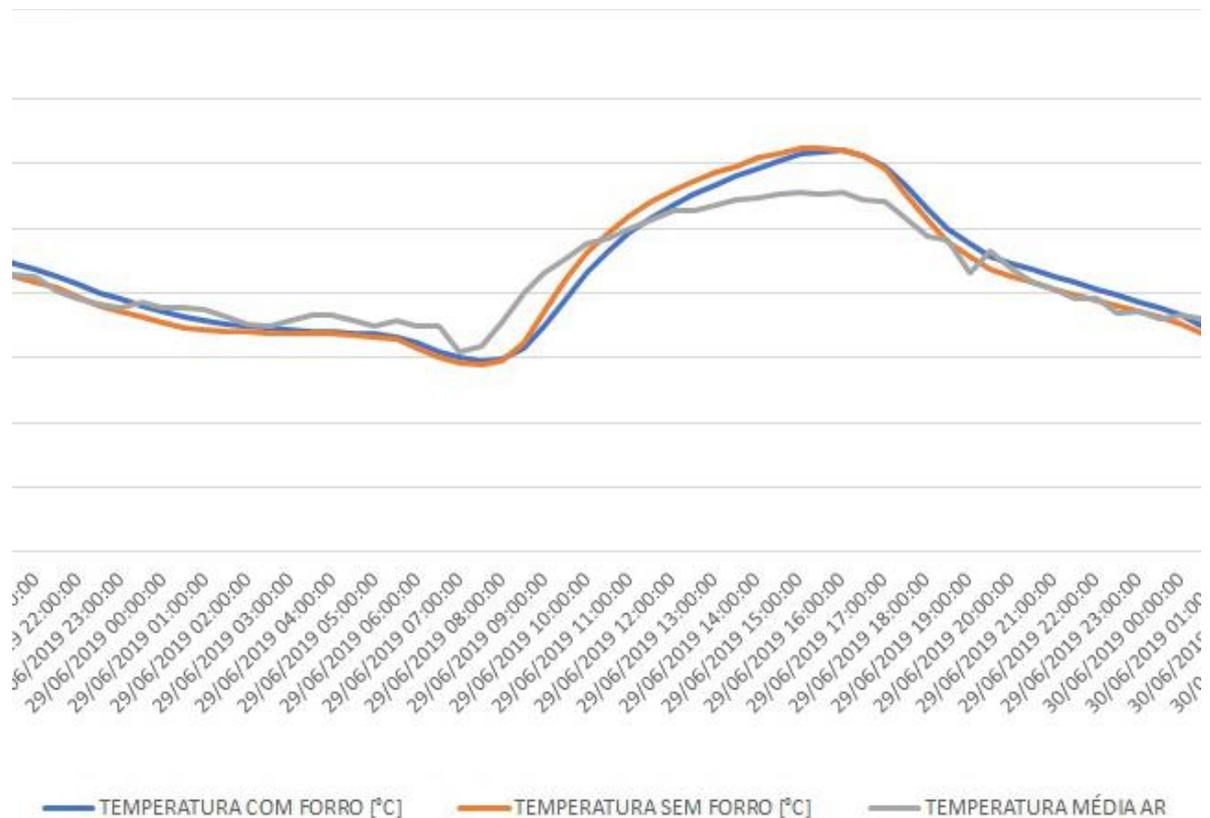
A partir das condições experimentadas, pode-se analisar a diferença entre as temperaturas medidas nas diferentes câmaras:

Figura 111: Temperaturas medidas por convecção no período de 26/06/2019 a 30/06/2019



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 112: Temperaturas medidas por convecção no dia 29/06/2019 com comportamento típico para o período analisado pelo experimento



Fonte: Elaborado pelo autor

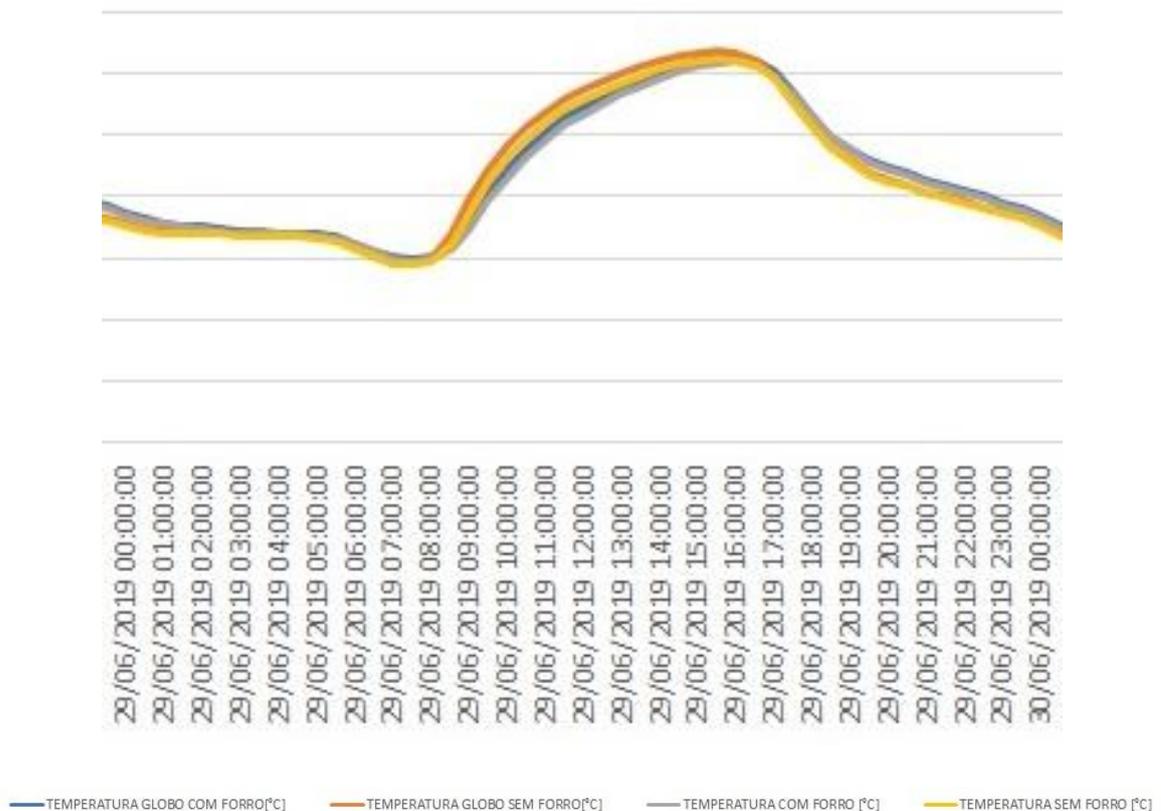
A seção do gráfico apresenta o resultado de um dia típico no período amostrado onde o atraso térmico ocasionado pelo painel de forro desenvolvido pela atual pesquisa (câmara 01) em relação à câmara sem dispositivo de controle ambiental (câmara 02) pode ser observado: no início do dia, a câmara 01 apresenta temperaturas menores que a 02 até aproximadamente 15:00, onde atingem a mesma condição de temperatura máxima e a partir disso, no período de resfriamento, a câmara 01 mantém o calor interno por mais tempo, apresentando temperaturas mais altas que a câmara 02. As diferenças de temperaturas no período de aquecimento do dia chegam a 1,6 °C, com a temperatura da câmara 01 menor que câmara 02, e 1,2 °C, com a temperatura da câmara 01 maior que a câmara 02, no período de resfriamento.

Os dados relativos à temperatura média do ar foram obtidos com o Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicada à Agricultura – CEPAGRI na

UNICAMP. Em análise comparativa, as duas câmaras apresentam comportamento semelhante, levando maior tempo para se aquecer devido à ausência de circulação de ar no interior da caixa, armazena esse calor atingindo temperaturas mais altas que o ambiente externo e entram em situação próxima ao equilíbrio no período da noite. Na comparação entre as temperaturas das câmaras e temperatura média do ar também há necessidade de considerar a diferença no local de tomada dos dados, uma vez que os dados do CEPAGRI são medidos por uma estação meteorológica localizada nas dependências do centro de pesquisa.

Com relação ao calor radiante, ou seja, transmitido por radiação, o experimento contou com a medição de temperatura por termômetro de globo, apresentando temperaturas mais elevadas que o termômetro de convecção no período de maior radiação solar, das 8:00 às 16:00. Após esse período, ambos registraram índices de temperatura muito próximos.

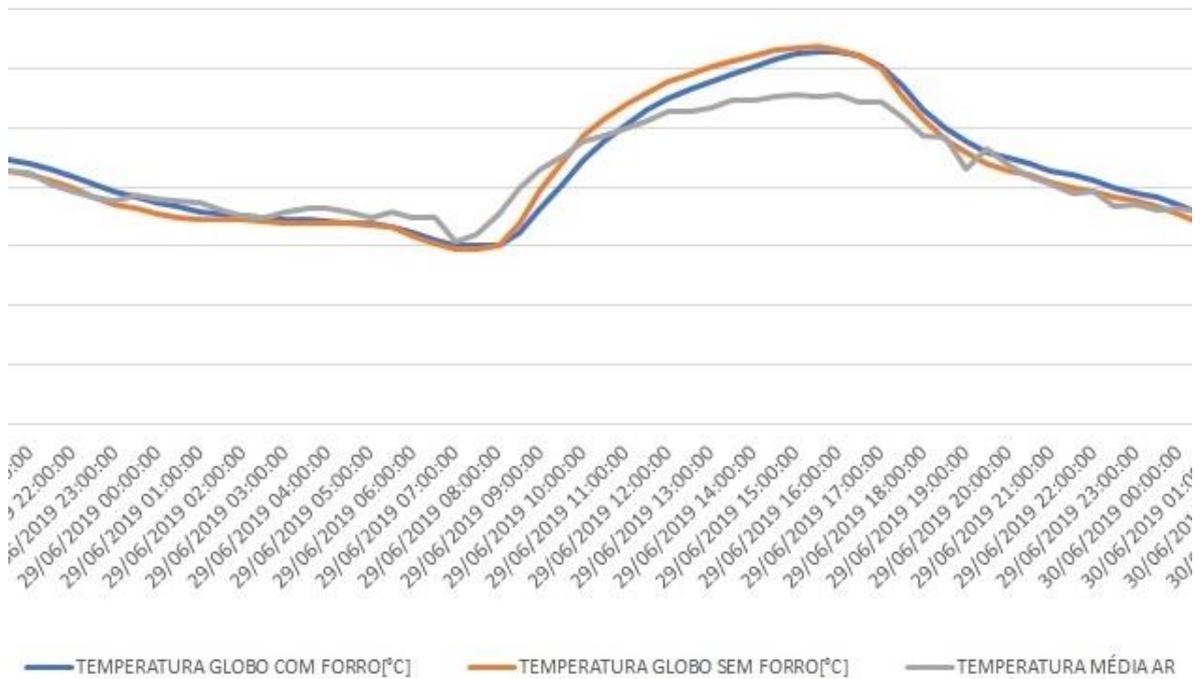
Figura 113: Temperaturas medidas por convecção e radiação no dia 29/06/2019 com comportamento típico para o período analisado pelo experimento



Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando apenas o uso do painel desenvolvido pela atual pesquisa, chega-se a seguinte amostra:

Figura 114: Temperaturas medidas por radiação no dia 29/06/2019 com comportamento típico para o período analisado pelo experimento



Fonte: Elaborado pelo autor

O comportamento geral é semelhante às temperaturas medidas por convecção, mas a diferença entre as temperaturas da câmara 01 e 02 alcançaram 2 °C em torno das 10:00 da manhã. No período de resfriamento, a diferença se manteve com o máximo de 1,2 °C com as temperaturas da câmara 01 maiores que a câmara 02. A maior diferença entre as temperaturas se deve, principalmente, à absorção de radiação solar pelo painel de forro.

5.3 Custo de produção

Para análise do custo de produção do artefato, o painel de forro foi dividido em seus materiais componentes para produção referente a uma área de 1,00 m² com o intuito de facilitar a comparação com os produtos existentes no mercado de construção civil:

- Poliestireno: material disponível em resíduos plásticos coletados por cooperativas de reciclagem. Assim, o custo do material base torna-se irrisório.
- Óleo de coco: considerando o molde utilizado para o experimento da atual pesquisa, chega-se a um volume total medido por software de modelagem tridimensional de 28.827 mm³, ou seja, 0,028827 dm³ ou 0,028827 l. Descontando um percentual desse volume total pois o mesmo não é totalmente preenchido pelo óleo de coco, pode-se considerar aproximadamente 18,00 ml de óleo de coco por cápsula componente do painel. Para uma área de um metro quadrado e tela de suporte utilizada no experimento da pesquisa, são necessárias 324 cápsulas para sua produção. Assim, o volume de óleo de coco a ser calculado é de 5,832 l/m².
- Tela aramada: a tela utilizada na pesquisa é conhecida por diversos termos como otis, artística, crespa ou ondulada e composta por arame em aço corrugado galvanizado a fogo com espaçamento de 5,00 x 5,00 cm utilizada para confecção de alambrados.
- Fixação: foram considerados dois perfis guia com 1,00m de comprimento, quatro tirantes e parafusos para fixação da tela metálica no perfil guia.
- Custos indiretos: considerado um valor simbólico referente a água para limpeza dos materiais coletados e energia para termomoldagem à vácuo. A aquisição de equipamentos não foi considerada no cálculo.

Os valores unitários foram consultados em meios eletrônicos por contato com fornecedores e preços mínimos existentes.

Tabela 4: Custos para produção de um metro quadrado de painel de forro

ITEM		QUANTIDADE	PREÇO UNIT.	TOTAL
Poliestireno		-	R\$ 0,00	R\$ 0,00
Óleo de coco		5,8 l	R\$ 21,00	R\$ 121,80
Tela aramada		1 m ²	R\$ 22,90	R\$ 22,90
Estrutura de fixação	Perfil guia	2 m.l.	R\$ 3,23	R\$ 6,46
	Tirantes	4 un.	R\$ 0,72	R\$ 2,88
	Abraçadeira U	6 un.	R\$ 1,69	R\$ 10,08
Custos indiretos		-	R\$ 15,00	R\$ 15,00
TOTAL				R\$ 179,12

Fonte: Elaborado pelo autor

O componente de maior impacto sobre o valor final do artefato é o óleo de coco que pode considerar materiais semelhantes para redução de custos. Em comparação aos produtos existentes no mercado referidos anteriormente, os valores encontrados estão defasados, mas pode-se dizer que o custo do forro desenvolvido pela atual pesquisa aproxima-se dos menores valores encontrados.

Tabela 5: Comparação entre preços de produtos existentes no mercado e forro desenvolvido em pesquisa

PRODUTO	ANO DE CONSULTA	MENOR VALOR
F.E.S-Board®	2012	R\$ 121,50
DuPont™ Energain®	2014	R\$ 194,40
KNAUF COMFORTBOARD		
Forro desenvolvido pela pesquisa	2019	R\$ 179,12

Fonte: Elaborado pelo autor

6. CONCLUSÕES

A partir dos vários temas envolvidos no objetivo principal da pesquisa, pode-se distinguir alguns aspectos para organizar a discussão das conclusões: a aplicação de sistemas CAD/CAM em resíduos plásticos, os resíduos plásticos como elementos arquitetônicos de acabamento e o desempenho térmico do artefato criado.

A disponibilidade de equipamentos que envolvam sistemas CAD/CAM em seu funcionamento pôde ser observada nas diversas visitas a centros de pesquisa e *makerspaces* realizadas durante a pesquisa. Apesar da existência desse parque de equipamentos não poder ser mais considerada como um fator limitante a sua incorporação em processos de projeto e fabricação, ainda existe uma limitação referente ao conhecimento técnico exigido na operação destes sistemas. Ainda que os mesmos espaços existentes ofereçam atividades de formação, ao considerar a baixa escolaridade e nível de conhecimento técnico dos catadores, houve a

necessidade de se investigar os maquinários com menor nível de complexidade com o intuito de aumentar a possibilidade de sucesso desses agentes se apropriarem das atividades propostas em pesquisa.

A termomoldagem surgiu como um processo de baixo nível tecnológico com a possibilidade de incorporação de outras tecnologias envolvidas na produção do molde utilizado nestes equipamentos. Os experimentos mostraram que nem todos os tipos de plásticos coletados como resíduos podem ser utilizados no processo de fabricação, mas ainda assim, há uma grande quantidade de resíduos ligados principalmente a copos e pratos descartáveis, fabricados em poliestireno, que podem ser impactados pelos processos desenvolvidos em pesquisa.

O estigma da fragilidade dos produtos fabricados com materiais reutilizados se manifestou no desenvolvimento do artefato. Pelo poliestireno já ser um material de baixa espessura em produtos comerciais, seu aquecimento e distensão na termomoldagem acabam reduzindo-a, demonstrando pontos de fragilidade no manuseio das cápsulas componentes do painel de forro desenvolvido em pesquisa. Ainda que o molde tenha sido adaptado para reduzir os pontos de fragilidade, para garantir sua viabilidade comercial, seria necessário um aprofundamento nos estudos referentes a sua durabilidade e estanqueidade.

A incorporação de aspectos estéticos nos resíduos plásticos tornou possível sua apresentação como um elemento arquitetônico de acabamento ornamental. Para isso, ferramentas de desenho paramétrico foram utilizadas para gerar a forma das cápsulas e permitir sua personalização em massa. A etapa de programação, como a fase menos acessível a pessoas com baixo conhecimento técnico no desenvolvimento do artefato, poderia ser disponibilizada por meio de uma interface simples objetivando a geração dos moldes a serem utilizados na termomoldagem a vácuo.

Ao aproximar processos de desenho paramétrico a resíduos plásticos, o artefato promove uma combinação racional e criativa de novos conceitos de *design* e novas tecnologias usando diferentes tipos de fontes de informações e entrada de dados.

Os resultados do experimento realizado pela pesquisa mostram que o uso do óleo de coco como *phase change material* pode ser considerado como relevante para melhorar o desempenho térmico das edificações. Enfatiza-se que o experimento realizado pode ser considerado apenas como uma prova de conceito. Em desenvolvimento futuro, seria necessário avaliar diferentes alternativas de *design* e suas respectivas performances e durabilidades. Apesar disso, a incorporação do óleo de coco, como alternativa aos produtos já existente no mercado, nas cápsulas do painel de forro se mostrou positiva e promissora.

A pesquisa se baseou em um pensamento sistêmico com a consideração de diversas áreas, temas e profissionais envolvidos. Dessa forma, o desenvolvimento do artefato necessitou de uma abrangência superficial de cada um dos aspectos relacionados para que se alcançasse um resultado. Em etapas futuras, seria necessário o aprofundamento em cada um deles para a viabilidade comercial do painel de forro.

6.1 Generalização dos resultados

Seguindo o contexto do compartilhamento de informações, pretende-se auxiliar aspectos de sustentabilidade pela divulgação do conhecimento sobre a reutilização de materiais incentivando iniciativas análogas. A pesquisa pode ter prosseguimento, como trabalho futuro, com a implementação de uma *startup* em conjunto com fornecedores do material com o objetivo de efetivar os métodos desenvolvidos, podendo ser submetido ao programa PIPE - Pesquisa Inovativa em Pequenas Empresas da Fapesp.

O desenvolvimento da pesquisa nas etapas descritas pela metodologia de *Design Science Research* pode contribuir para a disseminação de sua utilização na criação de artefatos. Além disso, o processo envolvendo o *upcycling* de resíduos plásticos por meio de sistemas CAD/CAM pode ser transposto a outros materiais descartados.

A utilização do óleo de coco como *phase change material* contribui para a formação de uma base de conhecimento da sua utilização podendo ser estendida e comparada a outras alternativas aos produtos existentes no mercado. Além disso, os

resultados referentes à melhoria do desempenho térmico para a região de Campinas podem ser transpostos a outras regiões com características climáticas semelhantes.

6.2 Comunicação dos resultados

6.2.1 Comunicações preliminares

Durante o andamento da pesquisa, houve algumas oportunidades de compartilhamento da proposta com a contribuição da comunidade científica em seu desenvolvimento.

O grupo de pesquisadores envolvidos na pesquisa submeteu um resumo da pesquisa ao congresso *Research Culture in Architecture*, uma conferência internacional de colaboração interdisciplinar, realizada em Kaiserslautern - Alemanha, com o objetivo de discutir tópicos e métodos em pesquisa arquitetônica, focando suas relações interdisciplinares e sua relevância para o próprio processo de design. Nos dias 27 e 28 de setembro de 2018, a Profa. Dra. Maria Gabriela Caffarena Celani participou do evento e apresentou o projeto de pesquisa. Além da contribuição dos participantes do evento, a professora pôde conhecer pessoalmente o grupo de pesquisa da Profa. Dra. Sabine Hoffmann e as instalações do Laboratório do Departamento de meio ambiente construído da TUK, e verificar as possibilidades de contribuição entre os dois centros de pesquisa.

Além da conferência, o projeto de pesquisa também foi submetido ao *Falling Walls Lab*, um evento com um formato inovador para as instituições acadêmicas mostrarem a qualidade, diversidade e paixão da próxima geração de pesquisadores. O concurso é organizado mundialmente sob a licença da *Falling Walls Foundation* - Alemanha em parceria com o Centro Alemão de Ciência e Inovação - São Paulo (DWIH-SP) para a realização da etapa regional brasileira. A intenção do evento é selecionar ideias inspiradoras de pesquisa para vencer as barreiras do tema trabalhado. No Brasil, foram inscritas mais de oitenta pesquisas com a seleção de quinze pesquisadores para participar da final nacional em São Paulo.

No dia dois de outubro de 2018, o autor da pesquisa foi selecionado para participar da final nacional onde teve três minutos para explicar, em inglês, a proposta de pesquisa, seu desenvolvimento e o impacto esperado na sociedade.

Embora este projeto não tenha sido selecionado para representar o Brasil no concurso mundial, a participação na etapa final da seleção permitiu a aproximação com diversas pesquisas desbravadoras e interessantes.

6.2.2 Comunicações futuras

Um artigo científico explicando o desenvolvimento da pesquisa foi submetido no periódico *Gestão & Tecnologia de Projetos* - Classificação B1 Qualis CAPES e aguarda parecer de avaliação. Além disso, órgãos como o INOVA UNICAMP também poderão ser consultados para apresentação da proposta, a fim de verificar a possibilidade de geração de patente. Apesar disso, o intuito principal é gerar conhecimento apto a ser compartilhado com agentes de cooperativas de reciclagem, para que a produção pertença a eles, consolidando o aspecto da sustentabilidade socioeconômica envolvida na pesquisa.

7. REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220**: Desempenho Térmico de Edificações. Rio de Janeiro, 2005.

ABRELPE. **Estimativas dos custos para viabilizar a universalização da destinação adequada de resíduos sólidos no Brasil**. ABRELPE, 2015.

ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo: ABRELPE, 2017. Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/panorama>>. Acesso em 25 de out. de 2017.

AGÊNCIA EUROPEIA DO MEIO AMBIENTE. **Highest recycling rates in Austria and Germany**. 2013. Disponível em: <<https://www.eea.europa.eu/media/newsreleases/highest-recycling-rates-in-austria>>. Acesso em: 05 de abr. de 2019.

AGENDA 2030. **Nações Unidas do Brasil**, São Paulo, 13 de out. de 2015. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030>>. Acesso em 25 de out. de 2017.

ANDERY, M. A. *et al.* **Para compreender a ciência: uma perspectiva histórica**. Rio de Janeiro: EDUC, 2004.

ARVOLEA, A. Cooperativa de Rio Claro é referência internacional. *Jornal Cidade de Rio Claro*, 2014. Disponível em: <https://www.jornalcidade.net/cooperativa-de-rio-claro-e-referencia-internacional/11376/>. Acesso em 13 mar. 2018.

BAETENS, R.; JELLE, B. P.; GUSTAVSEN, A. Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 9, p. 1361–1368, 1 set. 2010.

BAERLECKEN, D. M.; DUNCAN, D. "**Junk: Design build studio**." em *Beyond codes and pixels: Proceedings of the 17th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia*, 305-314. CAADRIA. Chennai, India: The Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia, 2012

BARBOSA NETO, W. **Do projeto à fabricação: um estudo de aplicação da fabricação digital no processo de produção arquitetônica**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, 2013.

BENVINDO, A. Z. **A nomeação no processo de construção do catador como ator econômico e social**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

BORGES, C. A. de M. **O conceito de desempenho de edificações e a sua importância para o setor da construção civil no Brasil**. 2008. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

CATADORES de recicláveis de Rio Claro trabalham em espaço sem estrutura. G1, São Carlos, 29 de mar. de 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/sao-carlos-regiao/noticia/catadores-de-reciclaveis-de-rio-claro-trabalham-em-espaco-sem-estrutura.ghtml>>. Acesso em: 15 de jun. de 2018.

DAFT, R. L.; LEWIN, A. Y. Rigor and relevance in organization studies: idea migration and academic journal evolution. **Organization Science**, v. 19, n. 1, p. 177-183, 2008.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES, J.A.V. **Design Science research : método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. Porto Alegre: Bookman, 2015.

FAIRCLOTH, B. *et al.* Multiscale modeling frameworks for architecture: Designing the unseen and invisible with phase change materials. **International Journal of Architectural Computing**, v. 16, n. 2, p. 104–122, jun. 2018.

FÓRUM ECONÔMICO MUNDIAL. **Germany recycles more than any other country**. 2017. Disponível em: <<https://www.weforum.org/agenda/2017/12/germany-recycles-more-than-any-other-country/>>. Acesso em: 05 de abr. de 2019.

GIVONI, B. *Comfort, climate analysis and building design guidelines*. in: **Energy in Buildings**, vol. 18, july/1992, pp. 11-23.

GIGLIO, T. G. F.; BARBOSA, M. J. Aplicação de métodos de avaliação do desempenho térmico para analisar painéis de vedação em madeira. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 6, n. 3, p. 91-103, 2006

GOLDRATT, E. M.; COX, R. E. **A meta**. São Paulo: IMAM, 1986.

GONÇALVES, H.; GRAÇA, J. M. **Conceitos bioclimáticos para os edifícios em Portugal**. [s.l.] DGGE/IP-3E, 2004.

GONÇALVES, J. C. **O controle social de terra e água no interior paulista**. Tese (doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

HART, C.W. Made to Order. **Marketing Management**, v. 5, n. 2, p. 10-23. 1996.

HATCHUEL, A. A foundationalist perspective for management research: a European trend and experience. **Management Decision**, v. 47, n. 9, p. 1458-1475, 2009.

HAWLADER, M. N. A.; UDDIN, M. S.; KHIN, M. M. Microencapsulated PCM thermal energy storage system. **Applied Energy**, 2003.

HEVNER, A. R. *et al.* Design science in information systems research. **MIS Quarterly**, v. 28, n. 1, p. 75- 105, 2004.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Pesquisa sobre pagamento por serviços ambientais urbanos para gestão de resíduos sólidos**. Brasília: Ipea, 2010. Disponível em: <<http://goo.gl/tTVr>>.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Situação Social das Catadoras e dos Catadores de Material Reciclável e Reutilizável - Brasil**. Brasília: Ipea, 2013. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=20986&Itemid=9>. Acesso em: 26 dez. 2018.

IRSYAD, M.; HARMEN. Heat transfer characteristics of coconut oil as phase change material to room cooling application. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 60, p. 012027, mar. 2017.

ISWA - INTERNATIONAL SOLID WASTE ASSOCIATION. Waste and Climate Change - ISWA White Paper. USA: **ISWA**, 2009. Disponível em: <https://www.iswa.org/fileadmin/user_upload/_temp_/WEB_ISWA_White_paper.pdf> . Acesso em 28 de nov. de 2017.

JONES, O. **The grammar of ornament: illustrated by examples from various styles of ornament**. New York: Dorling Kindersley Pub, 2001 (1856).

KALNÆS, S. E.; JELLE, B. P. Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities. **Energy and Buildings**, v. 94, p. 150–176, maio 2015.

KAMATH, A. V. Harnessing Information and Material Flows through the Digital Design and Fabrication to Upcycle Reclaimed Timber. **Spaces and Flows: An International Journal of Urban and ExtraUrban Studies**, v. 7, n. 4, p. 57–67, 2016.

LABEEE. **Inércia térmica para resfriamento**. Florianópolis, 20 de mar. de 2018. Disponível em: <http://projeteee.mma.gov.br/estrategia/inercia-termica-para-resfriamento>. Acesso em: 12 abr. 2018.

LAMBERTS, R., DUTRA, L., PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3ª Edição. São Paulo: Ed. PW Brasil, 2014.

LAMBERTS, R. **Disciplina: tópicos avançados em conforto térmico**. Florianópolis: UFSC, 2003. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/T%C3%B3picos%20Avan%C3%A7ados%20em%20Conforto%20T%C3%A9rmico%20-%20Wagner.pdf>. Acesso em: 26 set. 2018.

MANSON, N. J. Is operations research really research?. **ORION**, v. 22, n. 2, p. 155-180, 2006.

MCDONOUGH, W.; BRAUNGART, M. **Cradle to cradle: remaking the way we make things**. 1st ed ed. New York: North Point Press, 2002.

MEHLING, H.; CABEZA, L. F.; YAMAHA, M. *Phase change materials: application fundamentals*, in: PAKSO, H. Ö. (Ed.). **Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption**, Springer, 2007.

MONTEIRO, J. H. P. **Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Administração Municipal, 2001.

MONTEIRO, L. M. *Arquitetura da adaptação*. in: SOARES, J. C.;BODE, K (Orgs.). **Edifício Ambiental**. São Paulo: Oficina de textos, 2015.

MOREIRA, R. N. *et al.* O Modelo de Produção Sustentável Upcycling: o Caso da Empresa TerraCycle. **AMBIÊNCIA**, v. 14, n. 1, p. 72–84, 14 ago. 2018.

NEVES, L. O. **Arquitetura bioclimática e a obra de Severino Porto: estratégias de ventilação natural**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil, 2006.

NOSSO futuro comum (Relatório Brundtland). **ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS** Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento. Rio de Janeiro: Editora da Fundação Getulio Vargas, 1988. Disponível em: <<https://www.un.org/documents/ga/res/42/ares42-187.htm>>. Acesso em: 02 de mar. de 2019.

OLGYAY, V. **Arquitectura y clima – manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas**. Barcelona: Gustavo Gili, 1998.

O'LEARY, P. R. *et al.* **Decision Maker's Guide to Solid Waste Management**. v. 2. Washington DC: U.S. Environmental Protection Agency, 1999

PARKER, L. Um mar de plástico. **Revista National Geographic**, Lisboa, v.18, n. 207, p. 2-49, 2018.

PEREIRA, N. de C. **Rematerial-Oriented Design: A Framework for Architectural Upcycling**. Thesis—[s.l.] Curtin University, 2017.

PEREIRA, N. de C. Digital Craft and Upcycling: Tools, Technique and Material. **International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research**, p. 122–125, 2017.

PICON, A. **Ornament: the politics of architecture and subjectivity**. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley, A John Wiley and Sons Ltd, Publication, 2013.

PICON, A. **Digital culture in architecture: an introduction for the design professions**. Basel: Birkhäuser, 2010.

PULLEN, T. Phase Change Materials. **Homebuilding & Renovating**, Londres, 20 de mai. de 2012. Disponível em: <<https://www.homebuilding.co.uk/phase-change-materials>>. Acesso em 20 de jun. de 2018.

PUTRI, W. A. *et al.* Thermophysical parameters of coconut oil and its potential application as the thermal energy storage system in Indonesia. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 739, p. 012065, ago. 2016.

O que é vacuum forming. Instituto NCB, São Paulo. Disponível em: <<http://newtoncbraga.com.br/index.php/artigos/51-automotivos/694-o-que-e-vaccum-forming-art083.html>>. Acesso em: 16 de mar. de 2018.

RATHOD, M.K.; BANERJEE, J. Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: a review. **Sustain, Energy Rev.** 18, 2013.

SALEEL, C. A.; MUJEEBU, M. A.; ALGARNI, S. Coconut oil as phase change material to maintain thermal comfort in passenger vehicles: An experimental analysis. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 22 ago. 2018.

SARI, A.; KAYGUSUZ, K. Some fatty acids used for latent heat storage: thermal stability and corrosion of metals with respect to thermal cycling, *Renew, Energy* 28, 2003.

SCHOSSIG, P.; HENNING, M.; GSCHWANDER, S.; HAUSSMANN, T. Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials. **Energy Mater**, Sol. Cells 89, 2005.

SHARMA, A.; TYAGI, V.V.; CHEN, C.R.; BUDDHI, D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. **Sustain, Energy Rev.**13, 2009.

SHUKLA, A.; BUDDHI, D.; SAWHNEY, R. L. Thermal cycling test of few selected inorganic and organic phase change materials, **Energy** 33, 2008.

SIMON, Herbert A. **The Sciences of the Artificial**. 3 ed., Massachusetts: MIT Press, 1996.

SOUSA, C. O. M. **A Política Nacional dos Resíduos Sólidos: avanços e desafios**. Monografia (Pós-Graduação Lato Sensu) – Faculdade de Direito da Fundação Armando Álvares Penteado. São Paulo, 2012.

TYAGI, V. V.; KAUSHIK, S. C.; TYAGI, S. K.; AKIYAMA, T. Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: a review. **Sustain, Energy**, Rev. 15, 2011.

VAN AKEN, J. E. Management research based on the paradigm of the design sciences: the quest for field tested and grounded technological rules. **Journal of Management Studies**, v. 41, n. 2, p. 219-246, 2004.

VAN AKEN, J. E. Management research as a design science: articulating the research products of mode 2 knowledge production in management. **British Journal of Management**, v. 16, n. 1, p. 19-36, 2005.

VOLUME de resíduos urbanos crescerá de 1,3 bilhão de toneladas para 2,2 bilhões até 2025, diz PNUMA. **Nações Unidas do Brasil**, São Paulo, 06 de nov. de 2012. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/volume-de-residuos-urbanos-crescera-de-13-bilhao-de-toneladas-para-22-bilhoes-ate-2025-diz-pnuma>>. Acesso em: 15 de out. de 2017

WONORAHARDJO, S. *et al.* Potential of Thermal Energy Storage Using Coconut Oil for Air Temperature Control. **Buildings**, v. 8, n. 8, p. 95, 24 jul. 2018.

SILVA, N. F.; BRIDGES, A. H.; LIMA, E. M.; MORAIS, H. R. A.; JUNIOR, F. A. S.. **A indústria da construção civil está pronta para a fabricação digital e a customização em massa?** Uma pesquisa sobre um caso Brasileiro. Sigradi, Sao Paulo, nov. 2009.

KOLAREVIC, B.. **Architecture in the digital age: design and manufacturing**. Oxon: Taylor & Francis Group, 2003, 314p.

SAVE DE BEAURECUEIL, A.; LEE, F. **Arquitetura generativa high-low: princípios e aplicações**. In: GONÇALVES, J.C.S.; BODE, K. (Org.). **Edifício Ambiental**. São Paulo: Oficina de textos, 2015, cap. 12.

8. ANEXOS

8.1 Relatório dados climáticos – Experimento de desempenho térmico (temperatura)

DATA / HORA	TEMPERATURA CÂMARA COM FORRO [°C]	TEMPERATURA CÂMARA SEM FORRO [°C]	TEMPERATURA MÉDIA AR (CEPAGRI)
26/06/2019 16:00:00	30,70	31,40	28,33
26/06/2019 16:30:00	30,30	30,80	27,32
26/06/2019 17:00:00	29,10	29,10	26,34
26/06/2019 17:30:00	27,80	27,40	25,74
26/06/2019 18:00:00	26,40	25,80	24,89
26/06/2019 18:30:00	25,30	24,50	24,86
26/06/2019 19:00:00	24,50	23,60	24,54
26/06/2019 19:30:00	23,90	22,90	24,48
26/06/2019 20:00:00	23,30	22,30	22,02
26/06/2019 20:30:00	22,90	22,00	21,92
26/06/2019 21:00:00	22,70	21,90	21,69
26/06/2019 21:30:00	22,30	21,50	21,67
26/06/2019 22:00:00	21,90	21,20	21,98
26/06/2019 22:30:00	21,70	21,10	21,39
26/06/2019 23:00:00	21,40	20,80	19,79
26/06/2019 23:30:00	20,80	20,30	19,83
27/06/2019 00:00:00	20,50	20,00	20,39
27/06/2019 00:30:00	20,30	19,80	19,31
27/06/2019 01:00:00	20,00	19,60	19,08
27/06/2019 01:30:00	19,70	19,30	18,96
27/06/2019 02:00:00	19,50	19,10	18,76
27/06/2019 02:30:00	19,30	19,00	18,83
27/06/2019 03:00:00	19,10	18,80	18,6
27/06/2019 03:30:00	18,90	18,60	18,25
27/06/2019 04:00:00	18,50	18,20	17,58
27/06/2019 04:30:00	18,10	17,70	17,43
27/06/2019 05:00:00	17,80	17,50	17,04
27/06/2019 05:30:00	17,60	17,20	16,97
27/06/2019 06:00:00	17,20	16,80	17,03
27/06/2019 06:30:00	17,00	16,60	16,98
27/06/2019 07:00:00	16,90	16,60	16,42
27/06/2019 07:30:00	17,00	16,80	16,85
27/06/2019 08:00:00	17,20	17,10	17,8
27/06/2019 08:30:00	17,70	17,90	18,31
27/06/2019 09:00:00	18,60	19,10	19,96
27/06/2019 09:30:00	19,90	20,80	20,99
27/06/2019 10:00:00	21,60	22,70	22,61
27/06/2019 10:30:00	22,90	24,20	23,53
27/06/2019 11:00:00	24,10	25,30	24,13
27/06/2019 11:30:00	25,30	26,60	24,73
27/06/2019 12:00:00	26,30	27,40	25,54
27/06/2019 12:30:00	27,20	28,30	25,6
27/06/2019 13:00:00	27,90	28,90	25,66
27/06/2019 13:30:00	28,50	29,40	26,08
27/06/2019 14:00:00	29,10	29,80	26,66

27/06/2019 14:30:00	29,60	30,20	27,17
27/06/2019 15:00:00	29,90	30,40	26,74
27/06/2019 15:30:00	30,00	30,40	26,35
27/06/2019 16:00:00	29,20	29,30	26,22
27/06/2019 16:30:00	28,80	28,80	25,55
27/06/2019 17:00:00	28,10	27,80	24,87
27/06/2019 17:30:00	26,80	26,30	23,76
27/06/2019 18:00:00	25,40	24,60	22,62
27/06/2019 18:30:00	24,20	23,30	22,19
27/06/2019 19:00:00	23,30	22,20	21,87
27/06/2019 19:30:00	22,60	21,40	20,54
27/06/2019 20:00:00	22,00	21,00	20,1
27/06/2019 20:30:00	21,40	20,40	19,93
27/06/2019 21:00:00	20,70	19,80	19,85
27/06/2019 21:30:00	20,20	19,30	19,66
27/06/2019 22:00:00	19,90	19,10	19,56
27/06/2019 22:30:00	19,70	19,10	19,23
27/06/2019 23:00:00	19,50	19,00	19,09
27/06/2019 23:30:00	19,30	18,90	18,78
28/06/2019 00:00:00	19,10	18,70	18,54
28/06/2019 00:30:00	18,90	18,60	18,38
28/06/2019 01:00:00	18,70	18,40	18,29
28/06/2019 01:30:00	18,50	18,20	18,13
28/06/2019 02:00:00	18,30	18,10	18,1
28/06/2019 02:30:00	18,20	18,00	18,13
28/06/2019 03:00:00	18,00	17,90	17,93
28/06/2019 03:30:00	17,90	17,80	17,83
28/06/2019 04:00:00	17,80	17,70	17,71
28/06/2019 04:30:00	17,70	17,50	17,62
28/06/2019 05:00:00	17,60	17,50	17,75
28/06/2019 05:30:00	17,50	17,40	17,6
28/06/2019 06:00:00	17,40	17,30	17,45
28/06/2019 06:30:00	17,20	17,10	17,19
28/06/2019 07:00:00	17,10	17,00	17,3
28/06/2019 07:30:00	17,10	17,00	17,63
28/06/2019 08:00:00	17,20	17,20	18,46
28/06/2019 08:30:00	17,90	18,40	19,98
28/06/2019 09:00:00	19,20	20,10	21,08
28/06/2019 09:30:00	20,80	22,00	22,72
28/06/2019 10:00:00	22,30	23,70	23,88
28/06/2019 10:30:00	23,70	25,20	24,66
28/06/2019 11:00:00	25,10	26,60	26,23
28/06/2019 11:30:00	26,30	27,70	26,6
28/06/2019 12:00:00	27,40	28,60	27,03
28/06/2019 12:30:00	28,20	29,30	26,98
28/06/2019 13:00:00	28,90	29,90	27,58
28/06/2019 13:30:00	29,80	30,80	27,94
28/06/2019 14:00:00	30,50	31,40	28,59
28/06/2019 14:30:00	30,90	31,60	28,46
28/06/2019 15:00:00	31,30	31,80	28,35
28/06/2019 15:30:00	31,60	31,90	28,54
28/06/2019 16:00:00	31,60	31,70	28,53
28/06/2019 16:30:00	31,30	31,30	28,08
28/06/2019 17:00:00	30,60	30,30	28,1

28/06/2019 17:30:00	29,10	28,50	26,64
28/06/2019 18:00:00	27,50	26,70	25,09
28/06/2019 18:30:00	26,00	25,20	24,26
28/06/2019 19:00:00	24,80	24,00	22,81
28/06/2019 19:30:00	23,70	22,90	22,02
28/06/2019 20:00:00	22,90	22,00	21,37
28/06/2019 20:30:00	22,20	21,20	21,4
28/06/2019 21:00:00	21,80	20,90	21,27
28/06/2019 21:30:00	21,30	20,40	20,18
28/06/2019 22:00:00	20,70	19,70	19,59
28/06/2019 22:30:00	20,00	19,00	19,14
28/06/2019 23:00:00	19,50	18,50	18,79
28/06/2019 23:30:00	19,00	18,10	19,3
29/06/2019 00:00:00	18,50	17,70	18,92
29/06/2019 00:30:00	18,10	17,30	18,88
29/06/2019 01:00:00	17,80	17,10	18,65
29/06/2019 01:30:00	17,60	17,00	18,08
29/06/2019 02:00:00	17,40	17,00	17,59
29/06/2019 02:30:00	17,30	16,90	17,45
29/06/2019 03:00:00	17,10	16,80	17,85
29/06/2019 03:30:00	17,00	16,80	18,23
29/06/2019 04:00:00	17,00	16,80	18,28
29/06/2019 04:30:00	16,90	16,70	17,91
29/06/2019 05:00:00	16,80	16,60	17,44
29/06/2019 05:30:00	16,60	16,40	17,89
29/06/2019 06:00:00	16,10	15,80	17,5
29/06/2019 06:30:00	15,50	15,10	17,46
29/06/2019 07:00:00	15,00	14,60	15,46
29/06/2019 07:30:00	14,80	14,50	15,95
29/06/2019 08:00:00	14,90	14,70	17,69
29/06/2019 08:30:00	15,70	16,20	19,92
29/06/2019 09:00:00	17,50	18,60	21,52
29/06/2019 09:30:00	19,60	21,10	22,61
29/06/2019 10:00:00	21,50	23,10	23,81
29/06/2019 10:30:00	23,20	24,70	24,27
29/06/2019 11:00:00	24,60	26,00	24,95
29/06/2019 11:30:00	25,80	27,10	25,63
29/06/2019 12:00:00	26,80	27,90	26,42
29/06/2019 12:30:00	27,60	28,60	26,39
29/06/2019 13:00:00	28,40	29,30	26,75
29/06/2019 13:30:00	29,00	29,80	27,26
29/06/2019 14:00:00	29,60	30,40	27,31
29/06/2019 14:30:00	30,20	30,80	27,58
29/06/2019 15:00:00	30,70	31,10	27,81
29/06/2019 15:30:00	30,90	31,20	27,63
29/06/2019 16:00:00	31,00	31,00	27,79
29/06/2019 16:30:00	30,60	30,60	27,23
29/06/2019 17:00:00	29,80	29,60	27,13
29/06/2019 17:30:00	28,40	27,70	25,82
29/06/2019 18:00:00	26,50	25,70	24,36
29/06/2019 18:30:00	24,90	24,00	24,1
29/06/2019 19:00:00	23,80	22,80	21,57
29/06/2019 19:30:00	22,80	21,80	23,21
29/06/2019 20:00:00	22,20	21,20	21,84

29/06/2019 20:30:00	21,80	20,90	20,83
29/06/2019 21:00:00	21,20	20,30	20,29
29/06/2019 21:30:00	20,80	19,90	19,53
29/06/2019 22:00:00	20,30	19,40	19,55
29/06/2019 22:30:00	19,80	19,00	18,4
29/06/2019 23:00:00	19,30	18,60	18,54
29/06/2019 23:30:00	18,90	18,20	18
30/06/2019 00:00:00	18,30	17,60	18,27
30/06/2019 00:30:00	17,50	16,80	17,96
30/06/2019 01:00:00	16,90	16,20	17,41
30/06/2019 01:30:00	16,50	15,90	17,22
30/06/2019 02:00:00	16,10	15,60	17,18
30/06/2019 02:30:00	15,70	15,10	17,24
30/06/2019 03:00:00	15,40	14,90	16,03
30/06/2019 03:30:00	15,10	14,70	17,42
30/06/2019 04:00:00	14,90	14,50	16,52
30/06/2019 04:30:00	14,70	14,40	16,02
30/06/2019 05:00:00	14,40	14,00	16,34
30/06/2019 05:30:00	14,10	13,80	16,05
30/06/2019 06:00:00	13,90	13,60	16,05
30/06/2019 06:30:00	13,80	13,50	16,62
30/06/2019 07:00:00	13,70	13,40	16,39
30/06/2019 07:30:00	13,60	13,40	16,15
30/06/2019 08:00:00	14,00	14,00	16,63
30/06/2019 08:30:00	15,20	15,80	18,52
30/06/2019 09:00:00	16,80	17,90	19,21
30/06/2019 09:30:00	18,70	20,10	20,67
30/06/2019 10:00:00	20,60	22,20	22,21
30/06/2019 10:30:00	22,50	24,00	23,18
30/06/2019 11:00:00	24,00	25,50	24,26
30/06/2019 11:30:00	25,50	26,90	25,32
30/06/2019 12:00:00	26,70	27,90	26
30/06/2019 12:30:00	27,60	28,80	26,68
30/06/2019 13:00:00	28,50	29,50	27,13
30/06/2019 13:30:00	29,20	30,10	27,01
30/06/2019 14:00:00	29,70	30,50	27,4
30/06/2019 14:30:00	30,20	30,80	27,49
30/06/2019 15:00:00	30,60	31,00	27,36
30/06/2019 15:30:00	30,90	31,20	27,49
30/06/2019 16:00:00	30,90	30,90	27,36
30/06/2019 16:30:00	30,40	30,40	26,88
30/06/2019 17:00:00	29,40	29,10	26,05
30/06/2019 17:30:00	27,80	27,20	25
30/06/2019 18:00:00	26,20	25,50	24,77
30/06/2019 18:30:00	24,70	23,90	23,57
30/06/2019 19:00:00	23,50	22,50	22,58
30/06/2019 19:30:00	22,80	21,80	21,45
30/06/2019 20:00:00	22,20	21,20	21,47
30/06/2019 20:30:00	21,50	20,50	20,8
30/06/2019 21:00:00	21,00	20,00	20,55
30/06/2019 21:30:00	20,40	19,50	20,4
30/06/2019 22:00:00	19,80	18,80	20,18
30/06/2019 22:30:00	19,20	18,20	19,79
30/06/2019 23:00:00	18,50	17,60	20,05

30/06/2019 23:30:00	17,90	17,00	18,99
01/07/2019 00:00:00	17,40	16,60	18,94