

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

FLAVIO MEIRELES CAFFARELLO

ANÁLISE ESTRUTURAL DE COBERTURA EM GRIDSHELL DE MADEIRA

CAMPINAS 2016

FLAVIO MEIRELES CAFFARELLO

ANÁLISE ESTRUTURAL DE COBERTURA EM GRIDSHELL DE MADEIRA

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

Orientador: Prof. Dr. Nilson Tadeu Mascia Co-orientador: Prof. Dr. Cilmar Donizeti Basaglia

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO FLAVIO MEIRELES CAFFARELLO E ORIENTADO PELO PROF. DR. NILSON TADEU MASCIA.

ASSINATURA DO ORIENTADOR

ilon (

CAMPINAS 2016 Ficha catalográfica Universidade Estadual de Campinas Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

C116a	Caffarello, Flavio Meirelles, 1990- Análise estrutural de cobertura em gridshell de madeira / Flavio Meireles Caffarello. – Campinas, SP : [s.n.], 2016.
	Orientador: Nilson Tadeu Mascia. Coorientador: Cilmar Donizeti Basaglia. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.
	1. Engenharia estrutural. 2. Efeitos do vento. 3. Estrutura de madeira (Construção civil). 4. Análise numérica. I. Mascia, Nilson Tadeu,1956 II. Basaglia, Cilmar Donizeti. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Structural analysis in wood gridshell coverture Palavras-chave em inglês: Structural engineering Wind effects Wooden structure (Construction) Numeric analysis Área de concentração: Estruturas e Geotécnica Titulação: Mestre em Engenharia Civil Banca examinadora: Nilson Tadeu Mascia [Orientador] Isaias Vizotto Elias Antonio Nicolas Carlito Calil Junior Luiz Carlos Marcos Vieira Junior Data de defesa: 24-06-2016 Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

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

ANÁLISE ESTRUTURAL DE COBERTURA EM *GRIDSHELL* DE MADEIRA

Flavio Meireles Caffarello

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Prof. Dr. Nilson Tadeu Mascia Presidente e Orientador(a)/Unicamp

> Prof. Dr. Isaias Vizotto Unicamp

Prof. Dr. Elias Antonio Nicolas **Unasp**

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

Campinas, 24 de junho de 2016

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Nilson Tadeu Mascia e ao meu coorientador Prof. Dr. Cilmar Donizeti Basaglia pelas orientações e pelos muitos conhecimentos transmitidos.

Agradeço ao Prof. Dr. Isaias Vizotto, e ao Prof. Dr. Luiz Carlos Marcos Vieira Junior por me auxiliarem a encontrar soluções para indagações deste trabalho.

Agradeço ao Bruno Fazendeiro Donadon, ao Caio Raja e ao Marcelo Deperon Galter por me auxiliarem com importantes direcionamentos na parte de análise numérica e conceitual.

Agradeço também ao meu orientador de graduação, no meu programa de dupla diplomação, Prof. Dr. Carlo Ostorero, assim como também ao Prof. Dr. Mario Sassone, professores do Politecnico de Turim, Itália, por me introduzirem a este tema de trabalho.

Agradeço ao Departamento de Estruturas (DES) por me proporcionar o suporte técnico e conhecimento.

Agradeço a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FEC), instituição na qual me graduei e tenho muito respeito.

Agradeço a Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) por proporcionar um excelente meio de pesquisa e suporte aos alunos da pósgraduação.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento para esta pesquisa.

Agradeço aos meus pais, Claudio e Paula; aos meus irmãos, Fabio e Fabiola; ao meu cunhado, Prachides e a minha namorada, Ivana pelo suporte e compreensão nessa etapa da minha vida.

Agradeço a Deus por me manter sempre firme nas fases difíceis de minha jornada.

RESUMO

Cascas em grelha de madeira também conhecidas como *gridshell*s de madeira são estruturas especiais que combinam eficiência estrutural e arquitetura atraente. Este estudo visou pesquisar uma geometria eficiente de *gridshell* de madeira para a cobertura de um edifício em vias de uma recuperação estrutural. Foi analisada uma possível geometria final obtida a partir de simulações do efeito do peso próprio sobre uma malha por meio de software. Posteriormente, simulou-se a estrutura cargas por meio de um programa comercial de método dos elementos finitos – ANSYS – com o qual se pôde analisar a estrutura com geometria prédefinida em relação aos esforços solicitantes. Com tais resultados constatou-se a eficiência das *gridshells* como estruturas capazes de vencer grandes vãos com pequenos deslocamentos verticais. Por fim, foi realizado uma análise estrutural quanto ao efeito do software ANSYS e sua plataforma CFX, definindo-se uma metodologia para análise estrutural das *gridshell*s.

Palavras Chave: *Gridshell*, Estrutura de Madeira, Efeito do Vento, Análise Numérica.

ABSTRACT

Shells in grid of wood also known as gridshells made of wood are special structures that combine structural efficiency and attractive architecture. This study aimed to search an efficient geometry of wood gridshell to apply as coverage for a building that is ready to a structural recovery. It was analyzed a final possibility of geometry generated from own weight simulation over a mesh through the aid of a software. Afterwards, the structure was simulated with a commercial software of finite element method analysis (FEM Analysis) – ANSYS – which conducted to a final structural analysis of the same geometry predefined in terms of internal forces and moments. With these results, the good efficiency of gridshells as structures capable to reach large spans with small vertical displacements was noted. In the end, a wind effect structural analysis over this kind of coverage was obtained by the interaction of fluid and structure with the aid of the software ANSYS and its platform CFX, defining a methodology for structural analysis on gridshells.

Keywords: Gridshell, Wood Structure, Wind Effect, Numeric Analysis.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: GRIDSHELL FEITA DE PAPELÃO. PAVILHÃO JAPONÊS DA EXPO HANNOVER 2000, ALEMANHA,
ELEVENTE AND THE TROADE ADDICADA HARSLEY NINE BRIDGES GOLD CLUB HOUSE - KOREA 2010
FONTE: SHIGERIBANARCHITECTS 2010
FIGURA 3' CHIDDING STONE OBANGERY, ABOUITETURA' PETER HUI BERT, CÁLCULO ESTRUTURAL BURO
HAPPOLD (PHOTO: CARPENTER OAK & WOODL AND LIMITED). FONTE: MESNIL, 2015
FIGURA 4: EPHEMERAL CATHEDRAL OF CRÉTEIL (PARIS, FRANÇA), CONSTRUÍDA EM 2013 EM COMPÓSITO DE
FIBRA DE VIDRO. ESTRUTURA ENQUANTO A CATEDRAL PASSA POR UMA REFORMA DE 2 ANOS. FONTE: DU PELOUX ET AL, 2015
FIGURA 5: A PRIMEIRA GRIDSHELL REALIZADA NO MUNDO, FOTO TIRADA DURANTE SUA CONSTRUÇÃO. FONTE:
INTERNATIONAL DATABASE AND GALLERY OF STRUCTURES (2007)
FIGURA 6: PÁTIO FABRIL EM VYKSA POR VOLTA DE 1900. FONTE: BECKH E BARTHEL, 2009
FIGURA 7: MULTIHALLE LATTICE SHELL DE MANNHEIM, VISTA INTERNA. FONTE: FASP+EPP
FIGURA 8: MANNHEIM MULTIHALLE. FONTE: MESNIL, 2013
FIGURA 9: DOWNLAND <i>GRIDSHELL</i> , POR BURO HAPPOLD E EDWARD CULLINAN ARCHITECTS. FONTE: <i>GRIDSHELL</i> .IT
FIGURA 10: IMAGEM QUE DESCREVE O PROCEDIMENTO DE INVERSÃO DA GEOMETRIA. FONTE: OTTO (1974), 28
FIGURA 11: IMAGEM II USTRATIVA DA MODELAGEM POB <i>HANGING CHAIN</i> , FONTE: OTTO (1974)
FIGURA 12: IMAGEM ILLISTRATIVA DA MODELAÇÃO POR <i>HANGING CHAIN</i> FONTE: OTTO (1974) 28
FIGURA 13: MODELO TIPO "FÍSICO CLÁSSICO" LITILIZADO NO PROJETO DA SAGRADA FAMÍLIA EM BARCELONA
NOTA-SE QUE A FOTO SE ENCONTRA INVERTIDA. FONTE: STEVE DARDEN (2011)
FIGURA 14: MODELO TIPO "EÍSICO CLÁSSICO" UTILIZADO NO PROJETO DE MULTIHALLE LATTICE SHELLEM
MANNHEIM. ALEMANHA. FONTE: SMD ABOUITECTES (2013)
FIGURA 15: MULTIHALLE LATTICE SHELL EM MANNHEIM, ALEMANHA, FONTE: BERBERICH, 2012,
FIGURA 16: APLICAÇÃO DO MÉTODO DIGITAL CLÁSSICO A PARTIR DA RELAXAÇÃO DINÂMICA. FONTE: KUIKEN E
Mentegazzi (2014)
FIGURA 17: GRÁFICO DO CARREGAMENTO APLICADO AO LONGO DO TEMPO. FONTE: GUIRARDI (2011)
FIGURA 18: RESPOSTA AO LONGO DO TEMPO. FONTE: GUIRARDI (2011).
FIGURA 19: PAVILHÃO ZA. FONTE: NAICU (2014)
FIGURA 20: PAVILHÃO ZA, FOTO RETIRADA DO SEU INTERIOR. FONTE: NAICU (2014)
FIGURA 21: IMAGEM DO INÍCIO DA SIMULAÇÃO COM O KANGAROO. FONTE: PIKER, 2013
FIGURA 22: IMAGEM DA SIMULAÇÃO COM O KANGAROO. FONTE: PIKER, 2013.
FIGURA 23: IMAGEM DA INVERSÃO DO EFEITO DA GRAVIDADE COM O KANGAROO. FONTE: PIKER, 2013
FIGURA 24: PAVILHÃO '10, UTILIZADO PARA EFEITO DE PESQUISA NA UNIVERSIDADE DE STUTTGART,
Alemanha. Fonte: Kuiken e Mentegazzi (2014)
FIGURA 25: CONEXÕES POR ENTALHE UTILIZADAS NO PAVILHÃO '10, STUTTGART. FONTE: KUIKEN E
Mentegazzi (2014)
FIGURA 26: BRAÇO ROBÓTICO UTILIZADO NA MANUFATURA DOS COMPENSADOS UTILIZADOS NO PAVILHÃO '10,
STUTTGART, ALEMANHA. FONTE: KUIKEN E MENTEGAZZI (2014)
FIGURA 27: PAVILHÃO '12, UTILIZADO PARA EFEITO DE PESQUISA NA UNIVERSIDADE DE STUTTGART,
Alemanha. Fonte: Kuiken e Mentegazzi (2014)40
FIGURA 28: CENTRO POMPIDOU, CIDADE METZ, FRANÇA. FONTE: KUIKEN E MENTEGAZZI (2014)40
FIGURA 29: CENTRO POMPIDOU VISTA INTERIOR, CIDADE METZ, FRANÇA. FONTE: KUIKEN E MENTEGAZZI (2014)
FIGURA 30: MODELO DIGITAL DO CENTRO DE POMPIDOU, METZ, FRANÇA. FONTE: DESIGNTOPRODUCTION (2008)
FIGURA 31: PAVILHÃO '11, UTILIZADO PARA EFEITO DE PESQUISA NA UNIVERSIDADE DE STUTTGART.
ALEMANHA FONTE: KUIKEN E MENTEGAZZI (2014)

FIGURA 32: APLICAÇÃO DE ALGORITMO GENÉTICO PARA OTIMIZAÇÃO DE UMA <i>GRIDSHELL</i> SOB CARREGAMENTO
FIGURA 33: PROCESSO CONSTRUCTIVO DE LIMA <i>GRIDSHELL</i> REALIZADA EM NÁROLES. ITÁLIA, RELO GRURO DE
PESQUISAS DE SERGIO PONE. FONTE: PONE (2013)
FIGURA 34: ETAPAS CONSTRUTIVAS DA ESTRUTURA DA GRIDSHELL DO CENTRO POMPIDOU DE METZ, FRANÇA.
FONTE: DESIGNTOPRODUCTION (2008)45
FIGURA 35: MYZEIL (ARQUITETO: MASSILIAMO FUKSAS) EM FRANKFURT, ALEMANHA, GRIDSHELL EM AÇO COM
ELEMENTOS PRÉ-FABRICADOS. FONTE: MESNIL, 2013
FIGURA 36: ETAPAS CONSTRUTIVAS DA ESTRUTURA DA <i>GRIDSHELL</i> DO MANNHEIM MULTIHALLE. FONTE: SMD ARQUITECTES (2013)
FIGURA 37: CONFORMAÇÃO DE UMA <i>GRIDSHELL</i> DO TIPO PÓS-FORMADA OBTIDA POR MEIO DO ANSYS.
FONTE: PRÓPRIO AUTOR E CILMAR DONIZETI BASAGLIA (FEC-UNICAMP)
FIGURA 38: ILUSTRAÇÃO DO SAVIL GARDEN <i>GRIDSHELL</i> NA ETAPA ANTERIOR AO ENVERGAMENTO DE SEUS
ELEMENTOS. FONTE: BUILDING FOR A FUTURE (2006)
FIGURA 39: ILUSTRAÇÃO DO SAVIL GARDEN <i>GRIDSHELL</i> COM SUA COBERTURA CONCLUÍDA. FONTE: BUILDING
FOR A FUTURE (2000)
FIGURA 40: ARQUEAMENTO DA PRIMEIRA GRELHA POR DOIS GUINDASTES, CONSTRUÇÃO DA EPHEDRAL CATHEDRAL OF CRÉTEIL. FONTE: DU PELOUX ET AL, 2015
FIGURA 41: ETAPAS CONSTRUTIVAS DO EPHERAL CATHEDRAL OF CRÉTEIL, PARIS. FONTE: DU POULEUX ET AL, 2015
FIGURA 42: TENSÕES DE FLEXÃO (VON MISES) DE UMA <i>GRIDSHELL</i> ANTI-CLASTICA. SEM CARREGAMENTO
EXTERNO (FIGURA A ESQUERDA), COM CARREGAMENTO DE NEVE UNIFORMEMENTE DISTRIBUÍDO (FIGURA
A DIREITA). FONTE: HERNÁNDEZ E GENGNAGEL. 2012
FIGURA 43: DISTRIBUIÇÃO DOS ESFORCOS INTERNOS EM UMA CASCA (ESQUERDA) E EM UMA CÉLULA
GRIDSHELL (DIREITA). FONTE: MIHALIK ET AL. (2013)
FIGURA 44: DISTRIBUIÇÃO DOS ESFORÇOS INTERNOS EM ELEMENTOS DE <i>GRIDSHELL</i> COM TRAVEMENTOS
DIAGONAIS. FONTE: TOUSSAIT (2007)
FIGURA 45:EDIFÍCIO EM TORONTO QUE ENTROU EM COLAPSO DEVIDO AO EFEITO DO VENTO. FONTE: SOUZA (2015)
FIGURA 46: EDIEÍCIO MEYER-KISER OLIE SOERELL PLASTIEICAÇÃO DEVIDO AO EFEITO DO VENTO EM MIAMI
FLIA FONTE: SOUZA (2015) 56
FIGURA 47 - CONTORNO DE LIMITURO DE CORRENTE DE LIMIELUIDO FONTE: PITTA (2002) 57
FIGURA 47 - CONTORINO DE OM TOBO DE CONTENTE DE OM FECIDO. FONTE: PITTA (2002).
FIGURA 46 - LINHAS DE FLUXO NO ENTORNO DE UM OBJETO. FONTE, FITTA (2002).
FIGURA 49 - LINHAS DE FLUXO AO ENTORNO DE UM OBJETO COM ABERTURA. FONTE, PITTA (2002)
FIGURA 50: ESQUEMA DE UMA CAMADA LIMITE. FONTE: FOX; MICDONALD; PRITCHARD, 2006
FIGURA 51: CAMADA LIMITE SOBRE UMA PLACA PLANA NO REGIME LAMINAR E TURBULENTO. FONTE: MUNSON, 2004, ADAPTADA POR GALTER, 2015
FIGURA 52: EFEITO VENTURI, NO QUAL AS EDIFICAÇÕES VIZINHAS AFUNILAM O VENTO, ACELERANDO SEU FLUXO. FONTE: SOUZA (2015)
FIGURA 53: REGIÕES DE BARLAVENTO E SOTAVENTO NAS EDIFICAÇÕES. FONTE: SOUZA .2015
FIGURA 54: MAPA DE ISOPLETAS DA VELOCIDADE BÁSICA DO VENTO VO (M/S). FONTE: ABNT:NBR6123,1988
ADAPTADO POR SOUZA, 2015
FIGURA 55: COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE COEFICIENTES DE PRESSÃO EXTERNA DA CASCA HEXAGONAL,
REGIME LAMINAR, 30 °ANSYS (A) X TÚNEL (B). FONTE: FERREIRA (2013)
FIGURA 56: GRÁFICO DE COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE COEFICIENTES DE PRESSÃO EXTERNA DA CASCA
HEXAGONAL, REGIME LAMINAR, 30 °ANSYS (A) X TÚNEL (B). FONTE: FERREIRA (2013)
FIGURA 57: TESTES DE CONVERGÊNCIA: LINHAS ISOBÁRICAS DOS COEFICIENTES DE PRESSÃO EXTERNA DA
CÚPULA (F/D = 1/4), REGIME LAMINAR (ANSYS X ABNT:NBR 6123,1988). FONTE: FERREIRA (2013).73
FIGURA 58: A ESQUERDA SE TEM A VISTA DA ENTRADA, TEATRO POLITEAMA SOCIALE, SASSUOLO, MODENA,
FOTO TIRADA EM 15/01/12. E A DIREITA VISTA AÉREA DO BAIRRO DE "POLITEAMA SOCIALE", SASSUOLO.
Fonte: Sandrone (2012)

FIGURA 59: IMAGEM DO SALÃO PRINCIPAL. POLITEAMA SOCIAL, SASSUOLO, TIRADA EM 15/11/11. FONTE SANDRONE (2012).	: 81
FIGURA 60: IMAGEM DA CRIAÇÃO DO RETÍCULO EM VERDE. FONTE: CAFFARELLO ET AL. (2014)	84
FIGURA 61: ILUSTRAÇÃO DA SEÇÃO PADRÃO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS LINEARES DA <i>GRIDSHELL</i> . FO PRÓPRIO AUTOR)NTE: 84
FIGURA 62: COMPARAÇÃO DO MÉTODO NUMÉRICO DE VOLUMES FINITOS COM OS VALORES DE NORMA (ABNT:NBR6123, 1988), FONTE: PRÓPRIO AUTOR E NORMA DE VENTOS ABNT:NBR 6123, 1988.	87
FIGURA 63: <i>GRIDSHELL</i> E SUA SUPERFÍCIE DE ORIGEM IMPORTADAS PARA O ANSYS CFX. FONTE: PRÓP	RIO
FIGURA 64: MODELAGEM DO VOLUME DE CONTORNO SOBRE A ESTRUTURA DA <i>GRIDSHELL</i> NO <i>GEOMETRY</i> ANSYS. FONTE: PRÓPRIO AUTOR.	′DO
FIGURA 65: REFINAMENTO DA MALHA DE ELEMENTOS TETRAÉDRICOS NO ANSYS-CFX. FONTE: PRÓPRIC AUTOR.) 89
FIGURA 66: EXEMPLO DE CONFORMAÇÃO DA CAMADA LIMITE NO ANSYS CFX. FONTE: PRÓPRIO AUTOR.	89
FIGURA 67: PRESSÕES DEVIDO A UM VENTO DE 45M/S SOBRE O REVESTIMENTO DA <i>GRIDSHELL</i> . FONTE: PRÓPRIO AUTOR	93
FIGURA 68. DISCRETIZAÇÃO DA ESTRUTURA GRIDSHELL NO ANSYS-STATIC. FONTE: PRÓPRIO AUTOR	95
FIGURA 69: APLICAÇÃO DAS PRESSÕES DO VENTO 90°NO ANSYS STATIC. FONTE: PRÓPRIO AUTOR	96
FIGURA 70: DEFINIÇÃO DAS PROPRIEDADES DO OSB UTILIZADO NO MODELO DO ANSYS. FONTE: PRÓPR AUTOR.	≀IO 98
FIGURA 71: ESTABELECENDO AS PROPRIEDADES DO REVESTIMENTO EM OSB DA <i>GRIDSHELL</i> . FONTE: PRÓPRIO AUTOR.	98
FIGURA 72: VELOCIDADE DO VENTO A 0° EM LINHAS DE CORRENTE (ANSYS CFX). FONTE: PRÓPRIO AUT	гоr. 99
FIGURA 73: CONFORMAÇÃO DO VENTO PRÓXIMO A COTA O PARA O VENTO A 0°. FONTE: PRÓPRIO AUTOR.	100
FIGURA 74: VELOCIDADE DO VENTO A 90° EM LINHAS DE CORRENTE (ANSYS CFX). FONTE: PRÓPRIO AL	JTOR.
FIGURA 75: CONFORMAÇÃO DO VENTO PRÓXIMO A COTA O PARA O VENTO A 90°. FONTE: PRÓPRIO AUTOR	R. 101
FIGURA 76: COEFICIENTES DE PRESSÃO EXTERNOS VENTO 0°. FONTE: PRÓPRIO AUTOR	101
FIGURA 77: COEFICIENTES DE PRESSÃO EXTERNOS VENTO 90°. FONTE: PRÓPRIO AUTOR	102
FIGURA 78: DESLOCAMENTOS DEVIDO AO EFEITO DO VENTO A 0°. FONTE: PRÓPRIO AUTOR	103
FIGURA 79. DESLOCAMENTOS DEVIDO AO EFEITO DO VENTO A 90°. FONTE: PRÓPRIO AUTOR	104
FIGURA 80: SOLICITAÇÕES GERADAS PELO EFEITO DO VENTO A 0°SOBRE A COBERTURA. FONTE: PRÓPRI AUTOR.	IO 107
FIGURA 81: SOLICITAÇÕES GERADAS PELO EFEITO DO VENTO A 90° SOBRE A COBERTURA. FONTE: PRÓPI AUTOR.	RIO 107
FIGURA 82: ALGUMAS DAS PROPRIEDADES CARACTERÍSTICAS ADOTADAS PARA OS MATERIAIS DE TIPO	
ESTRUTURAL (IMAGEM 1) E DE REVESTIMENTO (IMAGEM 2). FONTE: PRÓPRIO AUTOR	108
FIGURA 83: DESLOCAMENTOS GERADOS PELO EFEITO DO VENTO A 0°, VISTA EXTERNA (ANSYS CFX). FO PRÓPRIO AUTOR.	ONTE: 109
FIGURA 84: DESLOCAMENTOS GERADOS PELO EFEITO DO VENTO A 0°, VISTA INFERIOR (ANSYS CFX).	
Fonte: Próprio autor	109
FIGURA 85: DESLOCAMENTOS GERADOS PELO EFEITO DO VENTO A 90°, VISTA EXTERNA (ANSYS CFX). Fonte: Próprio autor	110
FIGURA 86: DESLOCAMENTOS GERADOS PELO EFEITO DO VENTO A 90°, VISTA INFERIOR (ANSYS CFX). FONTE: PRÓPRIO AUTOR	110
FIGURA 87: ABRINDO O CFX	122
FIGURA 88: SELECIONANDO A OPÇÃO DE CONSTRUCÃO DE UMA ESFERA	123
FIGURA 89: PARÂMETROS DA ESFERA	123
FIGURA 90: FAZENDO O SKETCH	125
FIGURA 91: DETERMINANDO AS DIMENSÕES DO RETÂNGULO	125

FIGURA 92: SELECIONANDO O COMANDO EXTRUDE	126
FIGURA 93: DADOS ESTABELECIDOS PARA A EXECUÇÃO DO EXTRUDE	126
FIGURA 94: EXTRUDE	127
FIGURA 95: DEFININDO OS INPUTS DO COMANDO NEW PLANE	127
FIGURA 96: SELEÇÃO DA FACE QUE SERVIRÁ DE GUIA PARA O NOVO PLANO	128
FIGURA 97: SKETCH PARA O FECHAMENTO DA ABERTURA.	128
FIGURA 98: SUPERFÍCIE GERADA ATRAVÉS DO SKETCH.	129
FIGURA 99: COORDENADAS E DIMENSÕES DO TUBO DE PITOT	130
FIGURA 100: CILINDRO O QUAL FUNCIONARÁ COMO TUBO DE PITOT.	130
FIGURA 101: OPÇÕES SELECIONADAS PARA O COMANDO FILL.	131
FIGURA 102: VOLUME OBTIDO DO FILL.	131
FIGURA 103: SUPRIMINDO GEOMETRIAS QUE NÃO SE APLICAM À ANÁLISE NUMÉRICA	132
FIGURA 104: DEFINIÇÃO DE SELEÇÃO: "ENTRADA"	132
FIGURA 105: DEFINIÇÃO DE SELEÇÃO: "CÚPULA"	133
FIGURA 106: DEFINIÇÃO DE SELEÇÃO: "PITOT"	133
FIGURA 107: COMANDO SIZING	134
FIGURA 108: PARÂMETROS DO SIZING DA CÚPULA	134
FIGURA 109: PARÂMETROS DO SIZING DA CÚPULA	135
FIGURA 110: COMANDO INFLATION	136
FIGURA 111: SELEÇÃO DAS INTERFACES PARA SE APLICAR O INFLATION	136
FIGURA 112: PARÂMETROS DO INFLATION	137
FIGURA 113: GERANDO A MALHA.	137
FIGURA 114: MALHA PRONTA	138
FIGURA 115: CORTE ILUSTRANDO O SIZING DO "PITOT" E DA CÚPULA	138
FIGURA 116: VISUALIZAÇÃO DO INFLATION PRÓXIMO A SUPERFÍCIE DA CÚPULA.	139
FIGURA 117: VISUALIZAÇÃO DO SIZING NO TUBO DE PITOT	139
FIGURA 118: TELA DO SETUP	140
FIGURA 119: PARÂMETROS ADOTADOS NO ANALYSIS TYPE	140
FIGURA 120: ADICIONANDO UM NOVO ITEM EM TRN RESULTS	141
FIGURA 121: PARÂMETROS DO TRN RESULTS	141
FIGURA 122: INSERINDO OS DOMÍNIOS.	142
FIGURA 123: DEFININDO A BOUNDARY ENTRADA COMO INLET E RELACIONANDO ELA COM A SELEÇÃO	
"ENTRADA" DEFINIDA NA ETAPA DE <i>Mesh</i>	143
FIGURA 124: "BOUNDARY ENTRADA"	143
FIGURA 125: DETALHES DA "BOUNDARY ENTRADA"	143
FIGURA 126: APÓS DEFINIDA A ENTRADA O MODELO GRÁFICO MOSTRA O SENTIDO DO ESCOAMENTO	144
FIGURA 127: "BOUNDARY SAÍDA"	144
FIGURA 128: DETALHES DA "BOUNDARY SAÍDA"	144
FIGURA 129: "BOUNDARY PAREDES"	144
FIGURA 130 DETALHES DAS BOUNDARY: PAREDES, PISO, E CÚPULA	145
FIGURA 131: "BOUNDARY PISO"	145
FIGURA 132: "BOUNDARY CÚPULA".	145
FIGURA 133: "BOUNDARY PITOT"	145
FIGURA 134: DETALHES DA "BOUNDARY PITOT".	145
FIGURA 135: OPÇÕES UTILIZADAS NO SOLVER CONTROL	146
FIGURA 136: DEFININDO AS PROPRIEDADES BÁSICAS DO FLUIDO	147
FIGURA 137: DEFININDO O MODELO DO FLUIDO	147
FIGURA 138: PARÂMETROS DO INITIALIZATION.	148
FIGURA 139: OPÇÕES PARA SE INICIAR O PROCESSAMENTO	148
FIGURA 140: ETAPA DE PROCESSAMENTO.	149

FIGURA 141: RESULTADOS, DEFININDO-SE OS CONTORNOS A SEREM VISUALIZADOS	150
FIGURA 142: VISUALIZAÇÃO DA PRESSÃO SOBRE A CÚPULA	150
FIGURA 143: VISUALIZAÇÃO DA PRESSÃO SOBRE A CÚPULA E O TUBO DE PITOT	151
Figura 144: Nova expressão	151
FIGURA 145: DEFININDO A EXPRESSÃO DO COEFICIENTE DE PRESSÃO.	152
FIGURA 146: CRIANDO-SE UMA NOVA VARIÁVEL.	152
FIGURA 147: RELACIONANDO A NOVA VARIÁVEL COM A EXPRESSÃO DEFINIDA ANTERIORMENTE	153
FIGURA 148: VALORES DOS COEFICIENTES DE PRESSÃO DA CÚPULA	153

LISTA DE TABELAS

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 - Considerações Gerais	16
1.2 - Justificativa	18
2 OBJETIVOS	21
2.1 – Objetivos Gerais	21
2.2 – Objetivos Específicos	21
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1 – Gridshell e suas Aplicações	22
3.1.1 – Generalidades	22
3.1.2 – Contexto Histórico das Gridshells	24
3.1.3 – Desenvolvimento de Formas (Form Finding)	27
3.1.3.1 – Método Físico Clássico (<i>Classic Phisical Technique</i>)	28
3.1.3.2 – Método Digital Clássico (<i>Classic Digital Technique</i>)	31
3.1.3.3 – Método Digital por Tecelagem (<i>Weaving Digital Technique</i>)	37
3.1.3.4 – Método Digital por Algoritmos Generativos (Generative Algorithm Technique)	42
3.1.4 – Métodos Construtivos	44
3.1.4.1 – Metodologia das <i>Gridshell</i> s "Pré-formadas"	45
3.1.4.2 – Metodologia das Gridshells "Pós-formadas"	46
3.1.5 – Madeira como Material Construtivo	52
3.1.6 – Configuração dos Esforços	53
3.2 – Ação do Vento sobre Estruturas	55
3.2.1 – Generalidades	55
3.2.2 – Fundamentos Teóricos Básicos	56
3.2.2.1 - Teorema de Conservação de Massa	57
3.2.2.2 - Teorema de Bernoulli	58
3.2.2.3 - Pressão Estática	59
3.2.2.4 - Pressão Total	59
3.2.2.5 - Pressão de Obstrução	60
3.2.2.6 - Coeficientes de Pressão	60
3.2.2.7 – Camada Limite	63
3.2.3. – Consideração de Ações Resultantes do Vento - Aspectos Normativos	65
3.2.3.1 – Vento Convenções de Nomenclatura	67

SUMÁRIO

3.2.3.2 – Método de Cálculo da Ação do Vento – ABNT:NBR 6123, 1988	. 68
3.2.4 – Simulação de Vento por meio de Fluidodinâmica Computacional	. 71
3.2.4.1 – Modelo de Turbulência	. 73
3.3 – Combinações de Ações	. 77
3.3.1 Combinações em estados limites últimos	. 78
4 CARACTERÍSTICAS DO EDIFÍCIO	79
4.1 – Motivação para o Estudo do Edifício em Questão	. 79
4.2 – Características Gerais	79
4.3 – Características do Interior do Edifício	. 80
5 METODOLOGIA	82
5.1 – Busca da Forma	. 83
5.2 - Análise do Efeito do Vento por Computational Fluid Dynamics (CFD)	85
5.2.1– Método Numérico	. 86
5.2.2– Procedimento no ANSYS CFX	. 86
5.2.2.1– Validação do Procedimento Realizado no ANSYS CFX	. 86
5.2.2.2– Descrição do Procedimento no ANSYS CFX	. 87
5.3 - Propriedades da Madeira Considerada	. 93
5.4 - Carregamentos	94
5.5 - Análise de Tensões – Método dos Elementos Finitos	. 95
5.5.1 – Análise para Verificação ELU Segundo ABNT:NBR 7190	. 96
5.5.2 – Análise de Tensões da <i>Gridshell</i>	97
6. – RESULTADOS	99
6.1 – Efeito do Vento Sobre a Geometria Pré-Estabelecida	. 99
6.2 - Verificação ELU Segundo ABNT:NBR 71901	103
6.3 – Análise Pura de Tensões da <i>Gridshell</i> 1	106
6.3.1 – Avaliação e Aplicação do Efeito do Vento para a Análise de Tensões da Gridshell 1	106
6.3.2 – Tensões Resultantes para a <i>Gridshell</i> Revestida1	108
7 CONCLUSÕES1	13
8. – RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS1	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS1	16
APÊNDICE A – Tutorial: Análise de Vento por meio do ANSYS CFX1	22

1.- INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações Gerais

Cascas em grelha tridimensional de madeira, também conhecidas como *gridshell*s de madeira, são estruturas especiais que combinam eficiência estrutural com uma arquitetura atraente. O termo *gridshell* comumente se refere a uma estrutura de forma curva como uma casca, mas consistindo, em verdade, de uma grelha, em vez de uma superfície sólida. Estas estruturas podem abranger grandes vãos usando muito pouco material; hoje já é possível encontrar *gridshell*s feitas com diversos materiais, tais como: aço, alumínio, madeira, plástico, compósitos, ou até mesmo tubos de papelão.



Figura 1: *Gridshell* feita de papelão. Pavilhão japonês da Expo Hannover 2000, Alemanha, exposição internacional. Fonte: Kuiken e Mentegazzi, 2014.

De pouco impacto sobre os recursos naturais quando corretamente projetadas, as *gridshell*s de madeira podem ser construídas em um tempo relativamente curto por meio da construção inicial de uma grelha plana feita de hastes lineares que paulatinamente é arranjada na forma desejada (KUIJVENHOVEN, 2009).

Como outro método construtivo pode-se, também citar *gridshell*s de madeira realizadas com peças pré-fabricadas como no caso de "Haesley Nine Bridges Golf Club House" na Coréia do Sul, (SHIGERUBANARCHITECTS, 2010).



Figura 2: *Gridshell* de tipo pré-fabricada, Haesley Nine Bridges Golf Club House - Korea, 2010. Fonte: Shigerubanarchitects, 2010.

Considerando-se as muitas propriedades vantajosas das cascas em grelha de madeira, poder-se-ia esperar que este tipo de estrutura fosse de uso mais frequente. Entretanto, apenas algumas dessas estruturas foram construídas até o momento. Uma explicação para isso é a relativa complexidade da elaboração do projeto que desencoraja os projetistas por sua escolha.

Este estudo teve por objetivo propor uma geometria de uma estrutura de *gridshell* para a cobertura de um edifício que se encontra em vias de uma recuperação estrutural. Para se obter a forma dessa estrutura partiu-se de simulações do efeito do peso próprio sobre uma malha por meio do software Grasshopper. O arquiteto Antoni Gaudi, na Catedral "Sagrada Família" em Barcelona, Espanha, fez algo semelhante no final do século XIX e início do século XX (SANDRONE, 2012), ao utilizar o recurso da forma invertida de pesos pendurados, também conhecida como *hanging chain method*.

Na sequência, da casca encontrada foi definida uma grelha nos mesmos conformes geométricos, obtendo-se assim uma *gridshell*, a qual foi discretizada em

elementos sólidos tetraédricos no software ANSYS. Uma vez definida a geometria reticulada, simulou-se carregamentos que compreendessem as solicitações de peso próprio e do vento, usando software ANSYS; como resultados foram obtidas tensões solicitantes normais, cisalhantes e deslocamentos para a estrutura em Ipê, *Tabebuia serratifolia* (madeira da classe das dicotiledônea nativas).

Sobre a mesma estrutura foi simulado também carregamentos que compreendessem as combinações últimas na estrutura de madeira por meio do mesmo software (ANSYS); como resultados foram obtidos tensões solicitantes normais, cisalhantes e deslocamentos verticais, que foram verificados com a atual norma de madeiras ABNT:NBR 7190 (1997).

Por fim evidencia-se que este estudo buscou também fazer uma análise com relação aos efeitos do vento sobre uma estrutura *gridshell* de madeira, e para tanto aplicou-se os carregamentos de vento sobre a estrutura por meio de interação fluido-estrura com a plataforma CFX do software ANSYS. A análise foi do tipo CFD – *Computer Fluid Dynamics* - implícita.

1.2 - Justificativa

As *gridshell*s são estruturas muito interessantes e ainda hoje pouco conhecidas. De complexidade arquitetônica e estrutural muitas vezes negligenciada, as *gridshell*s carecem de serem estudadas com profundidade no Brasil.

Avaliando-se possíveis configurações, tem-se que tais estruturas podem ser compostas por monoestrato ou em múltiplos estratos, ou seja, como uma ou mais camadas de hastes; podendo sofrer efeitos de instabilidade, assim como também possíveis efeitos dinâmicos devido cargas cíclicas; desse modo, constatase que a prática de projetos estruturais envolvendo *gridshell*s pode ser complexa e por vezes exaustiva.

Por esse e outros motivos, a utilização das *gridshell*s atualmente é relativamente pequena; mas certamente com o desenvolvimento de novas técnicas associadas a novos conceitos de eficiência construtiva, as aplicações destas estruturas no campo da Engenharia Civil e Arquitetura podem aumentar.

As *gridshell*s, por serem estruturas moldáveis, adaptam-se muito bem a novas técnicas arquitetônicas que visam uma transformação do tipo *morphing*, na qual os elementos estruturais e arquitetônicos se transformam de uma maneira

quase imperceptível. Assim, o aprofundamento de estudos em *gridshell*s de madeira pode abrir portas para novas pesquisas, novas técnicas e novos mercados.

O uso de madeira na construção de *gridshell*s se trata da solução mais comum, e muitas vezes a forma da estrutura dependerá da flexibilidade da madeira utilizada. Segundo Mesnil (2015, p. 93): "as técnicas desenvolvidas para execução de *gridshell*s elásticas já atingiram grau de maturidade". Isso pode ser observado em estruturas como Chiddingstone Orangery, em que apesar da baixa rigidez da madeira é capaz de sustentar revestimentos relativamente pesados.



Figura 3: Chidding stone orangery. Arquitetura: Peter Hulbert, Cálculo estrutural: Buro Happold (photo: Carpenter Oak & Woodl and Limited). Fonte: Mesnil, 2015.

A madeira é um dos materiais mais antigos utilizados na construção. Hoje as *gridshell*s a usam de uma forma inovadora, aproveitando de muitas das características desse material, tais como: robustez, liberdade de projeto (construção leve e esbelta), rápida execução, material em prol da sustentabilidade, segurança contra sismos.

Por fim, vale salientar que existe, atualmente, novidades no campo de estudo das estruturas *gridshell* na parte de aplicação de técnicas de otimização do tipo evolutivo na arquitetura por meio de potentes plataformas de *design*, como, por exemplo, o software Grasshopper e seus *plug-ins*. O conhecimento de aplicação das *gridshell*s pode também evoluir nesse sentido de modo a otimizar suas aplicações

em função de luminosidade, conforto acústico, conforto térmico, e eficiência estrutural. Isso dependerá de estudos prévios a respeito do desempenho estrutural das *gridshell*s, estando esta dissertação de mestrado inserida nesse contexto.

2.- OBJETIVOS

2.1 – Objetivos Gerais

- Propor uma metodologia de análise estrutural para gridshells de madeira.
- Verificar e evidenciar as *gridshell*s de madeira como estruturas eficientes (seguras e econômicas), citando as principais vantagens oferecidas pelo sistema de alto desempenho mecânico resultante de seu modelo.

2.2 – Objetivos Específicos

- Desenvolver uma das possíveis geometrias finais de gridshells para a cobertura em madeira de um edifício que se encontra em vias de recuperação estrutural por meio do método físico clássico digitalizado, o qual compreende simulação do efeito da gravidade sobre uma malha.
- Avaliar a estrutura usando o método dos elementos finitos (análise MEF) por meio de análise pura de tensões, considerando aumento de rigidez devido ao revestimento (OSB - *Oriented Strand Board* – tiras orientadas de madeira)
- Constatar a boa eficiência das *gridshell*s de madeira como estruturas capazes de vencer grandes vãos com pequenos deslocamentos verticais.
- Destacar os temas mais pertinentes e atuais a respeito das estruturas tipo gridshell e seu comportamento mecânico.
- Obter uma análise quanto ao efeito do vento sobre esse tipo de cobertura em madeira por meio de interação de fluido-estrutura com auxílio do software ANSYS.
- Realizar uma verificação de dimensionamento para o estado limite último (ELU) segundo as normas brasileiras vigentes.

3.- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nessa seção são apresentadas informações provenientes de estudos anteriores referentes ao tema das estruturas tipo *gridshell*s, bem como material resultante de estudo do autor em relação ao tema abordado nesse trabalho. Dessa maneira, busca-se expor de forma sucinta os mecanismos já adotados, assim como projetos e construções que abrangem o tema. Ademais, apresenta-se também a relevância do efeito do vento em estruturas e formas de se avaliar esses efeitos.

3.1 – Gridshell e suas Aplicações

3.1.1 – Generalidades

Como descreve Pone (2012), a *gridshell* se caracteriza como uma estrutura híbrida de grelha e casca, cujo comportamento mecânico predominante é caracterizado como de casca. Assim, apesar da *gridshell* consistir em uma grelha tridimensional, o efeito de membrana de uma casca prevalece nestas estruturas devido à dupla curvatura.

De acordo Hoefakker e Blaauwendraad (2005), as estruturas *gridshells* são muito eficientes para vencer grandes vãos com um mínimo de material utilizado. O que significa que a carga distribuída em uma fina camada levará ao desenvolvimento majoritário de esforços normais e de cisalhamento, enquanto, tensões normais advindas da flexão podem ser geralmente negligenciadas e o campo de tensões normais será distribuído uniformemente sobre a seção transversal. Esses efeitos resultam em uma estrutura muito eficiente.

Nota-se, contudo, que a carga utilizada para se moldar os elementos constituintes da estrutura de forma a compor o seu formato curvilíneo, assim como as condições de apoio, muitas vezes são incompatíveis com o previsto no projeto. Nesse caso, deve ser considerado os esforços devido à tensão normal de flexão somados aos das estruturas em cascas (HOEFAKKER e BLAAUWENDRAAD, 2005).

Segundo Mesnil (2013), as *gridshell*s do tipo elásticas, também conhecidas como pós-formadas, possuem o valor de peso próprio variando entre 70 N/m^2 e 200 N/m^2 , sendo classificadas como estruturas leves. Observa-se que a

busca de estruturas leves é justificada não apenas pelo fator de economia financeira, mas também pelo fato destas estruturas terem um viés ecológico, uma vez que reduzem o impacto ambiental e são facilmente desmontadas, podendo ainda serem reutilizadas.

Segundo Du Pelouxet et al (2015), essas estruturas podem vencer grandes vãos com muito pouco material. No caso do seu estudo em *gridshell* feita em compósito a base de fibra de vidro, foi possível cobrir um vão de 17 m x 29 m com uma estrutura pesando 50 N/m^2 .



Figura 4: Ephemeral Cathedral of Créteil (Paris, França), construída em 2013 em compósito de fibra de vidro. Estrutura enquanto a Catedral passa por uma reforma de 2 anos. Fonte: Du Peloux et al, 2015.

De um modo geral, as estruturas em cascas são superfícies tridimensionais que resistem às cargas por meio da sua forma e geometria, exemplo comum dessas estruturas são as cúpulas. Analisando-se, por exemplo, uma catedral não se pode distinguir a diferença entre a cobertura e as paredes, de forma que toda a estrutura trabalha como uma estrutura única. Todos os elementos são submetidos a esforços de compressão e, no caso das paredes laterais, há ainda a reação do empuxo, que une a cúpula através da espessura das paredes (PAOLI, 2007). Nesse caso as paredes funcionam como contrafortes, os quais geram a reação de empuxo necessária para que a casca, em formato de cúpula, permaneça estável.

Tensões normais são as tensões preponderantes neste tipo de estrutura. Com a exceção de efeitos de borda nas extremidades da casca onde estão os apoios, não se necessita de uma superfície espessa ou de elevada inércia para composição de cascas e de *gridshell*s; torna-se possível, portanto, criar estruturas esbeltas de aparência arquitetônica agradável e atraente. Por conta disso, a estrutura de *gridshell*s possui alta eficiência resistente, de forma a produzir estruturas com menos material e menos gasto energético. No entanto, como evidencia Paoli (2007), deve-se ressaltar que a utilização de cascas finas pode levar ao efeito de instabilidade, tornando-se fator de preocupação para a integridade da estrutura.

Por fim, pode-se apontar que estas estruturas, derivadas de dupla curvatura em grelha, têm ótimas aplicações a vãos extensos, podendo ser construídas com materiais que possuam resistência mecânica a esforços de flexão inferior ao aço, ou seja, utilizar de materiais tais como a madeira.

3.1.2 – Contexto Histórico das Gridshells

Segundo Pone (2012), as *gridshell*s podem ser divididas em dois grandes grupos: "pré-formadas", e "pós-formadas". Tal classificação refere-se a processo construtivo das *gridshell*s, de forma que as "pré-formadas" seriam *gridshell*s cujos componentes foram realizados na forma de peças pré-fabricadas, enquanto as "pós-formadas" seriam *gridshell*s, cujas formas são obtidas *in loco* por meio de envergamento de elementos retilíneos.

Conforme Pone (2012) essas duas tipologias estruturais tiveram histórias de desenvolvimento diferentes, de forma que o grupo das *gridshell*s "pré-formadas" foi a primeira metodologia desenvolvida e aplicada por meio de estudos pioneiros de Vladimir Shukhov e Richard Buckminster Fuller, sendo atualmente desenvolvida e aplicada pelos engenheiros estruturais da empresa Schlaich&Bergermann.

Segundo consta no International Database and Gallery of Structures (2007), a primeira *gridshell* (Figura 5) foi realizada em aço em 1897 pelo engenheiro russo Vladimir Shukhov na construção de um pátio fabril de uma indústria siderúrgica na cidade de Vyksa, a 150km sudoeste de Nizhny Novgorod, Russia (cerca de 400 km de Moscou).



Figura 5: A primeira *gridshell* realizada no mundo, foto tirada durante sua construção. Fonte: International Database and Gallery of Structures (2007).



Figura 6: Pátio fabril em Vyksa por volta de 1900. Fonte: Beckh e Barthel, 2009.

Já em relação às *gridshell*s "pós-formadas", também chamadas de *elastic gridshells* por outros autores (Peloux et al, 2015), tiveram sua origem em um período mais recente por meio de experimentos realizados por Frei Otto, iniciados em 1962 na cidade de Essen, Alemanha, sendo aplicada a estrutura do Multihalle Lattice Shell de Mannheim em 1975 (Figura 7 e Figura 8), por meio de uma parceria entre Frei Otto e Edmund Happold (PONE, 2012). Assim, por mais que as *gridshells* "préformadas" e "pós-formadas" possuam conceituações estruturais similares, a aplicação da técnica de cada uma delas em uma estrutura real possui uma distância temporal de 80 anos.



Figura 7: Multihalle Lattice Shell de Mannheim, vista interna. Fonte: FASP+EPP.



Figura 8: Mannheim Multihalle. Fonte: Mesnil, 2013.

Observa-se que, atualmente, a empresa Buro Happold (fundada por Edmund Happold em Bath, Inglaterra), desenvolve a tecnologia das *gridshells* "pós-formadas". Esses estudos voltaram a ser mais amplamente discutidos, desde o desenvolvimento do pavilhão de exposição japonês na Expo de Hannover, Alemanha em 2000 (Figura 1, página 1), realizado através da parceria entre engenheiros estruturais londrinos e o arquiteto Shigeru Ban. O pavilhão japonês de 2000 juntamente com a construção do Downland *Gridshell* (Figura 9), 2002 em Sussex, Inglaterra, foram as obras que deram sequência a uma série de construções mais recentes, e ligadas a essas configurações (PONE,2012).



Figura 9: Downland Gridshell, por Buro Happold e Edward Cullinan architects. Fonte: Gridshell.it.

3.1.3 – Desenvolvimento de Formas (Form Finding)

Como descreve Knippers (2009), para se chegar a uma solução ótima de uma *gridshell* é necessário um processo continuo de aplicação de conceitos de engenharia desde o início do projeto de arquitetura em pauta até o momento de montagem da estrutura em campo. Esse processo, conhecido como *digital chain*, pode ser descrito, segundo o mesmo autor, nos seguintes passos:

- Otimização da forma e da geometria.
- Desenvolvimento de uma malha (meshing).
- Desenvolvimento das conexões nodais.
- Análise estrutural.
- Produção e montagem.

O processo de encontrar de formas arquitetônicas, ou mesmo o desenvolvimento de um modelo buscando aparência ótima e funcionalidade, é conhecido como *Form Finding*.

Atualmente, o desenvolvimento destes modelos de estudo pode ser feito por meio de modelos físicos ou modelos digitais. Kuiken e Mentegazzi (2014) classificam as *gridshell*s em quatro famílias, baseados nas técnicas de *Form Finding* aplicadas no processo de criação de cada geometria. Cada uma dessas famílias será descrita a seguir.

3.1.3.1 – Método Físico Clássico (Classic Phisical Technique)

Este método se baseia em modelos físicos posicionados de modo invertido como os desenvolvidos por Antoni Gaudi na Sagrada Família em Barcelona e os estudos de Frei Otto em seu instituto "Institutfürleichte Flächentragwerke", também conhecidos como *hanging chain model* (SANDRONE, 2012).

Segundo Sandrone (2012), esse método possui o princípio já conhecido dos construtores de catedrais góticas antigas, em que uma corrente permanece fixa em seus extremos e ao ser submetida ao seu peso assume uma configuração de curvatura a ser utilizada. De forma que quando essa configuração for invertida, responderá de maneira ideal aos carregamentos de peso próprio pré-definidos.



Figura 10: Imagem que descreve o procedimento de inversão da geometria. Fonte: Otto (1974).



Figura 11: Imagem ilustrativa da modelagem por hanging chain. Fonte: Otto (1974).



Figura 12: Imagem ilustrativa da modelação por hanging chain. Fonte: Otto (1974).

Na modelação por *hanging chain*, observa-se que onde a corrente trabalha à tração o arco a ser construído trabalhará à compressão, pois ao se inverter a geometria também se inverte a característica do carregamento.



Figura 13: Modelo tipo "Físico Clássico" utilizado no projeto da Sagrada Família em Barcelona. Notase que a foto se encontra invertida. Fonte: Steve Darden (2011).



Figura 14: Modelo tipo "Físico Clássico" utilizado no projeto de Multihalle Lattice Shell em Mannheim, Alemanha. Fonte: SMD Arquitectes (2013).



Figura 15: Multihalle Lattice Shell em Mannheim, Alemanha. Fonte: Berberich, 2012.

No período em que o "Multihalle Lattice Shell" foi desenvolvido, em 1975, não existiam programas de computador que pudessem fazer o cálculo da posição de equilíbrio. O que tornou de suma importância o modelo físico. Observa-se que a malha da grelha foi projetada de modo que resistisse aos carregamentos e que ao mesmo tempo fosse suficientemente flexível para poder ser fletida até que atingisse a geometria desejada. Além do modelo físico foi necessário certificar se a base de apoio não sofreria recalques, pois esses não foram previstos na fase de projeto (SANDRONE, 2012).

Uma importante observação a este método clássico físico de *Form Finding* é que ao empregá-lo não se verifica os deslocamentos dos materiais que realmente serão utilizados na *gridshell*, por isso para sua aplicação é necessário associar aos cálculos considerações de características específicas dos elementos estruturadores tais como: a rigidez e os momentos de inércia. Como descreve Kuiken e Mentegazzi (2014), durante o processo de instalação e a vida útil da *gridshell*, tais discrepâncias podem causar colapso de elementos, especialmente quando se têm situações em que o modelo permite curvaturas as quais o material a ser utilizado na construção não as suporta. Por esse motivo, durante o processo de construção da cobertura em *gridshell* de madeira do Multihalle Lattice Shell, Mannheim, Alemanha, muitos elementos se romperam, devendo ser consertados ou substituídos.

Assim, de modo geral, as *gridshell*s clássicas são muito trabalhosas para se projetar e construir. Sendo muito mais eficientes os novos métodos que se

utilizam de análises computacionais, as quais podem prever o funcionamento mecânico da estrutura a diferentes carregamentos.

Por fim, pode-se dizer que nesta metodologia, cuja geometria está associada a deslocamentos de correntes devido ao efeito gravitacional, há falhas, pois a estrutura não estará sujeita a um único tipo de carregamento ao longo da sua vida útil, mas sim a uma envoltória dos mesmos. E por esse motivo, por mais que a estrutura seja estudada, deve-se considerar que ela dificilmente trabalhará de forma 100% otimizada.

3.1.3.2 – Método Digital Clássico (*Classic Digital Technique*)

Esse método pode ser descrito como a digitalização do método físico clássico de *Form Finding* descrito no item 3.1.3.1. Nessa técnica, a geometria será definida por uma metodologia matemática chamada de Relaxação Dinâmica (*Dynamic Relaxation Method*). De acordo com Kuiken e Mentegazzi (2014) esse método consiste na aplicação de movimentos aos nós da estrutura, os quais se moverão até se obter um equilíbrio estrutural entre todos os nós do sistema e as forças externas presentes. Aplicação do Método Digital Clássico a partir da relaxação dinâmica pode ser visto na Figura 16.



Figura 16: Aplicação do Método Digital Clássico a partir da relaxação dinâmica. Fonte: Kuiken e Mentegazzi (2014).

Kuiken e Mentegazzi (2014) também informam que esses modelos de simulação digital, desenvolvidos e em desenvolvimento, têm conseguido aumentar o nível de realismo do modelo, pois com os softwares é possível adicionar as propriedades mecânicas de materiais reais, a serem empregados.

Com a inserção dessas propriedades, o equacionamento obtido pode prever a curvatura admissível que os elementos da estrutura suportam, o que torna o método digital muitas vezes menos trabalhoso que a modelagem física clássica apresentada anteriormente.

Desse modo, o modelo não é mais físico, mas sim com parâmetros matemáticos digitalizados. Trata-se de um grande passo na execução de *gridshell*s, pois além do modelo se tornar mais prático, a execução de elementos estruturais passa a ter um potencial aumento de eficiência quando combinada com a fabricação digital; isso porque ao se aplicar essa técnica de fabricação, estar-se-ia diminuindo o

caráter artesanal de execução dessas estruturas, tornando o processo global de produção mais industrializado.

Apesar do método da relaxação dinâmica ser um bom método para se resolver equações não-lineares como descreve Guirardi (2011), há outras maneiras de se aplicar o método digital clássico. Uma forma seria a partir de um software de análise estrutural, com o qual é possível utilizar a forma inversa de malhas deformadas para gerar o formato de uma *gridshell*.

Ferreira (2013) utilizou o software ANSYS (software comercial para análise numérica de efeitos físicos) para simular cascas de concreto por meio de grandes deslocamentos fictícios, ao se variar parâmetros do modelo como momento de inércia (I) ou o módulo de elasticidade (E). O conceito aplicado a essa metodologia é o mesmo daquele descrito na modelação física clássica, em que se partindo de uma forma deformada se obtém a geometria da estrutura.

Nota-se nesse caso que ao se utilizar a aplicação direta de softwares de análise estrutural tem-se algumas vantagens tais como evitar falhas de transferência de um software a outro. Isso foi observado por Ferreira (2013) no desenvolvimento de geometrias de cascas de concreto por meio do software ANSYS.

3.1.3.2.1 – Método da Relaxação Dinâmica.

Em linhas gerais, o método da relaxação dinâmica é baseado em análises dinâmicas para se obter a resposta de um equilíbrio estático por meio de integrações ao longo do tempo. Como resposta tem-se configurações variantes até que se chegue a um equilíbrio final. As soluções dinâmicas intermediárias são soluções ditas transientes; as quais, segundo Guirardi (2011), se tratam de soluções fictícias e sem significado físico. A solução de interesse é aquela da fase estacionária final, pois representa a solução do equilíbrio estático. Na Figura 18, há a resolução para um carregamento constante ao longo do tempo (Figura 17), conforme Guirardi (2011).



Figura 17: Gráfico do carregamento aplicado ao longo do tempo. Fonte: Guirardi (2011).



Figura 18: Resposta ao longo do tempo. Fonte: Guirardi (2011).

3.1.3.2.2 – Método da Relaxação Dinâmica– Softwares de Design

No desenvolvimento do *design* industrial, o programa de computador Rhinoceros tem sido bastante utilizado, pois com esse software é possível se trabalhar melhor com superfícies ao em vez de volumes (FORTI, 2015). Uma grande vantagem desse software é que junto a ele pode se utilizar de outro software como uma espécie de plataforma de desenho parametrizado conhecido como Grasshopper.

O desenho parametrizado é um desenho programado, em que ao se definir alguns parâmetros é possível alterar diversas características do desenho final conforme ao que foi pré-definido na programação. Tal inovação é hoje um ótimo instrumento no desenvolvimento de *design*s, pois com a possibilidade de associar softwares de *design* com a programação é possível simular efeitos físicos, efeitos de conforto, assim como tantos outros efeitos, na etapa de pré-projeto.

Um programa que se pode utilizar o desenho parametrizado para se aplicar método de relaxação dinâmica é o Kangoroo Live Physics, (SENATORE e PIKER, 2014), o qual é utilizado junto ao Rhinoceros e ao Grasshopper. Esse programa foi desenvolvido por Daniel Piker (NAICU et al., 2014), e já foi utilizado para a realização de pavilhões como o pavilhão ZA (Figura 19 e Figura 20) em Cluj-Napoca, Romênia (NAICU et al., 2014).



Figura 19: Pavilhão ZA. Fonte: Naicu (2014).



Figura 20: Pavilhão ZA, foto retirada do seu interior. Fonte: Naicu (2014).

O software Kangoroo Live Physics é um simulador de forças físicas de interação instantânea que incorpora o comportamento físico diretamente a uma plataforma de desenho 3D do programa Rhinoceros. Assim, a simulação ocorre de forma que seja possível visualizar as etapas da iteração em execução. Esse software pode ser utilizado em otimização de *design*, assim como também para animação. A seguir (Figura 21, Figura 22 e Figura 23) se demonstra a aplicação de efeitos da gravidade com o Kangaroo.



Figura 21: Imagem do início da simulação com o Kangaroo. Fonte: Piker, 2013.


Figura 22: Imagem da simulação com o Kangaroo. Fonte: Piker, 2013.



Figura 23: Imagem da Inversão do efeito da gravidade com o Kangaroo. Fonte: Piker, 2013.

3.1.3.3 – Método Digital por Tecelagem (*Weaving Digital Technique*)

A família das *gridshell*s realizadas segundo o Método Digital por Tecelagem ou *Weaving Digital Technique* é descrita por Kuiken e Mentegazzi (2014) como um grupo de *gridshell*s, cujos elementos se entrelaçam entre si como se formassem a estrutura de um tecido, como pode se observar na Figura 24.



Figura 24: Pavilhão '10, utilizado para efeito de pesquisa na Universidade de Stuttgart, Alemanha. Fonte: Kuiken e Mentegazzi (2014)

Nesse grupo de *gridshell*s, ao invés de se ter conexões rígidas nos cruzamentos formados pelos seus elementos, tem-se elementos contínuos cuja junção pode ser realizada por intermédio de: entalhes, conexões flexíveis ou por atrito; como pode ser visto na Figura 25.



Figura 25: Conexões por entalhe utilizadas no Pavilhão '10, Stuttgart. Fonte: Kuiken e Mentegazzi (2014).

Esse método, baseado em técnicas artesanais de manufatura, abre um novo campo de possibilidades de aplicação de *gridshell*s, podendo ser aplicado em diversos modos. Um exemplo são as metodologias a partir da produção digital as quais permitem variar tamanhos e formas de elementos contínuos a serem utilizados na estrutura final como pode ser observado na Figura 26 (KUIKEN E MENTEGAZZI, 2014).



Figura 26: Braço robótico utilizado na manufatura dos compensados utilizados no Pavilhão '10, Stuttgart, Alemanha. Fonte: Kuiken e Mentegazzi (2014)

Ao se aplicar tecnologias como a produção digital, também conhecida como fabricação digital, é possível se utilizar de métodos artesanais de tecelagem a uma escala industrial. Isso é interessante no campo da construção civil, pois torna possível atender grandes demandas presentes no setor de edificações.

Na universidade de Stuttgart, Alemanha, se faz muita pesquisa no campo dessas novas *gridshell*s como a construção do pavilhão '10 e do pavilhão '12, Figura 27, (KUIKEN E MENTEGAZZI, 2014). No pavilhão '12 é possível verificar que a *gridshell* obtida realmente aparenta ser formada por um emaranhado de fios, mas na realidade ela é composta por vidro e fibra de carbono.



Figura 27: Pavilhão '12, utilizado para efeito de pesquisa na Universidade de Stuttgart, Alemanha. Fonte: Kuiken e Mentegazzi (2014).

Um ótimo exemplo para se ilustrar *gridshell*s de grande porte feitas a base do Método Digital por Tecelagem, se trata do centro Pompidou de Metz, França. Idealizado pelos arquitetos Shigeru Ban e Jean de Gastines, (KUIKEN E MENTEGAZZI, 2014), e viabilizado através de aplicações de métodos de fabricação digital pela empresa Designtoproduction, o Centro Pompidou representa o enorme potencial estético e estrutural das *gridshell*s.



Figura 28: Centro Pompidou, cidade Metz, França. Fonte: Kuiken e Mentegazzi (2014).



Figura 29: Centro Pompidou vista interior, cidade Metz, França. Fonte: Kuiken e Mentegazzi (2014).



Figura 30: Modelo digital do Centro de Pompidou, Metz, França. Fonte: Designtoproduction (2008).

3.1.3.4 – Método Digital por Algoritmos Generativos (*Generative Algorithm Technique*)

Atualmente existem modos diferenciados de aplicar *Form Finding* por meio de Algoritmos Generativos. Segundo Kuiken e Mentegazzi (2014), esse método possui a característica de organizar a superfície geométrica e a conformidade espacial a partir de fatores aleatórios e parâmetros externos.

O equacionamento matemático de tal método tem origem em instrumentos de evolução da natureza tais como a mutação e o *crossover*. Isso se justifica devido ao fato que a natureza utiliza dessas ferramentas para gerar variedade de seres e nesse contexto, o algoritmo tem por objetivo gerar variedade de *design*s e configurações geométricas. Para ilustrar uma estrutura realizada com esse algoritmo há o Pavilhão'11, construído na Universidade de Stuttgart, Alemanha (Figura 31).



Figura 31: Pavilhão '11, utilizado para efeito de pesquisa na Universidade de Stuttgart, Alemanha Fonte: Kuiken e Mentegazzi (2014).

Dimcic (2012), utiliza dois exemplos para demonstrar a eficiência do processo de otimização por algoritmos genéticos na definição da disposição geométrica das "células" de uma *gridshell*. É salientado que para início de cada otimização é necessário ter uma superfície de forma livre, a qual será a base para a

formação da grelha, sendo os parâmetros para otimização definidos na seguinte ordem: 1. Combinação dos carregamentos, 2. Onde e como a estrutura é suportada, 3. A seção dos elementos estruturais, 4. Escolha do material, 5. Definição da função objetivo, isto é minimização das tensões, minimização dos deslocamentos, maximização da carga de flambagem etc. Em seu trabalho foram obtidos os resultados apresentados na Figura 32.



Figura 32: Aplicação de algoritmo genético para otimização de uma *gridshell* sob carregamento gravitacional. Fonte: Dimcic, 2011. Tradução: Proprio autor.

Os resultados de sua pesquisa demonstram a redução das tensões de von Mises solicitantes ao longo das iterações numéricas realizadas o que implica em um melhor comportamento mecânico da estrutura em relação as ações avaliadas sobre a mesma.

Nota-se que o critério de resistência de von Mises, também conhecido como critério da máxima energia de distorção, trata-se de um critério de escoamento de grande aceitação para materiais dúcteis e isotrópicos, seu princípio é baseado em conceitos de energia de deformação. Nesse critério a energia elástica total é dividida em duas partes: uma associada com as mudanças volumétricas do material e a outra com as distorções de cisalhamento (POPOV, 1978, apud NICOLAS, 2006).

3.1.4 – Métodos Construtivos

As superfícies curvas de uma *gridshell* podem abranger expressões polinomiais relativamente complexas. Quando se tem tais superfícies curvas, é comum se utilizar de elementos pequenos para se obter uma superfície facetada. A complexidade disso requer, muitas vezes, o desenvolvimento de muitas peças específicas para um dado encaixe, o que pode encarecer a estrutura como um todo. Por esse motivo é fundamental planejar o método construtivo da *gridshell* já na fase do pré-projeto.

A princípio pode-se distinguir duas metodologias principais para construção de *gridshells*: uma que envolve o envergamento de elementos lineares até que os mesmos atinjam a forma final desejada (Figura 33) e outra que envolve o processo de pré-fabricação para definição da forma final utilizando-se de processo como a fabricação digital (Figura 34). Segundo Pone (2012), essas duas metodologias podem ser classificadas como "pós-formadas" e "pré-formadas" respectivamente.



Figura 33: Processo construtivo de uma *gridshell* realizada em Nápoles, Itália, pelo grupo de pesquisas de Sergio Pone. Fonte: Pone (2013).



Figura 34: Etapas construtivas da estrutura da *gridshell* do Centro Pompidou de Metz, França. Fonte: Designtoproduction (2008).

3.1.4.1 – Metodologia das Gridshells "Pré-formadas"

A metodologia das *gridshell*s "pré-formadas" trata da aplicação de técnicas semelhantes àquelas aplicadas ao setor automobilístico, em que as peças são pré-definidas em softwares de *design* e executadas por máquinas que recebem as coordenadas desses softwares. Esse processo é atualmente conhecido como fabricação digital, e possui aplicação em vários setores industriais.

Utilizar fabricação digital em *gridshell*s é interessante no sentido de obter geometrias cuja execução manual seja muito difícil. Entretanto, deve-se levar em conta que uma construção como essa possui muito desperdício de material assim como um elevado custo de hora/máquina. Isto implica em construções custosas financeiramente e com maior grau de agressão ao meio ambiente.



Figura 35: MyZeil (Arquiteto: Massiliamo Fuksas) em Frankfurt, Alemanha, *gridshell* em aço com elementos pré-fabricados. Fonte: Mesnil, 2013.

3.1.4.2 – Metodologia das Gridshells "Pós-formadas"

Ao se aplicar a metodologia construtiva de *gridshell*s "pós-formadas" também é possível se obter estruturas de grande porte. Como ilustra a Figura 36, tais gridshells podem ser obtidas por meio de uma rede regular retangular que gradativamente vem sendo montada de modo a atingir a dupla curvatura almejada. Isso pode ser obtido pressionando os elementos da grelha a partir do solo, como se fez no caso da construção do Mannheim Multihalle em 1975, SMD ARQUITECTES (2013), Figura 36.



Figura 36: Etapas construtivas da estrutura da *gridshell* do Mannheim Multihalle. Fonte: SMD ARQUITECTES (2013).

Exemplo de modelo digital de uma gridshell pós-formada:



Figura 37: Conformação de uma *gridshell* do tipo pós-formada obtida por meio do ANSYS. Fonte: Próprio autor e Cilmar Donizeti Basaglia (FEC-Unicamp).

Como descreve Hernández e Gengnagel, 2012, O Multihalle em Mannhein, Alemanha (1975), Figura 15, e o Museu Downland em Sussex, Inglaterra (2002), Figura 9, são exemplos pioneiros de estruturas em *gridshell* de madeira, em Tsuga (coníferas pertencentes à família *Pinaceae*) e Carvalho (árvores do género Quercus da família *Fagaceae*). Com o módulo de elasticidade longitudinal da ordem de 10 GPa, módulo de resistência a flexão de 30 MPa e deformação última da ordem de 2%, esses tipos de madeira somados ao caso das estruturas descritas anteriormente, implicaram na constituição de uma estrutura a duplo estrato em cada direção da grelha.

Nesses casos, durante o processo de construção, cada camada foi fletida independentemente uma da outra, de modo que apenas um dos estratos atingisse valor próximo ao limite do módulo de resistência a flexão. Com a forma definida, eram adicionados blocos de cisalhamento entre as duas camadas, transferindo assim forças cisalhantes entre eles. Com isso, a rigidez de ambas as camadas juntas era ativada, promovendo uma estrutura com maior rigidez global (HERNÁNDEZ e GENGNAGEL, 2012).

Baseando-se na descrição de Paoli (2007) a respeito deste último método construtivo, pode-se dizer que a partir de certa conformação quadrada de uma

grelha, uma força vem aplicada em um nó do retículo de modo a causar uma rotação entre os membros; obter-se-á, assim, a transformação da célula inicial em paralelogramo descrito em três dimensões. Consequentemente tais conformações causarão a modificação das diagonais das células, permitindo que a casca obtenha uma superfície de dupla curvatura. Uma vez que a casca se encontra em sua forma final (por meio de empuxos e trações, de acordo com a técnica escolhida pelo projetista) suas conexões vêm fixadas.

Essa metodologia é melhor percebida quando comparamos a Figura 38 com a Figura 39, demonstrando-se respectivamente a fase inicial e final do processo para o caso da estrutura do Savill Garden *gridshell*. A conformação desse projeto foi obtida colocando-se as hastes de madeira no topo de uma estrutura de andaimes temporários, os quais foram eliminados após atingir a curvatura almejada (TOUSSAINT, 2007).

Na construção de Savill Garden *gridshell*, pode-se observar que a solução adotada foi de utilizar uma estrutura a duplo estrato. Segundo Sandrone (2012), utilizar estruturas que possuam essa configuração têm o objetivo de aumentar o momento de inércia da seção e consequentemente a resistência estrutural da cobertura. Para que esses tipos de *gridshell*s trabalhem como uma estrutura única, os dois estratos que formam a estrutura devem trabalhar em conjunto; para tanto se introduz blocos de transferência de esforço cortante próximo as conexões, como pode ser observado na Figura 38. Com esses blocos é possível distribuir os esforços tangenciais em ambos os níveis dos estratos (BUILDING FOR A FUTURE, 2006).



Figura 38: Ilustração do Savil Garden *Gridshell* na etapa anterior ao envergamento de seus elementos. Fonte: Building For A Future (2006).



Figura 39: Ilustração do Savil Garden *Gridshell* com sua cobertura concluída. Fonte: Building For A Future (2006).

Outro modo de se atingir a geometria da *gridshell* pode ser por meio de guindastes como foi feito no caso da construção do Ephedral Cathedral of Créteil, Paris, França, Figura 40.



Figura 40: Arqueamento da primeira grelha por dois guindastes, construção da Ephedral Cathedral of Créteil. Fonte: Du Peloux et al, 2015.

Usualmente, a morfologia da grelha a dupla curvatura não é trivial e leva ao desenvolvimento de muitas conexões complexas e caras. Por esse motivo, utilizou-se de uma solução original e inovadora de arqueamento, utilizando-se da vantagem inerente aos flexíveis elementos delgados. No processo de montagem uma grelha plana de elementos lineares e contínuos é montada no nível zero. Os elementos são fixados uns aos outros sem que tenham rigidez ao cisalhamento, de modo que a grelha possa ser envergada elasticamente até que atinja seu formato final, Figura 40. Após o acréscimo de uma terceira camada de membros contraventantes a estrutura passa a ser uma casca, isto é, uma *gridshell* (Du Peloux et al, 2015).



Figura 41: Etapas construtivas do Epheral Cathedral of Créteil, Paris. Fonte: Du Pouleux et al, 2015.

Hernández e Gengnagel apontam uma observação importante ao que se refere às *gridshell*s elásticas (*gridshell*s pós-formada) ao afirmarem que devido à resultante de flexão, o material das *gridshell*s é mais solicitado durante o processo de envergamento. A flexão induzida é diretamente proporcional ou módulo de elasticidade do material (E) e as propriedades geométrica da seção dos elementos (I), e inversamente proporcional a curvatura da *gridshell* (r, raio de curvatura dos perfis constituintes da *gridshell*).

$$M_b = \frac{EI}{r} \tag{1}$$

Na Figura 42 é mostrada a distribuição de tensões de uma *gridshell* envergada de forma a ter o formato anti-clástico. A *gridshell* da esquerda, a qual não é sujeita a carregamentos externos, já apresenta um grau de utilização da resistência de seu material da ordem de 60%. Quando considerado um carregamento uniforme de neve de 0,9 kN/m² aplicado sobre a estrutura se atinge um grau de utilização da resistência da ordem de 90% (HERNÁNDEZ e GENGNAGEL, 2012).



Figura 42: Tensões de flexão (von Mises) de uma *gridshell* anti-clastica. Sem carregamento externo (figura a esquerda), com carregamento de neve uniformemente distribuído (figura a direita). Fonte: Hernández e Gengnagel, 2012.

A constatação destes autores salienta a necessidade de fazer uma análise da protensão presente nos elemetos da *gridshell* devido ao seu processo de formação. Por conta disso, a análise de estruturas *gridshell* do tipo pós-formadas apresentam maior grau de complexidade ao que se refere ao dimensionamento estrutural.

3.1.5 – Madeira como Material Construtivo

A utilização da madeira nas *gridshell*s se deve principalmente à liberdade de projeto que é dada ao projetista. Construir com madeira implica em construções leves, o que consequentemente implica em um conjunto estrutural mais enxuto como um todo, reduzindo a espessura de elementos estruturais; além disso, a madeira pode ser trabalhada e moldada com facilidade, ainda mais com a utilização de Madeira Laminada Colada (MLC).

Outro fator que coloca a madeira como um material interessante do ponto de vista construtivo é a rápida execução de estruturas ao se considerar o tempo de construção e de montagem; ademais a madeira tem a vantagem de não necessitar de tempo de cura para a retirada do escoramento como ocorre com o concreto. Um exemplo de rápida execução de obras de madeira é a empresa italiana Area Legno (www.arealegno.it), a qual executa uma casa de madeira de 150 metros quadrados em 45 dias; apresentando uma proposta de valor que envolve 60 dias para execução do projeto da casa, 30 dias para produção dos elementos e por fim 45 dias para execução da obra. Hoje esse modelo de negócio não é comum no Brasil dado que esse tipo de construção não é tradicional no país, contudo esse setor possui uma tendência de crescimento, como pode ser verificado através de empresas tais como Ita construtora (www.itaconstrutora.com.br).

Outro motivador para a construção em madeira se deve ao seu caráter sustentável, atualmente se verifica uma forte tendência ecológica da utilização de estruturas mais sustentáveis, porém quase todos os materiais de construção necessitam de significativo consumo de energia para sua fabricação. A utilização da madeira não possui essa necessidade já que sua estrutura é oriunda do processo de fotossíntese, necessitando apenas de luz do sol, água e gás carbônico (CALIL JUNIOR et al., 2002).

Outra vantagem ambiental da madeira é o fato desse material se caracterizar como um ótimo isolante térmico, gerando economia na utilização de sistemas para refrescar ou aquecer o ambiente interno.

3.1.6 – Configuração dos Esforços

A estrutura das *gridshell*s é formada por uma multiplicidade de pequenos elementos, isso é, múltiplas células. Cada célula é normalmente constituída por quatro hastes dispostas em forma de paralelogramo (Figura 43). Ao contrário de uma estrutura em casca que pode transferir cargas em todas as direções, uma *gridshell* do tipo esbelta, no entanto, só pode transmitir cargas axialmente à direção das suas ripas.



Figura 43: Distribuição dos esforços internos em uma casca (esquerda) e em uma célula *gridshell* (direita). Fonte: Mihalik *et al.* (2013).

Quando se trabalha com *gridshell* cujos elementos não possuam nenhuma limitação de esforços na diagonal dos paralelogramos que a formam, a mesma se comporta como uma serie de arcos paralelos que trabalham em conjunto para resistir aos carregamentos impostos. Quando há expectativa que o comportamento de uma *gridshell* se aproxime mais daquele de uma casca ao invés de um pórtico espacial, faz-se necessário utilizar de elementos que imponham restrições nas diagonais de suas células (TOUSSAINT, 2007).

Segundo Toussaint (2007), ao se impor rigidez às diagonais, consegue-se transferir esforços cortantes de uma extremidade a outra dos elementos quadriláteros constituintes da estrutura, tal feitio faz com que a *gridshell* trabalhe de maneira mais próxima a de uma casca contínua. Toussaint também propõe que para se obter esse tipo de rigidez se pode utilizar: conexões rígidas, contraventamentos, travamentos rígidos, ou por elementos totalmente preenchidos.



Figura 44: Distribuição dos esforços internos em elementos de *gridshell* com travementos diagonais. Fonte: Toussait (2007).

Sandrone (2012) faz uma observação de que esses elementos que servem para gerar rigidez diagonal são importantes para garantir maior estabilidade à estrutura quando esta sofre carregamentos assimétricos tais como o carregamento de vento.

3.2 – Ação do Vento sobre Estruturas

3.2.1 – Generalidades

Com base nos estudos realizados nessa revisão bibliográfica se constatou que ainda há poucos estudos acadêmicos da ação do vento em estruturas *gridshell*s, em particular, no Brasil. Contudo, o vento representa uma ação muito importante no contexto estrutural, podendo levar edifícios inteiros ao colapso, como já ocorreu em Toronto no Canadá (Figura 45), ou a situação de comprometimento da estrutura como ocorreu no Edifício Meyer-Kiser nos Estados Unidos (Figura 46).



Figura 45:Edifício em Toronto que entrou em colapso devido ao efeito do vento. Fonte: Souza (2015).



Figura 46: Edifício Meyer-Kiser que sofreu plastificação devido ao efeito do vento em Miami, EUA. Fonte: Souza (2015).

No caso de construções consideradas leves ou esbeltas, como coberturas aplicadas a grandes vãos, pode-se ocorrer inversão de esforços solicitantes. Tal situação é uma consideração muito importante na aplicação de *gridshell*s, pois como foi descrito nos itens anteriores, as *gridshell*s do tipo clássico possuem sua forma definida por meio da inversão de modelos que simulam a gravidade. Desse modo, as ações acidentais do vento podem exigir um aumento de rigidez das *gridshell*s.

3.2.2 – Fundamentos Teóricos Básicos

Segundo Pitta (2002), vento é definido como o movimento das massas de ar causadas por condições de pressão e de temperatura na atmosfera. Sua causa básica é o aquecimento não uniforme da atmosfera, provocado principalmente pelos raios ultravioletas emitidos pelo sol que aquecem a superfície da Terra. A diferença entre as superfícies terrestres, a evaporação da água, sua precipitação e a rotação da Terra produzem a movimentação de massas de ar que originam os ventos.

3.2.2.1 - Teorema de Conservação de Massa

O teorema de conservação de massa diz que ao se considerar um fluido em movimento, o mesmo deve obedecer à equação da continuidade; isso implica que, em um determinado intervalo de tempo, a massa de fluido que entra num certo volume é igual à massa que sai mais a variação da massa contida no elemento (PITTA, 2002).

Tem-se que durante o fluxo permanente, as propriedades dos fluidos podem mudar de ponto a ponto dentro um volume de contorno, mas em qualquer ponto fixo dentro desse volume as propriedades permanecem constantes. Portanto, o volume, a massa, e a energia contidos em um fluxo permanente permanecem constantes (ÇENGEL e CIMBALA, 2013).

Com esses dois conceitos, Pitta (2002), considera um fluido permanente limitado pelo volume de um tubo de corrente ilustrado na Figura 47 pelas seções S_1 e S_2 ; e o observa em relação a um intervalo de tempo d_t .



Figura 47 - Contorno de um tubo de corrente de um fluido. Fonte: Pitta (2002).

Na dada situação tem-se:

Massa de fluido que entra: $\rho_1(A_1v_1d_t)$

Massa de fluido que saí: $\rho_2 (A_2 v_2 d_t)$

Em regime:

$$\rho_1(A_1 v_1 d_t) = \rho_2(A_2 v_2 d_t) \tag{2}$$

Considere a seguinte notação:

A: área de uma superfície plana;

v: velocidade média do fluido;

 ρ : massa específica do fluido.

Se o fluido for incompressível: $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ logo:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \tag{3}$$

Dessa expressão deduz-se que, se as linhas de fluxos se afastam a velocidade do fluido diminui e se as linhas de fluxos se aproximam a velocidade do fluido aumenta (PITTA, 2002).

3.2.2.2 - Teorema de Bernoulli

O teorema de Bernoulli (teorema de conservação de energia) aplicado para um fluido em regime de escoamento permanente, sem viscosidade, irrotacional e incompressível, pode ser expresso pela equação abaixo (PITTA, 2002):

$$p + \rho g z + \frac{1}{2} \rho v^2 = constante$$
(4)

Onde:

p: pressão estática

 ρ : massa específica do fluido;

g: aceleração da gravidade;

z: cota de referência;

v: velocidade do fluido.

O termo ρ . *g*. *z* é desprezível para a aplicação em questão, assim a expressão pode ser apresentada como:

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 = constante$$
(5)

Ou seja: pressão estática + pressão dinâmica = pressão total = constante.

3.2.2.3 - Pressão Estática

No caso de um fluido em repouso, a pressão estática pode ser definida como a força normal aplicada a um infinitesimal de área, isto é:

$$p = \lim_{dA \to 0} \frac{dF_n}{d_A} \tag{6}$$

Onde: dF_n é a força normal aplicada na área elementar d_A .

3.2.2.4 - Pressão Total

Segundo a descrição de Pitta (2002), a medida de pressão total pode ser feita aplicando-se o conceito de ponto de estagnação. Quando se tem um objeto mergulhado em um fluido em movimento, algumas linhas de fluxo podem incidir perpendicularmente à sua superfície. Com isso, o fluido estagna, isto é, a velocidade do fluido nesse ponto é nula e, por conseguinte, a pressão dinâmica é igual a zero, de modo que a equação de Bernoulli para esse ponto será representada apenas pela pressão estática.

Considerando-se P_0 e v_0 , respectivamente, a pressão e a velocidade em um ponto do fluxo anterior a um dado objeto fixo, e P_e e v_e a pressão e a velocidade em um ponto e do objeto em questão, aplica-se a equação de Bernoulli de forma a ter:

$$P_0 + \frac{1}{2}\rho v_0^2 = P_e + \frac{1}{2}\rho v_e^2 \tag{7}$$

Analisando o ponto "e" como um ponto de estagnação, tem-se $v_e = 0$, assim fica-se com:

$$P_0 + \frac{1}{2}\rho v_0^2 = P_e \tag{8}$$

A equação 8 apenas descrita demonstra que a leitura da pressão estática em um ponto de estagnação fornecerá o valor de pressão total daquele ponto e consequentemente de pontos na mesma linha de fluxo deste. Henri Pitot, em 1732, utilizou essa técnica para mensurar a pressão total utilizando-se um pequeno tubo de vidro com uma curva em ângulo reto, esse mecanismo ficou conhecido como tubo de Pitot (PITTA, 2002).

3.2.2.5 - Pressão de Obstrução

A pressão de obstrução (*q*) refere-se a diferença entre pressões estáticas, analisando as equações anteriores é possível chegar a seguinte expressão de pressão de obstrução:

$$P_e - P_0 = \frac{1}{2}\rho v_0^2 = q \tag{9}$$

Nota-se que numericamente a pressão de obstrução possui o mesmo valor da pressão dinâmica do fluxo de fluido em local não perturbado por obstáculo (PITTA, 2002).

De acordo com Pitta (2002), nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP), 15 °C e 1 atm, a massa específica do ar é igual a 1,2253 kg/m³. Nas dadas circunstâncias o valor da pressão de obstrução é igual a $q = 0,613v^2$ (q em N/m² e v e m/s). Segundo a ABNT:NBR 6123 a expressão adotada é: $q = 0,613 \cdot V_k^2$, sendo V_k a velocidade característicado vento.

3.2.2.6 - Coeficientes de Pressão

Considerando um objeto mergulhado em um fluido em movimento uniforme, observa-se que o objeto desvia as linhas de fluxo como ilustra a Figura 48.



Figura 48 - Linhas de fluxo no entorno de um objeto. Fonte: Pitta (2002).

Em alguns pontos do objeto, certas linhas de fluxo incidem perpendicularmente ao objeto e se estagnam (pontos de estagnação), nesses pontos a pressão efetiva é a pressão de obstrução. Já para um ponto p na superfície do objeto tem-se:

$$P_0 + \frac{1}{2}\rho v_0^2 = P_p + \frac{1}{2}\rho v_p^2 \tag{10}$$

E assim a pressão efetiva no ponto p é dada por:

$$\Delta P_p = P_p - P_0 = \frac{1}{2}\rho(v_0^2 - v_p^2)$$
(11)

$$\Delta P_p = \frac{1}{2} \rho v_0^2 \left(1 - \frac{v_p^2}{v_0^2} \right)$$
(12)

$$\Delta P_p = q \left(1 - \frac{v_p^2}{v_0^2} \right) \tag{13}$$

Adotando-se:

$$C_p = \left(1 - \frac{v_p^2}{v_0^2}\right) \tag{14}$$

Tem-se:

$$\Delta P_p = C_p q \tag{15}$$

Por meio da equação 15, tem-se uma expressão que relaciona a variação de pressão com pressão de obstrução, essa relação servirá para análises estruturais. Assim, o valor de pressão a ser avaliado dependerá do coeficiente de pressão (C_p) definido acima e da pressão de obstrução (q). Observa-se que quando o valor de C_p é positivo ocorre sobrepressão, e quando o valor C_p é negativo ocorre sucção.

Observa-se que quando o objeto analisado não for totalmente fechado (assim como ocorre em uma edificação), independentemente da posição da abertura, em todas as superfícies que compõe o objeto ocorrerá pressões do lado externo e interno (PITTA, 2002).



Figura 49 - Linhas de fluxo ao entorno de um objeto com abertura. Fonte: Pitta (2002).

Para o ponto e, situado na face externa do objeto, tem-se:

$$C_{pe} = \frac{\Delta P_e}{q} \tag{16}$$

Cpe – Coeficiente de pressão e de forma externo.

E para o ponto interno i, situado na face interna, tem-se:

$$C_{pi} = \frac{\Delta P_i}{q} \tag{17}$$

Cpi – Coeficiente de pressão e de forma interno.

Desse modo, a diferença de pressão é dada por:

$$\Delta P_p = (C_{pe} - C_{pi})q \tag{18}$$

Um valor positivo de ΔP_p indica uma pressão efetiva com o sentido de uma sobrepressão externa, e um valor de ΔP_p negativo indica uma pressão efetiva com o sentido de uma sucção externa (ABNT:NBR6123).

No caso da utilização de túneis de vento para a obtenção do valor adimensional do coeficiente de pressão tem-se em conta a relação dinâmica do vento e a pressão exercida nas faces da estrutura. De modo que os valores de *Cp* são calculados dividindo-se o valor da média da pressão pela média do valor da pressão de referência do Tubo de Pitot, como se pode ver na seguinte equação (GARCIA, 2013):

$$C_p = \frac{p - p_{ref}}{p_{din\bar{a}mica}} \tag{19}$$

$$C_p = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2}\rho v_0^2}$$
(20)

onde:

p: pressão de leitura no ponto (Pa);

 p_{ref} : p_0 : pressão estática de referência em um ponto do escoamento não perturbado pelo modelo físico;

 ρ : densidade do ar no interior do túnel de vento (kg/m³);

 v_0 : velocidade do vento antes de entrar em contanto com o modelo físico (m/s);

 $p_{din \hat{a}mica}$: pressão dinâmica de referência no Tubo de Pitot.

3.2.2.7 – Camada Limite

O engenheiro alemão Ludwing Prandtl, em 1904, observou que os escoamentos de fluidos de baixa viscosidade, como, por exemplo, escoamentos de água e de ar (escoamentos com elevado valor de Reynolds), podem ser divididos em uma fina camada viscosa, ou camada-limite, próxima das superfícies sólidas e das interfaces. Fazendo essa divisão do domínio em duas zonas (a camada limite e a zona exterior à camada limite), Prandtl constatou que era possível simplificar

diversos termos das equações de conservação inerente aos fluídos (FERREIRA, 2013).

A camada limite é uma região de transição do escoamento víscido para o escoamento invíscido (arrasto zero), como pode ser visto na Figura 50, a constatação dessa camada tornou possível reconciliar a teoria que se tinha de fluídos com a experimentação, sendo ela a região onde se desenvolve as tensões oriundas do arrasto (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2006).



Figura 50: Esquema de uma camada limite. Fonte: Fox; Mcdonald; Pritchard, 2006.

O conceito de camada limite permitiu a solução de problemas de escoamentos viscosos, algo que seria demasiadamente complexo pela aplicação das equações de Navier-Stokes em todo o campo do escoamento já que essas equações são de elevada complexidade. Na camada limite tanto as forças viscosas quanto as forças de inércia são importantes, dessa forma, sabe-se que, para a caracterização da espessura da camada limite, o Número de Reynolds é significativo (GALTER, 2015).

Ainda segundo o mesmo autor, a camada limite está presente tanto no regime laminar, de transição ou turbulento. Observando-se que no escoamento viscoso e incompressível de um fluído sobre uma placa plana de comprimento infinito (Figura 51), uma partícula do fluido sofre distorção devido à variação do gradiente de velocidade entre um tipo de regime e outro.



Figura 51: Camada limite sobre uma placa plana no regime laminar e turbulento. Fonte: Munson, 2004, adaptada por Galter, 2015.

Na Figura 51, tem-se que:

U: velocidade do fluído;

 δ : espessura da camada limite.

3.2.3. – Consideração de Ações Resultantes do Vento - Aspectos Normativos

Para consideração de ações resultantes do vento no Brasil, utiliza-se a norma "ABNT:NBR 6123 – Forças devidas ao vento em edificações". Entretanto a norma determina carregamentos para estruturas bem definidas e de geometria regular, não considerando fatores importantes como a geração de "Efeito Venturi" (aceleração de um escoamento por estreitamento) devido edificações vizinhas próximas e nem o caso geometrias não regulares, em casos como esses se recomenda recorrer a ensaios em túnel de vento, (SOUZA, 2015).

De acordo Ferreira (2013), é aconselhável que nos casos em que uma edificação sofra perturbações importantes pela ação do vento, seja por dimensões, formas ou por obstáculos na sua vizinhança, simule-se as características do vento natural através de ensaios em túnel de vento.



Figura 52: Efeito Venturi, no qual as edificações vizinhas afunilam o vento, acelerando seu fluxo. Fonte: SOUZA (2015).

Como aponta a norma brasileira de ventos (ABNT:NBR6123,1988), na análise do vento como fluido ideal é necessário conhecer algumas características referentes ao comportamento do vento, tais como a variação de altura da estrutura em relação ao solo, da rugosidade, a presença de obstáculos ao derredor.

Segundo Ferreira (2013), a rugosidade é uma característica cujos efeitos desaparecem somente a partir dos mil metros de altura, quando a superfície terrestre deixa de ter influência significativa sobre o vento que é o parâmetro diretamente relacionado ao desenvolvimento da camada limite do escoamento. Ou seja, nas camadas mais baixas a velocidade do vento é afetada pela fricção ou atrito com a superfície terrestre de forma que quanto maior a rugosidade ou atrito do terreno, menor será a velocidade do vento. Baseando-se na tese Ferreira e em Çengel e Cimbala (2004), definem-se algumas características comportamentais do vento relacionadas ao seu comportamento como fluido a seguir:

- O vento é provocado por diferenças de temperaturas de massas de ar na atmosfera;
- Vento possui peso específico muito baixo;
- O vento possui viscosidade baixa, considerada nula em algumas situações;

- O vento sempre atua perpendicularmente a superfície que obstrui a passagem;
- Os efeitos do vento podem ser do tipo de sobrepressão ou de sucção;
- A viscosidade do ar aumenta conforme se aumenta a temperatura.

Além dos fatores acima citados podemos citar que o vento de modo geral trata-se de um fluído incompressível, desse modo, considerando o fluxo de ar no entorno de uma edificação, pode-se considerar o vento como um fluido incompressível até velocidades de 300km/h (PITTA, 2002).

3.2.3.1 – Vento Convenções de Nomenclatura

Quando se fala em ação do vento é necessário entender a convenção da natureza de seus carregamentos como ilustrado na Figura 53.



Figura 53: Regiões de barlavento e sotavento nas edificações. Fonte: Souza ,2015.

A seguir apresenta-se a descrição das principais convenções:

- Barlavento é o termo que define a região de onde sopra o vento em relação à edificação;
- Sotavento é a região oposta àquela de Barlavento;
- Sobrepressão se trata da compressão de uma superfície e possui o sinal positivo;

 Sucção se trata de uma pressão negativa com efeito oposto àquele de sobrepressão, possuindo sinal negativo.

3.2.3.2 – Método de Cálculo da Ação do Vento – ABNT:NBR 6123, 1988

A ABNT:NBR 6123,1988 apresenta três modelos de cálculo da ação do vento em estruturas, dividindo-se em:

Um primeiro modelo que aplica as forças do vento como esforços estáticos na estrutura, um segundo modelo que utiliza de efeitos dinâmicos simplificados, e um terceiro e último modelo que utiliza de um modelo dinâmico discreto. A seguir é apresentado o primeiro modelo, o qual se trata do modelo mais utilizado em projetos atualmente.

3.2.3.2.1 – Método Cálculo – Forças Estáticas Devido ao Vento

No caso de estruturas estáticas cujos efeitos dinâmicos do vento possam ser desconsiderados, a atual norma de ventos (ABNT:NBR6123,1988) recomenda a utilização do método quase-estático para definição de esforços. Assim, por esse método, aproxima-se o efeito do vento sobre a estrutura por meio de forças estáticas equivalentes.

Neste modelo admite-se que as flutuações das pressões nas edificações correspondam exatamente com as flutuações das pressões atmosféricas. Fisicamente não é completamente correta essa consideração, pois as edificações possuem flutuações próprias após a interação com o fluido. Contudo, por questões práticas, essa metodologia é amplamente aplicada por várias normas do mundo. Observa-se, no entanto, que a incompatibilidade desse método com a realidade poderá trazer problemas no momento de se avaliar o efeito do vento sobre revestimentos (SOUZA, 2015).

Segundo o modelo, os esforços devido ao vento sobre a estrutura ocorrem por meio de pressões sobre a superfície da mesma. Assim, esse efeito é definido por dois principais parâmetros já citados anteriormente:

 A Pressão dinâmica do vento q relacionada diretamente ao quadrado da velocidade do vento (Equação 21).

$$q = 0.613 \times V_k^{2} (\text{N/m}^2)$$
(21)

q – Pressão dinâmica do vento;

 V_k –Velocidade característicado vento.

 Parâmetro aerodinâmico *Ce*: responsável por expressar a interação entre o vento e a forma arquitetônica (Equação 22). Este fator também é conhecido como fator de forma.

$$Ce = Cpe - Cpi \tag{22}$$

Ce – Coeficiente de pressão e de forma;

Cpe – Coeficiente de pressão e de forma externo;

Cpi – Coeficiente de pressão e de forma interno.

Assim, a força do vento pode ser calculada como a equação 23:

$$F = (Cpe - Cpi) \times q \times A \tag{23}$$

A – Área frontal ou perpendicular ao plano de atuação do vento.

Para se calcular o fator de pressão dinâmica do vento q é necessário obter o valor de velocidade de projeto, conhecida por velocidade característica V_k . Seu valor é dado a partir de uma velocidade de referência (velocidade básica do vento) corrigida por determinados fatores de topografia, dimensões da edificação, níveis de risco, e probabilidade de ocorrência daquela velocidade; a seguir, segundo ABNT:NBR6123,1988, tem-se a equação que descreve a obtenção de V_k :

$$V_k = V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_3 \tag{24}$$

 V_0 – Velocidade do vento advinda do Mapa das Isopletas (Figura 54); S_1 – Parâmetro relacionado às variações do relevo do terreno onde se localizará a estrutura; S_2 – Parâmetro relacionado ao efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação ou parte da edificação considerada (FERREIRA, 2013);

 S_3 – Parâmetro relacionado ao fator estatístico, que considera o grau de segurança exigido pelo tipo de edificação.

Por definição, V_0 é a velocidade de uma rajada de 3 segundos, excedida em média uma vez em 50 anos, acima de 10 m de altura do terreno, em campo aberto e plano. Esses valores de velocidade podem ser obtidos do Mapa de Isopletas (Figura 54).



Figura 54: Mapa de isopletas da velocidade básica do vento V₀ (m/s). Fonte: ABNT:NBR6123,1988 adaptado por Souza, 2015.

3.2.4 – Simulação de Vento por meio de Fluidodinâmica Computacional

Existem duas abordagens para se projetar e analisar sistemas que envolvam fluxo de fluido: experimentalmente ou numericamente. Na parte de experimentação, normalmente são feitos estudos em túneis de vento ou outros tipos de experimentos, enquanto na parte numérica trata-se da solução de equações diferenciais, de modo analítico ou computacional.

Com a aplicação de fluido-dinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics* - CFD) é possível encontrar soluções numéricas para equações diferenciais de Navier-Stokes. Tais equações regem os problemas referentes ao transporte de massa, momento e energia dos deslocamentos e movimentações dos fluidos em um domínio, espaço e tempo (FERREIRA, 2013).

Atualmente, na prática da engenharia as análises fluido-dinâmicas utilizam dos dois métodos: Experimental e Análise CFD, de modo que ambas se complementam. Por exemplo, pode-se obter propriedades globais como sustentação, arrasto, queda de pressão, ou aumento de pressão, por meio de métodos experimentais; enquanto detalhes do fluxo como pressões cisalhantes, velocidade, campo de pressão e linhas de corrente podem ser adotados por análises CFD (ÇENGEL e CIMBALA, 2004).

Além dessa forma de aplicação das duas metodologias, a utilização desses dois métodos gera resultados de maior confiabilidade, uma vez que os dados experimentais muitas vezes podem ser usados para validar as soluções do método CFD ao se comparar o método computacional com experimental na obtenção de propriedades globais. Muitas vezes o CFD é uma metodologia utilizada para diminuir o número de experimentos da fase de projeto, pois, aplicando-o, é possível já definir melhor a geometria a ser utilizada no *design* (ÇENGEL e CIMBALA, 2004).

Ferreira (2013), ao analisar cascas de formas livres por meio do CFD, utiliza da técnica de volumes finitos para resolver as equações diferenciais que regem o fluxo de vento sobre cascas de concreto. Para realizar essa resolução numérica CFD, Ferreira utiliza o software ANSYS em sua plataforma ANSYS CFX, realizando comparação entre experimentos em túnel de vento e as respostas do software. Os resultados obtidos dessas comparações foram convergentes (Figura 55 e Figura 56), garantindo a eficiência do método numérico na obtenção de coeficientes de forma e pressão externos da estrutura.



Figura 55: Comparação de resultados de coeficientes de pressão externa da casca hexagonal, regime laminar, 30 °ANSYS (a) x Túnel (b). Fonte: Ferreira (2013).



Figura 56: Gráfico de comparação de resultados de coeficientes de pressão externa da casca hexagonal, regime laminar, 30 °ANSYS (a) x Túnel (b). Fonte: Ferreira (2013).

Ferreira (2013) também fez testes de convergência entre respostas do ANSYS CFX e o item E.2.1 – Cúpulas Sobre Terreno da ABNT:NBR6123, 1988, obtendo desvios muito pequenos nas regiões centrais da cúpula.


Figura 57: Testes de convergência: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão externa da cúpula (f/d = 1/4), regime laminar (ANSYS x ABNT:NBR 6123,1988). Fonte: Ferreira (2013).

Tais resultados comprovam a confiabilidade na utilização do software para outras simulações semelhantes.

Assim, para se avaliar o vento como Ferreira (2013), precisa-se entender o modelo de turbulência do tipo SST (*Shear Stress Transport Model*), pois esse é o que torna possível a interação do fluído com a geometria de modo mais preciso. Isso tanto para uma situação de turbulência do escoamento quanto para o escoamento laminar.

3.2.4.1 – Modelo de Turbulência

Existem diversos modelos de turbulência, mas o utilizado nesta pesquisa foi o modelo SST (*Shear Stress Transport Model*) ou Método da Translação da Tensão de Cisalhamento. Assim, apesar deste estudo não prever uma avaliação do efeito turbulência, é necessário considerar a ação do vento conforme o modelo SST para que se possa ocorrer a transição dos efeitos do vento para as camadas limites que possuem interface com a estrutura.

A turbulência é caracterizada pelas flutuações instantâneas de velocidade, temperatura e outras grandezas escalares de um fluido em movimento; porém, devido às múltiplas variações imprevistas que o fluido pode ter durante o movimento, fica quase impossível descrever a turbulência em sua totalidade e realismo (GALTER, 2015).

De acordo com Galter *et al.*(2015):

O modelo SST possui uma excelente precisão para o fluxo da camada limite do regime laminar até a transição para o regime turbulento. Desenvolvido por Menter (1994), o modelo SST é um modelo do tipo RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations) ou Equações Médias de Reynolds que utiliza o equacionamento do modelo $kk - \varepsilon \varepsilon$ que trata a parte da produção e dissipação de energia cinética turbulenta. Este por sua vez é um modelo robusto em relação a escoamentos complexos, mas não tem um bom comportamento na camada limite da superfície. Já nas regiões próximas as paredes, onde se tem presente à camada limite, é utilizado o modelo kk - $\omega\omega$ que é mais eficaz, pois trata a frequência dos turbilhões. Porém para descrição em escoamentos livres o modelo é muito sensível a perturbações, não possibilitando a troca do modelo $kk - \varepsilon \varepsilon$ pelo $kk - \omega \omega$ para todo o domínio. Desta forma o modelo SST utiliza a interação das duas equações de transporte, através de uma função de mistura multiplicada no modelo kk - $\varepsilon\varepsilon$, adicionando ao modelo kk - $\omega\omega$ também multiplicado por uma função de mistura, cujo valor desta função seja unitário em sua região logarítmica e gradativamente torne-se nula fora da mesma (Cunha, 2011).

Como explicado por Galter (2015), o modelo SST consegue combinar os modelos de dissipação de energia para as regiões internas e externas da camada limite. Sendo seu equacionado ilustrado através da equação da energia cinética turbulenta (k) conforme a Eq. (25), e a equação da taxa de dissipação de energia cinética turbulenta (ω), segundo a Eq. (29). Já a formulação completa para o modelo SST é apresentada pelo conjunto de equações a partir da Eq. (25) até a Eq. (33) (MENTER, 2003, apud GALTER, 2015).

Equação de energia cinética turbulenta:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial v_i k}{\partial x_i} = \frac{\bar{P}_k}{\rho} - \beta^* \omega_k + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right]$$
(25)

$$\bar{P}_k = \min(P_k 10\varepsilon) \tag{26}$$

$$\varepsilon = \beta^* \omega_k \tag{27}$$

$$P_{k} = \mu_{t} \frac{\partial v_{i}}{\partial x_{j}} \left[\frac{\partial v_{i}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial v_{j}}{\partial x_{i}} \right]$$
(28)

Equação da taxa de dissipação de energia cinética turbulenta:

$$\frac{\partial\omega}{\partial t} + \frac{\partial\nu_i\omega}{\partial x_i} = \alpha S^2 - \beta^* \omega^2 + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial\omega}{\partial x_i} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega^2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial\omega}{\partial x_i}$$
(29)

Onde:

- *v_i*: Componente de velocidade;
- *ρ*: Massa específica;
- *μ*: Viscosidade molecular;
- μ_t : Viscosidade turbulenta;
- *P
 k*: Termo limitador para evitar o acumulo de turbulência em regiões de estagnação;
- β^* : É a função unitária e que se torna zero ao se afastar da parede.

Variáveis constantes que pertencem aos modelos $(k - \varepsilon) e (k - \omega)$:

• $\alpha_1 = \frac{5}{9}$; $\beta_1 = \frac{3}{40}$; $\sigma_{\omega} = 0.5$; $\sigma_{\omega^2} = 0.856$; $\beta_2 = 0.0828$; $\alpha_2 = 0.44$

A viscosidade turbulenta é calculada conforme a Equação 30:

$$\mu_t = \rho \frac{\alpha_1 k}{max \left[\alpha_1 \omega \left(S_{ij} S_{ij} \right)^{1/2} F_2 \right]}$$
(30)

Sendo:

• $(S_{ij}S_{ij})^{1/2}$: uma medida do tensor de deformação.

A função *F1* tem valor unitário em sua região logarítmica e gradativamento torna-se nula quando fora da mesma:

$$F_{1} = tanh\left[\left[min\left[max\left[\frac{\sqrt{k}}{\beta^{*}\omega y}; \frac{500v}{y^{2}\omega}; \frac{4\rho\sigma_{\omega^{2}}k}{CD_{k\omega}y^{2}}\right]\right]\right]^{4}\right]$$
(31)

$$CD_{k\omega} = max \left[2\rho\sigma_{\omega^2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-20} \right]$$
(32)

$$F_{2} = \left[tanh \left[max \left[\frac{2\sqrt{k}}{\beta^{*} \omega y}; \frac{500v}{y^{2} \omega} \right]^{2} \right] \right]$$
(33)

Onde:

- *F*₂: Combinação das funções na camada limite Equação 32;
- *y* : Distância entre a superfície e a parede.

Finalizando essa breve explicação a respeito do modelo de turbulência, fecha-se a parte de revisão bibliográfica referente à análise do efeito do vento. Na seqüência, o item 3.3 irá recapitular brevemente a parte de combinações de ações.

3.3 – Combinações de Ações

De acordo com o item 5 da ABNT:NBR 7190, 1997, as ações atuantes nas estruturas devem ser combinadas, constituindo os carregamentos. Para a estrutura de cobertura em questão, o carregamento é do tipo normal, pois inclui apenas as ações decorrentes do uso previsto para a construção.

O carregamento normal corresponde à classe de carregamento permanente, referente às ações que atuam durante toda a vida útil da estrutura (por exemplo, peso próprio da estrutura, elementos de fixação, telha e outros) e carregamentos de longa duração (ações que atuam por mais de seis meses durante a vida útil da estrutura, por exemplo, vento e sobrecarga).

Para que se verifique a estrutura é necessário analisá-la quanto aos estados limites divididos em dois:

Estados limites últimos: estados que, por sua simples ocorrência, determinam a paralisação, no todo ou em parte, do uso da construção, tais como: a ruptura ou deformação plástica excessiva dos elementos de barra e conectores metálicos, ou a transformação da estrutura em um sistema hipostático ou ainda a ocorrência de instabilidade.

Estados limites de utilização ou serviço: estados que, por sua ocorrência, repetição ou duração, causam efeitos estruturais que não respeitam as condições especificadas para o uso normal da construção, ou que são indícios de comprometimento de sua durabilidade. Na avaliação do estado limite de serviço são avaliadas as deformações verticais, também conhecidas como flechas.

Para a verificação da segurança em relação aos estados limites últimos, são consideradas as combinações últimas normais de carregamento e, para os estados limites de utilização, as combinações de longa duração (combinações quase permanentes), para fins do estudo aqui apresentado foi analisado apenas o estado limite último da estrutura.

3.3.1. - Combinações em estados limites últimos

Para a verificação da segurança em relação ao estado limite último (ELU), o item 5.2.1 da ABNT:NBR7190 (1997) determina que a ação de cargas de curta duração, em que o vento representa a ação variável principal, sofra uma redução de 25% do valor característico do vento. A norma expressa tal consideração por meio da combinação apresentada na equação 39 a seguir:

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} * F_{gi,k} + \gamma_q (0.75 * W_k + \Psi_{0k} * Q_k)$$
(34)

Em que:

F_{gi,k} - valores característicos das ações permanentes;

 W_k - valor característico da ação variável principal: vento;

 Q_k - valor característico da ação variável secundária: sobrecarga;

 $\gamma_{gi} e \gamma_q$ - coeficientes de ponderação relativos às ações permanentes e variáveis, respectivamente. Seus valores são obtidos nas Tabelas 3, 4 e 6 da referida norma;

 Ψ_{0k} - fator de combinação para sobrecarga, obtido na Tabela 2 da referida norma.

A outra combinação última é feita considerando o vento como ação variável secundária e a sobrecarga, como principal. Nesse caso não é feita a redução da ação do vento, como apresentado a seguir:

$$F_{d} = \sum_{i=1}^{m} \gamma_{gi} * F_{gi,k} + \gamma_{q}(Q_{k} + \Psi_{0k} * W_{k})$$
(35)

Em que:

 Ψ_{0k} - fator de combinação para o vento, obtido na Tabela 2 da referida norma.

4.- CARACTERÍSTICAS DO EDIFÍCIO

4.1 – Motivação para o Estudo do Edifício em Questão

Com o objetivo de se propor uma comparação entre resultados preliminares e os resultados obtidos nesse programa de mestrado, foi adotado o edifício Politeama como caso de estudo. O estudo preliminar buscou realizar uma análise de cargas aplicadas a uma possível cobertura a qual seria locada na Itália; a análise já foi descrita por Caffarello et al. (2014) com base nas normativas italianas.

Uma nova situação é a que se propõe nesta pesquisa, em que se deseja analisar uma estrutura semelhante por elementos finitos com o software ANSYS, utilizando a plataforma CFX, a qual permite uma análise dos efeitos do vento sobre a estrutura, e a plataforma de análise estrutural (*Static*).

4.2 – Características Gerais

Sassuolo é uma cidade de cerca de 40.000 habitantes, localizada na província de Modena, Itália. Conhecida como a "capital da cerâmica". Nela se encontra o edifício Politeama a partir do qual foi feito um pré-estudo da inserção de uma cobertura tipo *gridshell* com o objetivo de recuperar o edifício, transformando-o em um teatro municipal. O mesmo se situa na via Farosi, com a Via Giuseppe Mazzini, localizado não muito longe do Palácio dos Doges e do parque renascentista principal da cidade.

O Politeama é considerado o "coração da herança cultural de Sassuolo histórico". Foi um edifício utilizado como salão de dança nos anos 10/20 do século passado, depois se tornou um local de encontros familiares. Já sob o regime fascista, foi requisitado para o uso como uma "Casa del Fascio" e mais tarde se tornou um armazém para a venda de móveis até a década de 60, quando foi abandonado e passou a se deteriorar por falta de manutenção, SANDRONE (2012).



Figura 58: A esquerda se tem a vista da entrada, Teatro Politeama Sociale, Sassuolo, Modena, foto tirada em 15/01/12. E a direita vista aérea do bairro de "Politeama Sociale", Sassuolo. Fonte: Sandrone (2012).

Conforme a Figura 58, pode-se ver como é o atual teto do edifício em questão. Observa-se a presença de uma parte central mais elevada com quatro inserções tipo duas águas, cujas linhas das cumeeiras possuem altura inferior àquela principal. Isso ocasiona problemas de articulação e de infiltração d'água. Pode-se observar também que há um detalhe na fachada frontal, uma espécie de reentrância contextualizada como arquitetura adotada na época de sua construção.

4.3 – Características do Interior do Edifício

Atualmente Politeama está em estado de decomposição e perdeu, em grande parte, a sua identidade original. O edifício possui planta retangular e tem capacidade de cerca de 600 lugares, sendo que o salão principal ocupa a maior parte da superfície (SANDRONE, 2012).

Observa-se que na região do salão principal (14 m X 28 m) é onde o estudo de caso para substituição da atual cobertura por uma cobertura do tipo *gridshell* de madeira é desenvolvido.



Figura 59: Imagem do salão principal. Politeama social, Sassuolo, tirada em 15/11/11. Fonte: Sandrone (2012).

O que incentiva tal substituição é fato de não se conhecer a capacidade estrutural da alvenaria estrutural que compõe esse edifício. Assim, como as *gridshell* se tratam de estruturas consideravelmente leves, substituir o atual telhado duas águas por uma cobertura *gridshell* não implicaria em problemas técnicos para a atual estrutura.

Uma observação quanto às características construtivas deste edifício em que se pretende instalar essa cobertura *gridshell* é que sua estrutura em alvenaria estrutural possui menor capacidade de suportar as ações de empuxo provocadas pela dupla curvatura da *gridshell*. Assim, para que os apoios da cobertura suportem essa reação de empuxo lateral, pode-se adotar uma cinta perimetral de contenção alocada sobre as paredes, que gere uma "ação de anel" capaz de conter essa tentativa de abertura da *gridshell*.

5.- METODOLOGIA

A metodologia a ser utilizada nesta pesquisa baseia-se em definir a geometria de uma *gridshell* a partir do método digital clássico (citado no item 3.1.3.2), ou seja, a partir da deformação de uma membrana até que a mesma atinja seu grau de equilíbrio energético. O processo de definição da geometria será realizado de maneira semelhante àquele realizado por NAICU et al. (2014), por meio do software Rhinoceros e seus *plug-ins* Grasshopper e Kangaroo, após isso a análise estrutural é desenvolvida por meio do software ANSYS.

O carregamento a ser utilizado para se encontrar a geometria será aquele oriundo do peso próprio da membrana. Após se ter a geometria da *gridshell* definida se inicia uma avaliação dos efeitos do vento sobre essa cobertura por meio da plataforma CFX do ANSYS. Dessa simulação espera-se obter os coeficientes de pressão e de forma externos (Cpe) da *gridshell* revestida. No caso aqui estudado não se terá coeficientes de pressão e de forma internos (Cpi) derivando do formato da *gridshell*, pois ela não possuirá aberturas, adotando, assim, valores nulos afim de se gerar um estudo preliminar do efeito do vento sobre a estrutura em estudo. Em posse dos valores dos coeficientes de pressão e de forma da cobertura se tem o quadro dos principais esforços a serem aplicados sobre a *gridshell* para a realização da análise estrutural.

Assim, os passos para este estudo são os seguintes:

1 – Definir a curvatura e o formato da *gridshell* por meio do Rhinoceros;

2 – Fazer análise de interação fluido-estrutura com a plataforma CFX do
 ANSYS sobre a cobertura revestida;

3 – Fazer análise estrutural da *gridshell* com o ANSYS aplicando os valores de pressão obtidos pela análise com o CFX;

4 – Obter a análise de deslocamentos e tensões na gridshell;

5 – Avaliar os resultados obtidos na análise numérica, verificando a eficiência dessas estruturas ao efeito do vento.

Nessa etapa final de estudo se propõe identificar uma metodologia padrão para se avaliar o efeito de ventos sobre a *gridshell* por meio de análises numéricas.

5.1 – Busca da Forma

Para se encontrar a forma da *gridshell* foi utilizado o programa Grasshopper com a ajuda do *plug-in* Kangaroo para simulações a gravidade. Segundo Piker (2013), Kangaroo é um conjunto de algoritmos que permitem simular aspectos físicos, tais como o efeito da gravidade sobre uma malha. A interação deste *plug-in* ocorre diretamente com arquivos CAD do software Rhinoceros.

As simulações desses algoritmos no Kangaroo são particularmente úteis para a concepção de estruturas que envolvem grandes deslocamentos de material em relação ao estado de repouso inicial, tais como tenso-estruturas, *gridshell*s do tipo pós-formadas e estruturas infláveis. Ele permite busca de formas (*Form Finding*) do tipo digital de modo similar aos tradicionais métodos dos engenheiros / arquitetos como Frei Otto, Antoni Gaudí e Heinz Isler, em que a resposta de modelos físicos (como uma rede de correntes em suspensão ou película de sabão) é utilizada para gerar uma forma ideal para aplicação em um projeto estrutural real (PIKER, 2013).

A metodologia utilizada é mesma apresentada em Caffarello et al. (2014), baseando-se na busca de uma geometria de uma superfície de três dimensões do tipo NURBS (*Non Uniform Rational Basis-Splines*) - "splines (curva definida matematicamente por dois ou mais pontos de controle) definidas por uma base racional não uniforme". Essa superfície depois é transformada em grelha de modo que se obtém a estrutura de uma *gridshell*. Na Figura 60 é possível ver a interface do Grasshopper com o Rhinoceros que foi utilizada.

A vantagem de se utilizar o Grasshopper para o desenvolvimento das geometrias da *gridshell* é que o *design* é feito por meio de desenhos parametrizados; metodologia que tem aumentado muito o uso por parte dos arquitetos. Com tal técnica é possível automatizar desenhos arquitetônicos de modo que podem ser facilmente editados. Assim, na necessidade de se realizar futuras alterações geométricas, as mesmas podem ser realizadas sem muito esforço.



Figura 60: Imagem da criação do retículo em verde. Fonte: Caffarello et al. (2014).

Como se pode ver na Figura 60, a definição da geometria aqui estuda foi gerada por meio de uma superfície retangular a qual foi fixada em todas as suas arestas. Após ser submetida ao efeito gravitacional, a membrana atingiu um formato curvilíneo que serviu de base para o estabelecimento da grelha da *gridshell*. Cada elemento da *gridshell* possui a seção de 20 cm de altura por 5 cm de largura. Em planta a *gridshell* possui 14 m x 28 m, enquanto em altura ela possui 3,5 m.



Figura 61: Ilustração da seção padrão dos elementos estruturais lineares da *gridshell*. Fonte: Próprio autor

Uma vez estabelecida a geometria da *gridshell*, os próximos passos são: definir os efeitos do vento em conformidade com a região aonde aquela será construída, assim como também os demais carregamentos a serem aplicados sobre a cobertura.

Com esses valores de carregamentos é possível analisar a *gridshell* por meio do método dos elementos finitos (MEF). Nota-se que para se realizar a análise de tensões e se obter as pressões oriundas do vento utilizou-se do software ANSYS.

5.2 - Análise do Efeito do Vento por *Computational Fluid Dynamics* (CFD)

Como já citado na revisão bibliográfica, Ferreira (2013) demonstra, por meio de comparações de ensaios em túnel de vento e análise a elementos finitos, que a obtenção de coeficiente de pressão externos devido ao vento (regime laminar e turbulento) para cascas de forma livre através da plataforma CFX do ANSYS traz resultados convergentes com aqueles obtidos em experimento. Tais resultados comprovam que a configuração adotada por Ferreira (2013) é eficaz e segura, isto é, o software gera resultados confiáveis para simulações semelhantes. A questão apresentada nessa pesquisa de iteração entre vento (fluido) e estrutura constitui um exemplo de fluidodinâmica, descrito pelas equações de conservação de massa, lei da continuidade e lei da conservação dos momentos.

As informações empíricas dos ensaios executados por Ferreira (2013) e por Garcia (2013) serviram para validar os modelos numéricos com a realidade do túnel de vento do LaCAF (Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada da UNICAMP). Sendo assim, a simulação que se pretende ilustrar nessa pesquisa segue os parâmetros já validados por experimento laboratorial. Observa-se, que como aponta Garcia (2013), os modelos numéricos sempre apresentam dados aproximados com diferenças em relação aos resultados reais, contudo o fundamental é que os erros devem estar dentro de um limite aceitável para que o modelo possa ser utilizado em projetos.

Por fim destaca-se que com a aplicação de fluido-dinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics* - CFD) é possível encontrar soluções numéricas para equações diferenciais de Navier-Stokes, que regem os problemas referentes ao transporte de massa, momento e energia dos deslocamentos e movimentação dos fluidos em um domínio, espaço e tempo (FERREIRA, 2013).

5.2.1 – Método Numérico

A avaliação do problema consiste na resolução numérica e simultânea das equações Navier-Stokes por meio de técnicas numéricas que utilizam a análise de volumes finitos (*Fluid Volume Analysis* - FVA) para resolução das equações diferenciais parciais de transporte; nesta pesquisa as simulações foram realizadas utilizando-se o programa ANSYS CFX, baseando-se nas seguintes hipóteses a respeito do fluido (ar) e seu escoamento:

-fluido é monofásico;

-escoamento é laminar;

- fluido é incompressível.

Como descreve Garcia (2013), a metodologia utilizada para realizar as simulações em CFD compreende três etapas: pré-processamento, solução e pós-processamento. No pré-processamento definem-se características da simulação como domínio de análise, geometria, malha (tetraédrica), especificações das condições do escoamento, condições de contorno, precisão desejada e critério de convergência.

Na fase de solução analisam-se os resultados calculados com verificações de convergência pré-estabelecida. Por fim, na fase do pósprocessamento são apresentados os resultados, os quais serão interpretados e posteriormente aplicados como esforços ao modelo estrutural da *gridshell* no próprio ANSYS.

5.2.2- Procedimento no ANSYS CFX

5.2.2.1 – Validação do Procedimento Realizado no ANSYS CFX

Com o objetivo de validar o método, analisou-se uma cúpula de relação flecha pelo diâmetro de ½ e comparou-se os resultados com os valores da norma ABNT:NBR 6123, 1988; apesar de leves discrepâncias (ordem de 7,5%) entre os valores, o método numérico se demonstrou próximo com os valores normativos, demonstrando aplicação correta do método descrito por Ferreira (2013). A comparação dos resultados numéricos com a norma pode ser vista na Figura 62.



Figura 62: Comparação do método numérico de volumes finitos com os valores de norma (ABNT:NBR6123, 1988). Fonte: Próprio autor e norma de ventos ABNT:NBR 6123, 1988.

5.2.2.2 – Descrição do Procedimento no ANSYS CFX

Inicialmente o primeiro passo é importar a geometria criada no Rhinoceros assim como também a superfície na qual a estrutura foi embasada. A princípio para o estudo do efeito do vento bastaria a superfície que descreve a *gridshell* revestida, porém como mais adiante é utilizada a geometria da gridshell para a análise estrutural é necessário que já se importe as duas configurações geométricas como ilustra a Figura 63.



Figura 63: *Gridshell* e sua superfície de origem importadas para o ANSYS CFX. Fonte: Próprio autor.

Como descreve o tutorial no Apêndice A, para se analisar a geometria importada para o ANSYS quanto aos efeitos estáticos provocados pelo vento é preciso encapsular os elementos previamente definidos de forma a se obter um volume que representará a região por onde passará o escoamento de ar, i.e. o vento. Na Figura 64 se encontra como foi definido esse volume no ANSYS. Observase que para se obter também os coeficientes de pressão é necessário inserir um tubo de pitot ao modelo como descreve o Apêndice A (Tutorial para análise de vento por meio do ANSYS CFX).



Figura 64: Modelagem do volume de contorno sobre a estrutura da *gridshell* no *Geometry* do ANSYS. Fonte: Próprio autor.

A próxima etapa é definir a malha para a aplicação do método de volumes finitos. Nesse momento é importante realizar o refinamento dos elementos próximo a superfície, onde se encontrará o revestimento da *gridshell*, assim como também as dimensões da camada limite por meio da ferramenta *inflation* na etapa de *Mesh* do CFX. A camada limite possui a função de transferir as tensões geradas pelo fluído a superfície pré-definida. A Figura 65 ilustra o refinamento da malha de elementos tetraédricos, a qual contém aproximadamente 3 milhões de elementos.



Figura 65: Refinamento da malha de elementos tetraédricos no ANSYS-CFX. Fonte: Próprio autor.

No ANSYS CFX a camada limite é definida na parte de *Mesh* inserindo-se o comando *inflation*. Este comando gerará uma camada limite dividida em um número pré-estabelecido de subcamadas como se verifica na Figura 66.



Figura 66: Exemplo de conformação da camada limite no ANSYS CFX. Fonte: Próprio autor

Para se definir a camada limite no CFX é necessário fazer cálculos que definam a dimensão final da camada limite, a dimensão da primeira camada dentre as subcamadas e por fim a taxa de expansão dessas camadas (*growth rate*). Com base no trabalho de Garcia (2013), utilizou-se as equações a seguir:

$$\delta = 0.035 * Dh * Re^{-1/7} \tag{36}$$

Onde:

 δ – Tamanho da camada limite;

Dh - Raio hidráulico;

Re – Número de Reynolds;

A equação (37) permite obter o valor mínimo para o espaçamento da primeira subcamada da camada limite (Δy):

$$\Delta y = Dh * \sqrt{74} * (Re)^{-13/14}$$
(37)

Já o raio hidráulico (Dh) e o número de Reynolds (Re) são calculados com as seguintes expressões:

$$Dh = \frac{4 * A}{(2 * a) + (2 * b)}$$
(38)

$$Re = \frac{V * Dh}{v}$$
(39)

Onde:

- A Área Transversal ao escoamento de ar ("túnel de vento");
- a Dimensão Horizontal da seção transversal ao escoamento de ar;
- b Dimensão Vertical da seção transversal ao escoamento de ar;
- V Velocidade de escoamento em m/s;
- v Viscosidade cinemática do ar.

Seguindo as recomendações de Garcia (2013), foram adotadas 15 subcamadas e com base nisso a taxa de expansão das subcamadas foram definidas conforme a equação a seguir:

$$Taxa \ de \ expansão = \left(\frac{\delta}{\Delta y}\right)^{1/14} \tag{40}$$

Quanto a definição das dimensões para se realizar o refinamento dos elementos finitos próximo a casca utilizou-se o procedimento de variar o comando *sizing* e verificar a diferença nos resultados finais, sem aplicar uma expressão pré-estabelecida.

Para o modelo dessa *gridshell* avaliada se utilizou os seguintes dados para se realizar o comando *inflation*:

Vento - 0º						
a [m]	34					
b [m]	10					
A [m²]	340					
Perímetro molhado [m]	88					
Dh [m]	15,45					
V [m/s]	45					
Visc. Cinemática [m ² /s]	1,56E-05					
Re	4,46E+07					
Camada limite [m]	4,37E-02					
Primeira camada [m]	1,049E-05					
Maximum layers	15					
Growth rate	1,8136					

Tabela 1: Dados para o inflation para o vento incidindo a 0°. Fonte: Próprio autor

Vento - 90º						
a [m]	48,3					
b [m]	10					
A [m²]	483					
Perímetro molhado [m]	116,6					
Dh [m]	16,57					
V [m/s]	45					
Visc. Cinemática [m ² /s]	1,56E-05					
Re	4,78E+07					
Camada limite [m]	4,64E-02					
Primeira camada [m]	1,055E-05					
Maximum layers	15					
Growth rate	1,8207					

Tabela 2: Dados para o inflation para o vento incidindo a 90°. Fonte: Próprio autor

O modelo foi simulado considerando-se o modelo de fluxo de turbulência SST (*Shear Stress Transport Model*) aplicado a um regime isotérmico sob a temperatura de 25 °C e a pressão ambiente de 1 atm. O residual de convergência entre o máximo e o mínimo do RMS (*Root Means Square*) das equações não lineares que governam o domínio de momento e de conservação de massa, foi configurado para 10^{-4} ou a um limite de 100 iterações. A superfície da casca assim como também as contenções do fluxo foram definidas como *No Slip Wall* (sem deslizamento), enquanto a face de entrada de fluido (*inlet*) foi condicionada com a entrada de ar a 45m/s com turbulência de media intensidade (5%). Já a saída de ar (*outlet*) foi condicionada com uma pressão relativa nula. Após o processamento é possível obter as pressões devido ao vento como ilustra a Figura 67.



Figura 67: Pressões devido a um vento de 45m/s sobre o revestimento da *gridshell*. Fonte: Próprio autor.

5.3 - Propriedades da Madeira Considerada

A madeira considerada nesse projeto se trata de um Ipê (*Tabebuia serratifolia*) e suas propriedades foram adotadas em conformidade com a Tabela E.2. da ABNT:NBR 7190 (1997). Os dados estão transcritos na Tabela 3.

Tabela 3: Dados da Madeira Ipê. Fonte: ABNT:NBR 7190 (1997).								
Nome comum	Nome Científico	$\begin{array}{c}\rho_{ap(12\%)}\\kg/m^3\end{array}$	$f_{ m c,0,k}$ MPa	$f_{ m t,0,k}$ MPa	$f_{v,k}$ MPa	<i>f</i> _{t,90,k} МРа	E _{c0} MPa	
Ipê	Tabebuia serratifolia	1068	76	96,8	13,1	3,1	18011	

Onde:

- ρ_{ap} Densidade aparente;
- $f_{c,0,k}$ Resistências característica à compressão paralela as fibras;
- $f_{t,0,k}$ Resistências característica à tração paralela as fibras;
- *f*_{v,k} Resistências característica ao cisalhamento;
- E_{c0} Módulo de elasticidade à compressão paralela as fibras.

5.4 - Carregamentos

Neste estudo foram feitas dois tipos análises: Uma análise pura de tensões considerando o incremento de rigidez devido ao seu revestimento em chapa OSB (*Oriented Strand Board* – tiras orientadas de madeira) e uma análise para verificação do estado limite último (ELU) de dimensionamento segundo a norma ABNT:NBR 7190, 1997. Para a primeira análise os carregamentos foram considerados sem qualquer tipo de ponderação de combinação, enquanto para a segunda análise os carregamentos foram considerados de acordo com o tipo de combinação realizada.

Na verificação de estado limite último os carregamentos considerados na verificação global da estrutura foram devido ao peso próprio da estrutura, ao peso do revestimento, ao peso estipulado das conexões, a uma sobrecarga, e ao efeito do vento (0° e 90°). O peso estipulado das conexões e o valor de sobrecarga foram adotados conforme Ferreira (2012), sendo o primeiro igual a 3% do peso da estrutura e o segundo igual a 0,25 kN/m². Já o valor do peso do revestimento foi adotado conforme Caffarello et al. (2014), Tabela 4.

Tabela 4. As cargas permanentes produzidas pelos estratos não estruturais. Fonte: Caffarello et al. (2014).

Material	Espessura	Estratos	Densidade (kg/m ²)	Peso (N/m ²)
Folha de metal (Rheinzink)	0,8 (mm)	1,00	0,21	2,10
Fibra de madeira	20(cm)	1,00	10,00	100,00
OSB (painéis de madeira)	1(cm)	2,00	11,00	110,00
Total				212,10

Para verificar a estrutura *gridshell* de acordo com a norma ABNT:NBR 7190 (1997) foi necessário utilizar do artifício de aplicar os carregamentos na estrutura já majorados de seus coeficientes, uma vez que o ANSYS não realiza combinação de ações.

No caso da análise pura de tensões não se foi considerado qualquer tipo de ponderação dos carregamentos de modo a gerar combinações como descrito no caso anterior; assim, foi considerado apenas os carregamentos importados devido ao efeito do vento avaliados na plataforma CFX do ANSYS e os efeitos gravitacionais sobre os elementos estruturais.

No estudo realizado, aproveitou-se para se fazer uma análise da diferença das deformações na estrutura devido ao incremento de rigidez causado pelo revestimento OSB ao se variar os seus módulos de elasticidade.

5.5 - Análise de Tensões – Método dos Elementos Finitos

Para analisar as tensões discretizou-se a estrutura em aproximadamente 30 mil elementos finitos tridimensionais do tipo tetraédricos (Figura 68). Já os suportes da estrutura foram todos considerados como apoios fixos em x, y, z. A seção dos elementos estruturais é de 5 cm x 20 cm.



Figura 68. Discretização da estrutura gridshell no ANSYS-Static. Fonte: Próprio autor.

Para se fazer a interação fluido-estrutura foi utilizado o método implícito entre o CFX e o *Static*, para tanto foi necessário compartilhar a geometria entre as duas plataformas e importar as pressões do vento para o campo *Setup* do *Static*, na Figura 69 é possível visualizar o carregamento do vento aplicado sobre a estrutura.



Figura 69: Aplicação das pressões do vento 90° no ANSYS Static. Fonte: Próprio autor.

5.5.1 – Análise para Verificação ELU Segundo ABNT:NBR 7190

Nessa análise, os efeitos do vento foram considerados agindo diretamente aos elementos estruturais sem se considerar o aumento de rigidez gerado pelas placas de OSB que revestem a estrutura, para tanto foi necessário ponderar a área de influência da superfície em relação aos elementos estruturais de modo que o efeito do vento fosse transferido corretamente a estrutura.

Quanto as combinações foi necessário aplicar as ações solicitações com seus valores já majorados, enquanto o módulo de elasticidade teve de ser diminuído para o valor de módulo de elasticidade efetivo estabelecido pela norma.

Foram realizadas seis combinações de modo que a combinação 01 considera a carga de sobrecarga como principal, a combinação 02 considera o vento de sucção como principal e a combinação 03 considera o vento de pressão como principal; As combinações 04, 05, e 06 seguem respectivamente os mesmos critérios das combinações anteriores, diferenciando-se apenas pelo fato de ao invés de considerar o vento a 0° (Incidente sobre a menor dimensão – 14 metros), considera o vento a 90° (Incidente sobre a maior dimensão – 28 metros).

5.5.2 – Análise de Tensões da Gridshell

A análise de tensões pura da estrutura se trata de uma avaliação do comportamento estrutural sem que seja considerado o efeito estatístico sobre os carregamentos.

Ao se fazer essa análise de tensões foi considerado o efeito do vento agindo diretamente sobre a os elementos envolventes a estrutura (OSB), para tanto os valores de módulo de elasticidade assim como também os valores de resistência deste material foram adotados com base na Tabela 4 do trabalho de pesquisa de Souza (2012) colocada aqui como Tabela 5. Já as ligações entre as placas OSB e a *gridshell* foram adotadas como livres de deslizamento.

Tabela 5: Requisitos em termos de valores limites para as propriedades mecânicas de OSB segundo a EN300(2006). Fonte: Souza (2012).

Painel tipo OSB/4	_				Requisitos			
Propriedade	Métodos de Unida Ensino		Espessura do painel (nominal, mm)					
			6 a 10	>10 e < 18	18 a 25	>25 a 32	>32 a 40	
MOR Longitudinal	EN 310	N/mm²	22	20	18	16	14	
MOR transversa	EN 310	N/mm²	11	10	9	8	7	
MOE Longitudinal	EN 310	N/mm²	4800	4800	4800	4800	4800	
MOE Transversa	EN 310	N/mm²	1900	1900	1900	1900	1900	
Al	EN 319	N/mm²	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30	
G _t (24h)	EN 317	%	12	12	12	12	12	

Tabela 4 – Painéis para uso estrutural especiais em ambiente úmido – Requisitos para as propriedades mecânicas e de inchamento.

Fonte: EN 300, 2006

Onde:

MOE - Módulo de elasticidade na flexão estática;

MOR - Módulo de ruptura;

Al - Resistências à adesão interna às faces;

G_t - Inchamento em espessura;

Propertie	es of Outline Row 5: Madeira Iso 2		
	А	В	С
1	Property	Value	Unit
2	🔁 Density	1100	kg m^-3 🛛 💌
3	🖃 📔 Isotropic Elasticity		
4	Derive from	Young's M 💌	
5	Young's Modulus	1900	MPa 💌
6	Poisson's Ratio	0,3	
7	Bulk Modulus	1,5833E+09	Pa
8	Shear Modulus	7,3077E+08	Pa

Figura 70: Definição das propriedades do OSB utilizado no modelo do ANSYS. Fonte: Próprio autor.



Figura 71: Estabelecendo as propriedades do revestimento em OSB da *gridshell*. Fonte: Próprio autor.

Após definidos os valores de entrada e de se processar a estrutura no ANSYS Static, passa-se a uma nova etapa de análise na parte de Resultado, neste momento se avalia as tensões solicitantes e as deformações sofridas pelo material.

6. – RESULTADOS

6.1 – Efeito do Vento Sobre a Geometria Pré-Estabelecida

Para se avaliar o efeito do vento utilizou-se da plataforma CFX do ANSYS como já descrito na parte de metodologia. Na Figura 72 é possível visualizar a linhas as quais representam o fluxo de ar ao redor da cobertura nas direções principais (0° e 90°), assim como também os efeitos de sobrepressão, demarcados pela coloração avermelhada, e os efeitos de sucção, demarcados por coloração azulada.



Figura 72: Velocidade do vento a 0° em linhas de corrente (ANSYS CFX). Fonte: Próprio autor.



Figura 73: Conformação do vento próximo a cota 0 para o vento a 0°. Fonte: Próprio autor.



Figura 74: Velocidade do vento a 90° em linhas de corrente (ANSYS CFX). Fonte: Próprio autor.



Figura 75: Conformação do vento próximo a cota 0 para o vento a 90°. Fonte: Próprio autor.



Figura 76: Coeficientes de pressão externos Vento 0°. Fonte: Próprio autor.



Figura 77: Coeficientes de pressão externos Vento 90°. Fonte: Próprio autor.

Para melhor compreender a variação de coeficientes obtidos os mesmos foram apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Faixas dos coeficientes de pressão	o devido ao efeito do vento a 0° e 90° . Fonte: Próprio
	autor.

Coeficientes	Coeficientes de Pressão (CP)					
Vento 0°	Vento 90°					
0,75	0,94					
0,61	0,66					
0,47	0,38					
0,33	0,11					
0,18	-0,17					
0,04	-0,45					
-0,10	-0,73					
-0,24	-1,01					
-0,39	-1,28					
-0,53	-1,56					
-0,67	-1,70					

Ao se avaliar os resultados de coeficientes de pressão é possível verificar a coerência dos resultados com os padrões geométricos da cobertura. Na Tabela 6 observa-se que o efeito do vento é mais intenso a 90°, o que condiz com a característica geométrica da estrutura, uma vez que é a 90° que se tem maior área de arrasto em relação à situação a 0°.

Outra observação aos efeitos do vento analisados é o efeito de sobrepressão que ocorre a sotavento da geometria, pois apesar de tal efeito não ser tão intuitivo ele já era observado nos ensaios de Ferreira (2013) em que se demonstra essa mesma característica tanto nos ensaios numéricos quanto em túnel de vento.

6.2 - Verificação ELU Segundo ABNT:NBR 7190

Aplicando-se o efeito do vento na estrutura *gridshell* foi possível perceber a congruência entre os efeitos da deformação sofrida pelos elementos de madeira e a direção do vento incidente como se observa na Figura 79, em que a) representa a estrutura sob efeito do vento a 0° (menor dimensão), e b) representa a estrutura sob efeito do vento a 90° (maior dimensão). Na imagem a seguir o carregamento aplicado não sofreu nenhuma alteração devido a multiplicação de coeficientes, i. e., os valores devido ao peso próprio da estrutura, revestimento, conexões, sobrecarga e as pressões do vento foram aplicados sem alteração de valor. Os resultados obtidos nas análises da Figura 79 estão apresentados nas últimas duas linhas da Tabela 7.



Figura 78: Deslocamentos devido ao efeito do vento a 0°. Fonte: Próprio autor.



Figura 79. Deslocamentos devido ao efeito do vento a 90°. Fonte: Próprio autor.

O resumo dos resultados obtidos da análise de tensões no software ANSYS é apresentado na Tabela 7. Observa-se que os valores não vinculados a uma combinação foram obtidos sem se aplicar nenhuma ponderação ao módulo de elasticidade nem aos carregamentos aplicados, sendo aplicado apenas os valores característicos; esses resultados podem ser utilizados como uma análise de controle para as demais.

Combinação	Vento	N [MPa]	T [MPa]	C [MPa]	u[mm]
01	0°	1,68	1,36	0,14	0,99
02	0°	2,54	3,33	1,98	1,59
03	0°	2,17	2,30	0,18	1,29
04	90°	3,34	3,06	0,42	7,92
05	90°	5,73	6,67	1,07	15,77
06	90°	4,60	4,83	0,73	11,58
	0°	2,03	2,22	0,16	0,85
	90°	4,34	4,62	0,70	7,70

Tabela 7. Resumo dos pontos de máximo (tensões e deslocamentos) para cada combinação; resultados obtidos no ANSYS. Fonte: Próprio autor.

Onde:

u	Deslocamento	máximo	vertical

- N Máxima tensão de compressão;
- T Máxima tensão de tração;
- C Máxima tensão de cisalhamento.

Verifica-se com essa avaliação de tensões, que as combinações mais solicitantes são: a combinação 2 no que diz respeito ao cisalhamento e a

combinação 5 no que se refere às tensões de compressão, tração, e aos deslocamentos. Ambas as combinações são referentes à situação de vento de sucção como ação acidental principal, sendo a combinação 2 referente ao vento a 0° e a combinação 5 ao vento a 90°.

Os valores de resistência de cálculo assim como o módulo de elasticidade efetivo foram definidos com base na norma ABNT:NBR 7190 (1997) e são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8.	Valores	de cálculo	do Ipê.	Fonte:	Próprio	autor.
-----------	---------	------------	---------	--------	---------	--------

Nome comum	Nome Científico	$\begin{array}{c}\rho_{ap(12\%)}\\kg/m^3\end{array}$	$f_{c,0,d}$ MPa	$f_{ m t,0,d}$ MPa	$f_{ m v,d}$ MPa	E _{c0,ef} MPa
Ipê	Tabebuia serratifolia	1068	38	48,4	6,55	12608

Onde:

 ρ_{ap} Densidade aparente;

f_{c,0,d} Resistência de cálculo à compressão paralela as fibras;

f_{t,0,d} Resistência de cálculo à tração paralela as fibras;

f_{v,d} Resistência de cálculo ao cisalhamento;

E_{c0,ef} Módulo de elasticidade à compressão paralela as fibras efetivo.

Já os valores de flecha limite, ao se considerar o que se tem disponível nas normativas atuais, poderia ser calculado da seguinte forma para o vão de 14 m x 28 m:

$$\frac{l_{14m}}{350} = \frac{14000}{350} = 40 \ mm \tag{41}$$

$$\frac{l_{28m}}{350} = \frac{28000}{350} = 80 \ mm \tag{42}$$

Como se pode observar ao se comparar a Tabela 7 com a Tabela 8, nenhum valor de resistência foi ultrapassado, comprovando-se que para uma análise estrutural de caráter global, uma *gridshell*, cujos elementos são feitos de lpê e possuem uma seção de 5 cm x 20 cm, é capaz de suportar os carregamentos descritos nas normativas brasileira (ABNT:NBR 7190). Observando-se que para um detalhamento mais específico dessa estrutura, ainda seria necessário analisar seus conectores e realizar o seu devido dimensionamento. Outra observação é que apesar de só ter sido avaliado os deslocamentos na situação de Estado Limite Último (ELU), os mesmos se encontram ainda muito distante das flechas limites definidas pela ABNT: NBR 7190 de 1/350.

6.3 – Análise Pura de Tensões da Gridshell

Na análise pura de tensões, a estrutura *gridshell* foi analisada em relação aos esforços característicos sem que se fosse feito nenhum tipo de ponderação; tanto em relação aos esforços, assim como em relação ao módulo de elasticidade. Não se considerando também os carregamentos de sobrecarga e o peso dos revestimentos mais externos. Permanecendo como carregamento apenas o efeito do vento, o peso próprio da *gridshell* e o peso de uma camada OSB de 0,8 cm de espessura.

6.3.1 – Avaliação e Aplicação do Efeito do Vento para a Análise de Tensões da *Gridshell*

Como esperado pode verifica-se que o perfil de vento sofre aceleração devido ao confinamento gerado pelo obstáculo (*gridshell*), de modo que a velocidade do vento atingiu valores acima de 45 m/s (aproximadamente 60 m/s), intensificando o efeito de sucção como pode ser observado na Figura 72.

Ao que se refere à transferência de esforços solicitantes devido ao vento, tem-se que foram importados pela plataforma de interação fluído estrutura de tipo implícita que o ANSYS permite entre o ANSYS CFX e o ANSYS Static. Os vetores, representando as forças do vento aplicadas sobre a estrutura, são ilustrados na Figura 80 e na Figura 81.





Figura 80: Solicitações geradas pelo efeito do vento a 0° sobre a cobertura. Fonte: Próprio autor.

Figura 81: Solicitações geradas pelo efeito do vento a 90° sobre a cobertura. Fonte: Próprio autor.

6.3.2 – Tensões Resultantes para a Gridshell Revestida

Para a avaliação dos resultados, as propriedades do OSB e da estrutura foram adotadas individualmente, sendo ambos os materiais adotados como isotrópicos e com valores característicos de peso e módulo de elasticidade. Como o OSB é apresentado com dois valores de módulo de elasticidade (um para a direção a 0° e outro a 90°), foi feito duas análises diferentes em um primeiro momento considerando o módulo de elasticidade do revestimento de 1900 MPa e em um segundo momento de 4800 MPa.

1	operties of Outline Row 4: Madeira Iso					2 operties of Outline Row 5: Madeira Iso 2				
		А	В	с			A	В	с	
	1	Property	Value	Unit		1	Property	Value	Unit	
	2	🔁 Density	1068	kg m^-3	•	2	🔁 Density	1100	kg m^-3	•
	3	Isotropic Elasticity				3	🖃 🔀 Isotropic Elasticity			
	4	Derive from	Young's M 💌			4	Derive from	Young's M 💌		
	5	Young's Modulus	18011	MPa	•	5	Young's Modulus	1900	MPa	-
	6	Poisson's Ratio	0,3			6	Poisson's Ratio	0,3		
	7	Bulk Modulus	1,5009E+10	Pa		7	Bulk Modulus	1,5833E+09	Pa	
	8	Shear Modulus	6,9273E+09	Pa		8	Shear Modulus	7,3077E+08	Pa	

Figura 82: Algumas das propriedades características adotadas para os materiais de tipo estrutural (imagem 1) e de revestimento (imagem 2). Fonte: Próprio autor

Como resultado da análise de tensões foi possível avaliar as tensões normais, cisalhantes e os deslocamentos para o modelo, apresentando as conformações ilustradas na Figura 83, 84, 85 e 86. Os resultados foram diferenciados também quanto ao módulo de elasticidade do painel OSB envolvente.


Figura 83: Deslocamentos gerados pelo efeito do vento a 0°, vista externa (ANSYS CFX). Fonte: Próprio autor.



Figura 84: Deslocamentos gerados pelo efeito do vento a 0°, vista inferior (ANSYS CFX). Fonte: Próprio autor.



Figura 85: Deslocamentos gerados pelo efeito do vento a 90°, vista externa (ANSYS CFX). Fonte: Próprio autor.



Figura 86: Deslocamentos gerados pelo efeito do vento a 90°, vista inferior (ANSYS CFX). Fonte: Próprio autor.

Por meio da Tabela 9 e da Tabela 10 é possível comparar as deformações e tensões para diferentes valores de módulo de elasticidade do OSB. Diante desses resultados é possível observar que o revestimento pode representar um importante elemento de reforço em uma estrutura como as *gridshell*s.

OSB	Vento	N [MPa]	T [MPa]	C [MPa]	u[mm]	V [MPa]
4800	0°	1,33	2,74	0,27	0,65	2,3
1900	0°	1,63	3,31	0,28	0,89	2,6
Melhoria OSB		19%	17%	6%	27%	11%

Tabela 9: Tensões solicitantes de maior intensidade encontrados nos modelos com vento a 0°. Fonte: Próprio autor.

Tabela 10: Tensões solicitantes de maior intensidade encontrados nos modelos com vento a 90°. Fonte: Próprio autor.

OSB	Vento	N [MPa]	T [MPa]	C [MPa]	u[mm]	V [MPa]
4800	90°	5,61	7,21	1,05	8,54	11,2
1900	90°	6,40	8,33	1,22	10,93	13,0
Melho	ria OSB	12%	13%	14%	22%	14%

Onde:

- u Deslocamento máximo vertical
- N Máxima tensão solicitante de compressão
- T Máxima tensão solicitante de tração
- C Máxima tensão solicitante de cisalhamento
- V Máxima tensão solicitante e calculada segundo critério de von Mises

Diante desses resultados se verifica, em primeiro lugar, a coerência dos resultados apresentados com as direções do vento. Verifica-se também, com os resultados numéricos, que há uma relação direta do efeito do vento a 90° com esforços solicitantes mais intensos. Isso pode ser explicado pelo fato de que a seção a 90° da cobertura possui uma área projeta maior em relação à seção a 0°. Essas observações são relativamente triviais, porém atingir resultados esperados pela teoria com o modelo numérico representa que o modelo possui consistência física.

Em segundo lugar, verifica-se que a diferença dos resultados devido à mudança do módulo de elasticidade de um revestimento cuja espessura seja relativamente pequena diante da proporção da estrutura é representativa, pois em uma variação 2900 MPa no módulo elasticidade obteve-se uma diminuição dos deslocamentos da ordem de 22% a 27%. Pode-se notar também que os esforços solicitantes se encontram distantes dos valores de resistência característicos da madeira, sendo isso um indicativo de uma estrutura eficiente mecanicamente.

No que se refere à flecha, apesar dos resultados aqui apresentados não representarem um dimensionamento como no item anterior, os deslocamentos sofridos pela estrutura foram pequenos diante das dimensões de 14 m x 28 m do vão a ser vencido. Assim, para efeitos comparativos, ao se adotar o que se tem disponível nas normativas atuais para cálculo de valores de flecha limite (1/350) se teria aproximadamente 40 mm de limite a ser adotado, desse modo os valores calculados conforme a ABNT:NBR 7190 são superiores àqueles obtidos da análise de tensões por um fator 3,7 vezes relativo ao pior caso. Essa comparação demonstra, de certo modo, o potencial da aplicação de estruturas *gridshell*s em grandes vãos.

Por fim, comparando a tensão equivalente de von Mises com a resistência característica a compressão paralela as fibras do Ipê (76 MPa segundo a ABNT:NBR 7190), tem-se que a estrutura *gridshell* se encontra dentro da segurança. Isso porque, ao se multiplicar 76 por 0,70 e dividir por 1,4 (de acordo com o anexo F da ABNT:NBR 7190 item F.8), o valor de segurança para comparação com as tensões solicitantes fica de 38 MPa, o que equivalente a aproximadamente 3 vezes o valor solicitante mais intenso encontrado na análise numérica.

Observa-se que o critério de segurança de von Mises para a madeira pode ser comparado com os valores de compressão devido ao fato que a ruptura por compressão na madeira é do tipo dúctil, ou seja, condizente com as hipóteses deste critério de resistência. Assim, conforme o critério de von Mises, a estrutura em *gridshell* analisada demonstra-se segura para as solicitações de vento e peso próprio avaliadas.

7. - CONCLUSÕES

Diante desse estudo foi possível ilustrar e descrever uma metodologia para análise de *gridshell*s sob efeito de vento através de simulação numérica. As *gridshell*s podem possuir formas muito orgânicas e diante desse fato uma proposta para se entender o efeito do vento sobre essas geometrias pode auxiliar novos estudos sobre estas estruturas. Assim nesta dissertação foi demonstrada uma metodologia que envolve:

- Encontrar a forma de uma estrutura gridshell por software de desenho digital, aplicando-se conceitos de grandes deslocamentos em uma membrana;
- Obter as solicitações do vento por interação fluído-estrutura por meio de simulação com volumes finitos no software ANSYS;
- Realizar análise de tensões pura da estrutura por meio do método de elementos finitos. Ou ainda realizar uma verificação de dimensionamento com base nas normativas nacionais.

Observa-se que no caso do terceiro passo, há a possibilidade de ao invés de se utilizar o software ANSYS para uma análise de tensões ou para a verificação, pode se utilizar softwares de dimensionamento de modo a aplicar combinações de ações em conformidade com as normas vigentes; lembrando que ao se fazer isso seria necessário ficar atento a transferência das ações solicitantes do vento oriundas do ANSYS CFX.

Além da metodologia de análise apresentada, foi possível evidenciar as *gridshell*s, e em particular as de madeira, como estruturas seguras e econômicas, uma vez que em uma análise global da estrutura exemplo, a qual cobre um vão de 14 m x 28 m, foi demonstrado que a leve estrutura é rígida, e de acordo com os critérios normativos para os estados limites últimos avaliados. Tais análises evidenciaram as vantagens oferecidas pelo sistema de alto desempenho mecânico dessas estruturas.

Foi demonstrado também que painéis OSB utilizados como revestimento da estrutura podem representar um ganho expressivo de resistência em estruturas leves como as *gridshell*s.

Pode-se concluir ainda que com o auxílio de software de desenho paramétrico, o desenvolvimento do *design* das *gridshell*s pode ser estendido em

função da criatividade do projetista. Observando-se que o poder gráfico dos atuais software de desenho faz compreender qual seria a configuração desejada para as estruturas em uma primeira etapa de projeto vinculada a arquitetura.

Por fim, salienta-se que as estruturas *gridshell*s são relativamente complexas, dado que sua estrutura envolve muitos campos da engenharia e da arquitetura concomitantemente.

8. – RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Diante do estudo aqui desenvolvido foi possível verificar que o tema associado às estruturas em *gridshell* possui muitas frentes possíveis de estudos científicos. Neste capitulo, busca-se apresentar possíveis temas de pesquisas aos entusiastas do assunto, a seguir os principais pontos observados ao longo desta pesquisa, que podem ser levados em consideração para estudos futuros:

- 1. Estudar e comparar *gridshell*s que possuam múltiplos estratos, os quais aumentam a inércia da estrutura com economia de material;
- Estudar a alteração das propriedades resistentes da madeira protendida no caso de gridshells "pós-formadas";
- Entender as possibilidades de conexões para esse tipo de estrutura, assim como propriedades resistivas necessárias;
- Desenvolver conexões que utilizem de fabricação digital para o mecanismo construtivo das *gridshell*s;
- 5. Estudar o efeito do Snap Through e estabilidade em gridshells;
- 6. Construir protótipos e entender a fundo questões construtivas;
- Estudar a aplicação de madeiras de reflorestamento e o bambu nacional, na construção de gridshells;
- Desenvolver um estudo interdisciplinar envolvendo segmentos de arquitetura, programação e análise estrutural;
- 9. Realizar ensaios de resistência em protótipos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGHAJARI, N.; SCHÄFER, M. Efficient shape optimization for fluid–structure interaction problems. **Journal Of Fluids And Structures**, v. 57, p. 298–313, 2015.

AISH, F. et al. The use of a particle method for the modelling of isotropic membrane stress for the form finding of shell structures. **Computer-Aided** *Design*, v. 61, p. 24–31, 2015.

AREA LEGNO. **Soluzioni edili in legno**. Disponível em: http://www.arealegno.it/. Acesso em: 10 ago. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, NBR 8681. Ações e segurança nas estruturas, Rio de Janeiro, 2003, 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, NBR 6120. Cargas para cálculo de estruturas de edificações, Rio de Janeiro, 1982, 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, NBR 6123. Forças devidas ao vento em edificações, Rio de Janeiro, 1988, 66 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, NBR 7190. **Projeto** de estruturas de madeira, Rio de Janeiro, 1997, 107 p.

ANSYS – versão 15.0 – Documentation. ANSYS, Inc.

BAHE J., Kogod courtyard national portrait gallery. p. 1–7, 2008.

BALDASSINI, N.; RAYNAUD, J. **Free-form, form finding and anisotropic grid shell**. International Association for Shell and Spatial Structures, n. October, p. 966–976, 2009.

BECKH, Matthias; BARTHEL, Rainer. The First Doubly Curved *Gridshell* Structure: Shukhovs Building for the Plate Rolling Workshop in Vyksa. In: THIRD INTERNATIONAL CONGRESS ON CONSTRUCTION HISTORY, 3., 2009, Cottbus. **Third international congress on construction history.** Berlin: Neunplus1, 2009. v. 3. Disponível em: <http://www.bma.arch.unige.it/pdf/construction_history_2009/vol1/beckhmatthias layouted.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2015.

BELOSTOSKY, A. M. et al. About Finite Element Analysis of Fluid – Structure Interaction Problems. **Procedia engineering**, v. 91, p. 37–42, 2014.

BERBERICH, H. **Multihalle10**. Multi hall, Herzogenried Park, Mannheim, Alemanha, eastern entrance 2012. Disponível em: <commons.wikimedia.org/wiki/File:Multihalle10.jpg>. Acessado em: mar 2015.

BOUHAYA, L.; BAVEREL, O.; CARON, J.-F. Optimization of *gridshell* bar orientation using a simplified genetic approach. **Structural and multidisciplinary optimization**, v. 50, n. 5, p. 839–848, 2014.

BUILDING FOR A FUTURE. **The savill gardens** *gridshell*. 2006. Glen Howells Architects. Disponível em: http://www.fourthdoor.org/annular/?page_id=453. Acesso em: 10 dez. 2014.

CABRINHARCH. Parametric Wood. *Gridshell* research focus. 2011. Disponível em: https://parametricwood2011.wordpress.com/2011/01/08/gridshell-research-focus/. Acesso em: 30 jun. 2013.

CAFFARELLO, F. M.; MASCIA, N. T.; OSTORERO, C. Projeto estrutural em grid shells de madeira. In: **XIV EBRAMEM - Encontro Brasileiro Em Madeiras E Em Estruturas De Madeira**, 14., 2014, Natal. **Anais...** Natal: UFRN, 2014. p. 1 - 15. Disponível em: https://www.academia.edu/10682874/EBRA14-EST-059_-PROJETO_ESTRUTURAL_EM_GRID_SHELLS_DE_MADEIRA_STRUCTURAL_DE *SIGN_*IN_WOOD_*GRIDSHELL>*. Acesso em: 20 fev. 2015.

CAFFARELLO F. M. **Projeto estrutural de cobertura em grid shell de madeira**. Trabalho final de curso – Departamento de estruturas (DES), Faculdade de Engenharia Civil Arquitetura e Urbanismos (FEC), Campinas, Brasil, 2014.

CAFFARELLO F. M. Soluzioni progettuali evoluti per il disegno strutturale delle **coperture:** il caso del teatro politeama in sassuolo. Dissertação de mestrado – Dipartimento di Ingegneria Civile, Politecnico di Torino, Turim, Itália, 2013.

CALIL JUNIOR, C. ; MOLINA, Julio Cesar . **Coberturas em estruturas de madeira**: exemplos de cálculo. 2. ed. São Paulo: Editora Pini LTDA, 2010. v. 1. 207 p.

CALIL JUNIOR, C.; LAHR, F. A. R. ; DIAS, A. A. . **Dimensionamento de Elementos Estruturais de Madeira**. 1. ed. Barueri - SP: Editora Manole Itda, 2002. v. 1. 152p.

ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M.. **Fluid Mechanics**: Fundamentals and Applications. New York: Mcgraw-hill, 2004. 968 p.

ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M.. **Fluid Mechanics**: Fundamentals and Applications. New York: Mcgraw-hill, 2013. 1005 p.

CIARLET P., **The finite element method for elliptic problems**, Amsterdam, North-Holland, 1978.

CUNHA, A. C., Pinheiro, L. A. Simulação da Hidrodinâmica e Dispersão de Poluentes com Monitoramento Virtual no Rio Matapi-AP. REA Revista de Estudos Ambientais, Vol.13, n. 2, pp. 18-32, 2011.

D'AMICO, B. et al. Optimization of cross-section of actively bent grid shells with strength and geometric compatibility constraints. **Computers & Structures**, v. 154, p. 163–176, 2015.

D'AMICO, B.; KERMANI, A.; ZHANG, H. Form finding and structural analysis of actively bent timber grid shells. **Engineering Structures**, v. 81, p. 195–207, 2014.

*DESIGN*TOPRODUCTION. **Centre Pompidou Metz**. 2008. Disponível em: http://www.designtoproduction.ch/content/view/75/54/. Acessoem: 15 jan. 2015.

DIMCIC, M.; KNIPPERS, J. Integration of FEM, NURBS and Genetic Algorithms in Free-Form Grid Shell *Design*. **Computational** *Design* **Modelling**, 2011.

DOUTHE, C.; CARON, J. F.; BAVEREL, O. *Gridshell* structures in glass fibre reinforced polymers. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 9, p. 1580–1589, 2010.

FASP+EPP. **Fast + Epp to Retrofit the World's Largest Self-supporting Timber Grid Shell**. Disponível em: http://www.fastepp.com/index.php/en/news/news/302fast-epp-offices-now-ogm-certified-14. Acesso em: 18 de fev. 2015.

FERREIRA, A. M. Análise numérica e experimental da ação do vento em estruturas em cascas de formas livres. 2013. 197 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotecnia, Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, Campinas, 2013.

FERREIRA, N.S.S. Sistemas estruturais em formato de abóbada reticulada. 2012. 101 f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

FORTI, Fabio Siqueira D'alessandri. **Apostila do curso de modelagem &rendering com rhino**. Disponível em: http://pt.scribd.com/doc/36814409/Apostila-Rhino#scribd. Acesso em: 02 mar. 2015.

FOX, R. MCDONALD, A. PRITCHARD, P. Introdução a mecânica dos fluidos. LTC, 6ª Ed, 2006.

GARCIA, M. S. C. Análise de modelo reduzido de estrutura em casca de forma livre de planta hexagonal apoiada nos vértices sob ação do vento. 2013. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotecnia, Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, Campinas, 2013.

GALTER, M. D. Ação do vento em casca de forma livre de planta pentagonal apoiada nos vértices. 2015. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotecnia, Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, Campinas, 2015.

GALTER, M. D. et al. Ação do vento em modelo reduzido de casca de forma livre de planta pentagonal apoiada nos vértices. **Proceedings of the XXXVI Iberian Latinamerican Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE 2015)**, Rio de Janeiro. Nov. 2015.

Gridshell.it. Weald & downland open air museum by burohappold and edward cullinan architects, 2002. Disponível em: http://www.gridshell.it/gridshell_postformata_in_legno/52170-1250442338-0-l/.Acesso em: 18 defev. 2015.

*Gridshell*it. *Gridshell_*woodome: gazebo nella corte della masseria ospitale lecce – 2009. 2012. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=RZ2WSGEIP-w. Acesso em: 19 de fev. 2015.

GUIRARDI, D. M. O método da relaxação dinâmica aplicado à análise de estruturas de cabos e membranas. 2011. 146 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotecnia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

HERNÁNDEZ, E.; GENGNAGEL, C. On the Materiality and Structural Behaviour of Highly-Elastic*Gridshell* Structures. **Computational** *Design* ..., n. 1975, p. 1–14, 2012.

HIRDARIS, S. E. et al. Loads for use in the *design* of ships and offshore structures. **Ocean Engineering**, v. 78, p. 131–174, 2014.

HOEFAKKER, J.H., BLAAUWENDRAAD, J., **Theory of shells**, Lecture notes CT5143, Delft University of Technology, Delft, 2005.

ITA CONSTRUTORA. **Soluções construtivas em madeira laminada colada**. Disponível em: < http://www.itaconstrutora.com.br/>. Acesso em: 10 ago. 2015.

JANBURG, N., **Rotunda of the panrussian exposition**. International Database and Gallery of Structures. 2007.

JORDAN, A. et al. Material driven *design* for a chocolate pavilion. **Computer-Aided** *Design*, v. 61, p. 2–12, 2015.

KNIPPERS, J.; HELBIG, T. The frankfurt zeil grid shell. n. October, p. 1367–1378, 2009.

KUIJVENHOVEN M. A design method for timber grid shells, Delft, 2009

KUIKEN, J.; MENTEGAZZI, E. **Behind** *gridshells*: morphogenetic and parametric *design* strategies. Amsterdam: Bna Research Fund., 2014. 112 p.

LÖHNER, R. et al. Recent advances in computational wind engineering and fluid– structure interaction. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 144, p. 14–23, 2015.

LOUKAIDES, E. G.; SEFFEN, K. A. Multistable grid and honeycomb shells. International Journal of Solids and Structures, v. 59, p. 46–57, 2015.

MALEK, S.; WIERZBICKI, T.; OCHSENDORF, J. Buckling of spherical cap *gridshells*: A numerical and analytical study revisiting the concept of the equivalent continuum. **Engineering Structures**, v. 75, p. 288–298, 2014.

MENTER, F. R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. AIAA Journal, vol. 30, pp. 1657-1659, 1994.

MENTER, F. R., KUNTZ, M., & LANGTRY, R. **Ten Years of Industrial Experience** with the SST Turbulence Model. Software Development Department, Ansys – CFX, 83714 Otterfing, Germany. Turbulence, Heat and Mass Transfer, 2003.

MESNIL, R. et al. **Isogonal moulding surfaces: A family of shapes for high node congruence in free-form structures**. Automation in Construction, v. 59, p. 38–47, 2015.

MESNIL, R. **Stability of elastic grid shells**. **international journal of space structures**, Cambridge, 2013. Dissertação de mestrado - Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology - MIT, Cambridge, Estados Unidos da América, 2013. p. 1–114, 2013.

MICHALSKI, A. et al. Computational wind engineering of large umbrella structures. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 144, p. 96–107, 2015.

MICHALSKI, A. et al. Validation of the computational fluid-structure interaction simulation at real-scale tests of a flexible 29m umbrella in natural wind flow. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 99, n. 4, p. 400–413, 2011.

MIHALIK J.;TAN M.; ZENGEZA S. Mannheim Multihalle **Evolution Of German Shells Efficiency In Form** (Estados Unidos). Department Of Civil And Environmental Engineering - Princeton University. 2013. Disponível em: <http://shells.princeton.edu/Mann1.html>. Acesso em: 19 fev. 2015.

MUNSON, B. R., YOUNG, D. F., OKIISHI, T. H. – Fundamentos da mecânica dos fluidos. Blücher, 4ª Ed, 2004.

NAICU, D.; HARRIS, R.; WILLIAMS, C. **Timber** *gridshells: design* methods and their application to a temporary pavilion. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 17., 2014, Quebec. Artigo de Congresso. Quebec: Wcte2014, 2014. p. 1 - 9. Disponível em: . Acesso em: 05 fev. 2015.

NICOLAS, E. A. **Estudo de critérios de resistência de materiais anisotrópicos aplicados à madeira**. 2006. 257 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotecnia, Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, Campinas, 2006.

SOUZA, A. M. L.; **NBR-6123: Proposta para a nova norma de vento**. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural - ABECE, 2015. P&B. Vídeo visível para associados da ABECE. Disponível em: <http://site.abece.com.br/>. Acesso em: 30 jan. 2015.

OTTO, F. IL10 Grid Shells, Stuttgart, 1974

PAOLI C. Past and future of grid shell structures, Massachusetts, 2007

PELOUX, L. DU et al. The Ephemeral Cathedral of Créteil : a 350 m² lightweight *gridshell* structure made of 2 kilometers of GFRP tubes. **Cigos 2015: Innovation in Construction**. Cachan, France. 2015.

PIKER D. Kangaroo: form finding with computational physics. Archit Des 2013; 83(2):136–7.

PIKER, Daniel. **Kangaroo - Funicular Structure.** 2010. Disponível em: http://vimeo.com/8842130>. Acesso em: 20 maio 2013.

PLIENINGER, S. et al. The grid-shell of Jinji Lake Mall. **Steel Construction**, v. 7, n. 4, p. 258–261, 2014.

PONE, S. *Gridshell*. I gusci a graticcio in legno tra innovazione e sperimentazione. Itália: Alinea, 2012. 176 p.

PONE, S. et al. Construction and form-finding of a post-formed timber grid-shell. In: **Structures And Architecture: Concepts, Applications And Challenges**, 2., 2013, Guimarães. Anal. Londres: Taylor & Francis Group, 2013. p. 245 - 253. Disponível em: ">http://www.researchgate.net/publication/235921308_Construction_and_form-finding_of_a_post-formed_timber_grid-shell>">http://www.researchgate.net/publication/235921308_Construction_and_form-finding_of_a_post-formed_timber_grid-shell>">http://www.researchgate.net/publication/235921308_Construction_and_form-finding_of_a_post-formed_timber_grid-shell>">http://www.researchgate.net/publication/235921308_Construction_and_form-finding_of_a_post-formed_timber_grid-shell>">http://www.researchgate.net/publication/235921308_Construction_and_form-finding_of_a_post-formed_timber_grid-shell>">http://www.researchgate.net/publication/235921308_Construction_and_form-finding_of_a_post-formed_timber_grid-shell>">http://www.researchgate.net/publication/235921308_Construction_and_form-finding_of_a_post-formed_timber_grid-shell>">http://www.researchgate.net/publication/235921308_Construction_and_form-finding_of_a_post-formed_timber_grid-shell>">http://www.researchgate.net/publication/235921308_Construction_and_form-finding_of_a_post-formed_timber_grid-shell>">http://www.researchgate.net/publication/235921308_Construction_and_form-finding_of_a_post-formed_timber_grid-shell>">http://www.researchgate.net/publication/235921308_Construction_and_form-finding_of_a_post-formed_timber_grid-shell>">http://www.researchgate.net/publication/235921308_Construction_grid-shell>">http://www.researchgate.net/publication/235921308_Construction_grid-shell>">http://www.researchgate.net/publication/235921308_Construction_grid-shell>">http://www.researchgate.net/publication/235921308_Construction_grid-shell>">http://www.researchgate.net/publication/235921308_Construction_grid-shell>">ht

POPOV, E. P. Introdução à mecânica dos sólidos. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1978.535p.

POTTMANN, H. et al. Architectural *geometry*. **Computers & Graphics**, v. 47, p. 145–164, 2014.

PUPPO, E.; CIGNONI, P. Voronoi Grid-Shell Structures. p. 1–10, 201

REQUENA, João Alberto Venegas. **Software AutoVentos II (Arco e Shed)-UNICAMP.** Disponível em: http://www.fec.unicamp.br/~requena/. Acesso em: 10 abr. 2014.

RHINOCEROS, Inc. RHINOCEROS©, / Design Software, version 5/, 2013.

SANDRONE M. **Soluzioni progettuali per il teatro politeama sociale di sassuolo**: aspetti di certificazione antincendio e ideazione di copertura con struttura innovativa tipo "grid–shell". Dissertação de mestrado – Dipartimento di Ingegneria Edile, Politecnico di Torino, Turim, Itália, 2012.

SENATORE, G.; PIKER, D. Interactive real-time physics. **Computer-Aided** *Design*, v. 61, p. 32–41, 2015.

SHIGERUBANARCHITECTS. **Haesley Nine Bridges Golf Club House** - Korea, 2010. Disponível em: http://www.shigerubanarchitects.com/works/2010_haesley-nine-bridges/index.html > Acessoem: 20 abr. 2013.

SMD Arquitectes. **Case Study: Mannheim Multihalle**. Some More *Design*. Disponível em: http://www.smdarq.net>. Acesso em: 05 mai. 2013.

SOUZA, A M. Produção e avaliação do desempenho de painéis de partículas orientadas (OSB) de pinus sp com inclusão de telas metálicas. 2012. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

STEVE DARDEN (Nova Zelândia). Adagio Journal. **Gaudi: La Sagrada Familia museum.** 2011. Disponível em: <https://adagiojournal.wordpress.com/2011/11/15/gaudis-hanging-chain-models/>. Acessoem: 03 fev. 2015.

TAYEB, F. et al. Stability and robustness of a 300 m² composite *gridshell* structure. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 926–938, 2013.

TOUSSAINT, M. H. **A** *design* tool for timber *gridshells* - The Development of a Grid Generation Tool. 2007. 223 p. Tese (Mestrado) – Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft, Holanda, 2007.

APÊNDICE A – Tutorial: Análise de Vento por meio do ANSYS CFX

O software ANSYS possui muitas plataformas de resolução numérica para problemas físicos. Para a avaliação do efeito do vento sobre uma superfície (geometria) foi utilizado o ANSYS CFX. A seguir, apresenta-se o procedimento passo a passo para se encontrar os coeficientes de pressão de uma Cúpula cuja razão de altura pelo seu diâmetro seja de ½:

1. Ao se abrir o ANSYS há na aba a esquerda (*Toolbox*) uma serie de plataformas de resolução numéricas passíveis de uso. A opção descrita nesse tutorial é para se utilizar o ANSYS CFX na análise dos efeitos do fluido ar sobre uma cúpula. Para tanto seleciona-se o CFX a esquerda e se arrasta para direita. Ao fazer isso, será possível visualizar que as diferentes interfaces do CFX que são apresentadas em forma de lista com as seguintes divisões: *geometry*, *mesh*, *setup*, *solution*, *results*. Ao clicar em cada uma dessas opções abrir-se-á uma nova janela de modo que seja possível editar cada uma dessas características. Aqui se adotará a ordem de parametrização que siga de maneira linear essas etapas.



Figura 87: Abrindo o CFX

2. Entra-se na opção de *geometry* onde será estabelecido o invólucro em relação à cúpula, o volume ao redor da cúpula representará um volume de controle por onde passará o fluxo de ar durante o processamento. Assim, ao se abrir o *geometry* a primeira coisa a ser feita será uma esfera, seguindo os seguintes passos: Aba *Create*, Primitives, Sphere (Figura 88). Após fazer isso aparecerá dentre as opções do *Details View* os comandos para a construção da esfera, sendo

possível definir sua origem e seu raio por coordenadas. Aqui o raio da esfera foi definido como 15 metros e sua origem ficou no ponto (0,0,0) (Figura 89). Após definir os dados é importante sempre pressionar o comando de *generate* para que as opções pré-definidas sejam geradas. Observa-se que a geometria não precisa ser definida no ANSYS, sendo possível importar a mesma de um software CAD, entretanto tudo que envolva importar e editar uma geometria pode ser feito no *geometry*.



Figura 88: Selecionando a opção de construção de uma esfera



Figura 89: Parâmetros da esfera

O próximo passo envolve criar os elementos que servirão de auxílio para se criar o invólucro da cúpula. Para tanto, cria-se elementos lineares como retângulos, os quais serão "extrudados" – nesse processo se criará um paralelepípedo que envolverá a esfera de forma a se obter uma cúpula com as dimensões desejadas (flecha de ½). Assim, é necessário criar um polígono fechado que envolva meia esfera. Para facilitar esse processo, clica-se em um dos planos dentre os elementos listados a esquerda da tela com o botão direito do mouse e se escolhe a opção look at.

Para se fazer o retângulo inicial, o qual gerará o invólucro, utiliza-se a ferramenta *Sketch* que pode ser selecionada diretamente no menu de ferramentas. Observa-se que ao selecionar a ferramenta *Sketch* será realizado no plano pré-selecionado, no caso o plano XY. Para se realizar o desenho basta utilizar uma das opções dentro da aba *sketching*, que aparece ao selecionar a nova linha que apareceu na listagem localizada a esquerda da tela, no *Tree Outline*. Para melhor estabelecer as dimensões desse polígono é necessário utilizar das opções contidas na aba de *dimensions*, ao utilizar desses itens é possível estabelecer de forma precisa as dimensões desse retângulo. Para facilitar o processo de desenho pode-se utilizar de opções como o *gridline* e o *snap*. As dimensões utilizadas no exemplo foi de 80 m de altura por 90 m de largura, de modo que a parte inferior do retângulo estivesse cortando a esfera ao meio.

Essas dimensões, as quais no modelo numérico representam um túnel de vento, buscam respeitar as mesmas premissas de uma análise experimental no que se refere às distâncias das paredes dos túneis utilizados em ensaios de vento, dado que o confinamento do fluxo de ar poderia afetar os resultados finais. Dessa forma, busca-se sempre manter a relação de área transversal do modelo para a seção do túnel de vento inferior a 8%, sendo o caso estudado nesta pesquisa de aproximadamente 5%. Outra métrica foi definir uma distância mínima das paredes para a cúpula de um diâmetro da mesma, ou seja, 30 m.

	JOTACAR A CAR A B A B A B A B A B A B A B A B A B A	
XiPlane - 🖈 Sketch1 - 🏂 🗳 Generate 👹 Share Topology 🖾 Paramet	ers 🛛 📴 Extrude 🚓 Revolve 🐁 Skiv/Loft	
BThin/Surface Selend - Schamfer Sice Point Conversion		
BladeEditor: Mimport BGD @Load BGD = RowPath / Blade / Splitter VistaTFExp	ort 🛰 ExportPoints 🚥StageFluidZone 📕 SectorCut 媛 ThroatArea 🔗 Preferences	
原本SE(白藤 ・ ・ ● ●		
Sketching Toolboxes	Graphics	
Draw		ANCYC
Modify		ANSIS
Dimensions		R15.0
Constraints		
Settings		
Grid Show In 2D: 🔽 Snap	7	
Minor-Steps per Major		
Snaps per Minor		
Sketching Modeling		
Details View		
Details of Sketch1		
Sketch Sketch1		
Sketch visibility Show Sketch Show Constraints? No		
		······································
Section Planes 4	×	
) 🏥 lii 🗙		19-11-19-19-19-19-19-19-19-19-19-19-19-1
		•
		×
	U,AAU 15,000 (m)	
	7,500 22,500	
	Model View Print Presiew	

Figura 90: Fazendo o Sketch



Figura 91: Determinando as dimensões do retângulo.

3. Fazendo o *Extrude*: para se fazer o *Extrude* do retângulo apenas criado, seleciona-se a ferramenta dentre os comandos na parte superior da tela e se estabelece os comandos de profundidade e espessura sobre o polígono pré-selecionado.

No caso aqui avaliado, pelo simples motivo de facilitar a visualização do volume que será criado, a espessura adotada foi de 1 metro no sentido externo ao polígono; dado que esse fator não afeta o resultado final almejado nessa etapa de definição da geometria.

Quanto à definição da espessura interna, normalmente se adota valores pequenos, os quais não afetarão o resultado final, e.g. 0,01 m. Assim evita-se que haja um vão, ínfimo que seja, entre a geometria a ser avaliada e a referência do apoio da mesma, pois caso isso ocorra, podem aparecer problemas no processamento numérico.

Já a profundidade do que irá representar o túnel de vento foi adotada como 100 m, a maneira que a cúpula ficasse localizada em seu centro. Observa-se que essa última dimensão pouca afeta os resultados, uma vez que o vento incidente sobre a cúpula já possui homogeneidade pré-definida nas etapas seguintes.

Por fim, deve-se selecionar o comando *generate* para que seja executado o *Extrude*.



Figura 92: Selecionando o comando Extrude

D	etails View	д
-	Details of Extrude1	
	Extrude	Extrude1
	Geometry	Sketch1
	Operation	Add Material
	Direction Vector	None (Normal)
	Direction	Both - Symmetric
	Extent Type	Fixed
	FD1, Depth (>0)	50 m
	As Thin/Surface?	Yes
	FD2, Inward Thickness (>=0)	0,01 m
	FD3, Outward Thickness (>=0)	1 m
	Merge Topology?	Yes
Ξ	Geometry Selection: 1	T
	Sketch	Sketch1

Figura 93: Dados estabelecidos para a execução do Extrude



Figura 94: *Extrude*

4. Definição de um volume de controle: ter os contornos do que será avaliado no processamento não é suficiente para se aplicar o modelo de volume finitos, sendo preciso definir um volume de controle; assim os próximos passos envolvem a criação desse volume.

Nesse caso, o procedimento adotado foi de se fechar as duas aberturas restantes no modelo com superfícies planas. Para tanto, é necessário estabelecer novos planos de suporte ao modelo além daqueles já entendidos pelo ANSYS (planos que seccionam a origem) – o comando para isso é o *New Plane*.

Para se definir o novo plano utiliza-se a opção de *type* como *from face*; desse modo, ao selecionar a região correspondente a espessura do túnel de vento e se aplicar o *generate* será definido um novo plano suporte para desenho.

Esse mesmo processo deverá ser realizado para a outra abertura.



Figura 95: Definindo os Inputs do comando New Plane.



Figura 96: Seleção da face que servirá de guia para o novo plano.

5. A partir dos planos pré-definidos na etapa anterior, faz-se duas *Sketches* como descrito na etapa três, de modo que os *Sketches* sejam justapostos com o perímetro externo das aberturas. Para melhor realizar os *Sketches* é possível utilizar o comando *look at* com o botão direito do *mouse* sobre os novos planos suportes.

Na sequência, cria-se os fechamentos das aberturas pelo comando *surfaces from sketches*, dentro da aba *concept* na barra de comandos da parte superior da tela, fazendo uma superfície por abertura.



Figura 97: Sketch para o fechamento da abertura.



Figura 98: Superfície gerada através do Sketch.

6. Um importante elemento a se colocar no modelo quando se deseja estudar os coeficientes de pressão em uma geometria qualquer é o tubo de pitot. A função desse elemento no modelo é a mesma de em um ensaio laboratorial: medir o valor de pressão de obstrução. Para se obter esse valor, basta utilizar o maior valor de pressão que aparecerá na face perpendicular ao escoamento de um pequeno cilindro. Esse valor servirá de divisor para as pressões resultantes da análise numérica, obtendo-se com isso os valores de coeficientes de pressão.

Para se fazer esse cilindro é suficiente que o mesmo seja pequeno o bastante para não afetar os resultados e que ele esteja aproximadamente na mesma cota da parte mais alta da geometria analisada. No caso foi utilizado um cilindro de 0,5 m de raio e 1 m de comprimento. Para desenhá-lo, segue-se os mesmo passos da esfera realizada anteriormente, utilizando a aba *Create*, *Primitives*, *Cylinder*, haverá as opções de detalhamento as quais para o exercício aqui realizado foram adotadas como as da Figura 99.

D	etails View	
	Details of Cylinder1	
	Cylinder	Cylinder1
	Base Plane	XYPlane
	Operation	Add Material
	Origin Definition	Coordinates
	FD3, Origin X Coordinate	0 m
	FD4, Origin Y Coordinate	15 m
	FD5, Origin Z Coordinate	15 m
	Axis Definition	Components
	FD6, Axis X Component	0 m
	FD7, Axis Y Component	0 m
	FD8, Axis Z Component	1 m
	FD10, Radius (>0)	0,5 m
	As Thin/Surface?	No

Figura 99: Coordenadas e dimensões do tubo de pitot.



Figura 100: Cilindro o qual funcionará como tubo de pitot.

7. Etapa *Fill*: o comando *Fill* irá preencher o vazio que foi criado com todos os elementos pré-definidos até aqui, com esse volume gerado será possível partir para as próximas fases da análise: o *Mesh*.

A ferramenta *Fill* se encontra dentro da aba *tools*. Ao selecionar o comando é necessário definir os elementos fins para que seja feito o preenchimento; para tanto basta clicar em *Target bodies* e selecionar todos os elementos desenhados com o *mouse*, ou mesmo escolher a opção *all bodies*. O tipo de extração deve ser definido como *by caps*. Após isso, basta aplicar o comando *generate* para se obter o volume final.

D	etails View	
Ξ	Details of Fill1	
	Fill	Fill1
	Extraction Type	By Caps
	Target Bodies	All Bodies
	Preserve Capping Bodies	Yes
	Preserve Solids	Yes

Figura 101: Opções selecionadas para o comando Fill.



Figura 102: Volume obtido do Fill.

8. Etapa *Mesh*: após terminar a etapa de definição do *geometry*, salva-se o arquivo e fecha-se a janela, voltando-se a janela principal do ANSYS Workbench. Ao se clicar duas vezes em *Mesh*, abrir-se-á uma nova página onde será possível estabelecer parâmetros da malha.

A etapa de *Mesh* serve para discretizar a geometria, refinar a malha, realizar importantes etapas como *inflation* e discriminar as interfaces.

O primeiro passo dentro dessa etapa consiste em suprimir todas as geometrias que não sejam o volume definido pelo comando *Fill* no item anterior. Para tanto, basta clicar com o botão direito do *mouse* sobre as geometrias listadas a esquerda e aplicar o comando *suppress body*.



Figura 103: Suprimindo geometrias que não se aplicam à análise numérica.

9. Na sequência cria-se seleções para futuras discriminações de interface por meio da seleção das superfícies do sólido e do comando *Create Named Selection* (dentre os comandos que aparecem ao se pressionar o botão direito do *mouse*). Para o caso aqui avaliado far-se-á os seguintes agrupamentos: cúpula, entrada, saída, paredes, piso, e pitot como mostrado nas Figura 104, Figura 105, Figura 106.

Na seleção do tubo de pitot pode-se selecionar tanto o cilindro todo como também apenas a face a barlavento conforme aqui adotado.



Figura 104: Definição de seleção: "Entrada"



Figura 105: Definição de seleção: "Cúpula"



Figura 106: Definição de seleção: "Pitot"

10. A seguir define-se o tipo de malha que será aplicado por meio do método automático. Para tanto clica-se no item *Mesh* dentre os itens no *Outline* com o botão direito do *mouse* e seleciona-se *insert* e *method*. Assim é aplicado ao sólido (criado anteriormente na fase de definição da geometria) o processo de criação da malha, utilizando como *method* a opção *tetrahedrons* por melhor se adaptar ao escoamento que se está analisando.

Antes de se utilizar o comando *generate* para se criar a malha serão definidos dois processos de *sizing* (um para a cúpula e outro para o "pitot") e um *inflation*.

O *sizing* irá refinar mais a malha próximo da superfície que será avaliada. Para isso mais uma vez clica-se com o botão direito sobre o *Mesh*, *insert*, e agora o *sizing*.

No escopo do *sizing* muda-se a opção de *geometry selection* para *named selection*, selecionando-se como seleção a cúpula e como dimensão do elemento 0,4 m. Após fazer isso, cria-se um novo *sizing* para refinar a região próxima a face do "pitot", aplicando-se como dimensão do elemento próximo a face do "pitot", 0,01 m.



Figura 107: Comando sizing

D	etails of "Face Sizing"	- Sizing
Ξ	Scope	
	Scoping Method	Named Selection
	Named Selection	Cupula
	Definition	
	Suppressed	No
	Туре	Element Size
	Element Size	0,4 m
	Behavior	Soft
	Curvature Normal Angle	Default
	Growth Rate	Default
	Local Min Size	Default (7,8007e-002 m)
L (

Figura 108: Parâmetros do sizing da cúpula

D	etails of "Face Sizing 2	" - Sizing	
-	Scope		
	Scoping Method	Named Selection	
	Named Selection	Pitot	
-	Definition		
	Suppressed	No	
	Туре	Element Size	
	Element Size	0,01	
	Behavior	Soft	
	Curvature Normal Angle	Default	
	Growth Rate	Default	
	Local Min Size	Default (0, m)	

Figura 109: Parâmetros do sizing da cúpula

Além do *sizing* é preciso definir o *inflation*. O *inflation* irá criar as camadas de interface do contato do fluido com a superfície da geometria, o tamanho total da camada limite é definida como a equação a seguir:

$$\delta = 0.035 * Dh * Re^{-1/7} \tag{43}$$

Onde:

 δ - Tamanho da camada limite;

Dh - Raio hidráulico;

Re – Número de Reynolds.

O *inflation* também se encontra dentro do comando *insert* do *Mesh*. Ao selecioná-lo é necessário definir as seleções de interface as quais será aplicado o processo do *inflation*, assim dentro da opção de *boundary* seleciona-se as seguintes seleções: "Paredes", "Piso", "Cúpula" e "Pitot"



Figura 110: Comando inflation



Figura 111: Seleção das interfaces para se aplicar o inflation

Total thickness foi a opção de *inflation* utilizada e seus parâmetros foram definidos conforme a Figura 112.

D	etails of "Inflation" - Ir	nflation		
-	Scope			
	Scoping Method	Geometry Selection		
	Geometry	1 Body		
-	Definition			
	Suppressed	No		
	Boundary Scoping Method	Named Selections		
	Boundary	Multiple Entities		
	Inflation Option	Total Thickness		
	Number of Layers	15		
	Growth Rate	1,90649831006729		
	Maximum Thickness	0,21087 m		
	Inflation Algorithm	Pre		

Figura 112: Parâmetros do inflation

O número de subcamadas foi definido em 15, por ser recomendo trabalhar com valores entre 10 a 15 camadas. Já o *growth rate* foi estabelecido pela seguinte equação de taxa de expansão (também apresentada na parte de metodologia):

$$Taxa \ de \ expansão = \left(\frac{\delta}{\Delta y}\right)^{1/14}$$
(44)

$$\Delta y = Dh * \sqrt{74} * (Re)^{-13/14}$$
(45)



Figura 113: Gerando a malha.



Figura 114: Malha pronta



Figura 115: Corte ilustrando o *sizing* do "Pitot" e da cúpula.



Figura 116: Visualização do inflation próximo a superfície da cúpula.



Figura 117: Visualização do sizing no tubo de Pitot.

11. *Setup*: após terminar a etapa de definição da malha, salva-se o arquivo e fecha-se a janela, voltando a janela principal do ANSYS Workbench. Ao se clicar duas vezes em *Setup* abrir-se-á uma nova página onde será possível estabelecer parâmetros de contorno para o processamento.

A etapa de *Setup* serve para estabelecer os dados do fluido, os dados do escoamento, as característica das superfícies e os parâmetros de parada do processamento.



Figura 118: Tela do Setup

Inicialmente se define os dados do *Analysis Type* como na Figura 119. O número de *Time Steps* por processamento foi adotado como 30.

Outline Analysis Typ	be	×
etails of Analysis Type	e in Flow Analysis 1	
Basic Settings		
External Solver Coupl	ing	
Option	None	•
Analysis Type		
Option	Transient	•
Time Duration		
Option	Number of Timesteps per Run	•
Timesteps per Run	30	
Time Steps		
Option	Timesteps 🔹	•
Timesteps	0.002 [s]	
Initial Time		
Option	Automatic with Value	•
Time	0 [s]	

Figura 119: Parâmetros adotados no Analysis Type

Provavelmente após fazer isso aparecerão algumas mensagens no canto inferior da tela. Essas mensagens aparecem para alertar que algumas definições ainda estão pendentes. A seguir, deve-se definir o *Output Control*, assim ao selecioná-lo dentro das opções do *Outline*, deve-se selecionar a aba *Trn Results* e adicionar um novo item. Define-se então os parâmetros como na Figura 121 e ao se pressionar *ok*, provavelmente a mensagem referente ao *Output Control* irá desaparecer.



Figura 120: Adicionando um novo item em Trn Results

	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · ·					
sults Backup	Trn Results	Trn Stats	Monitor	Export		 	
ransient Results							
Transient Results	1						
Transient Results	1						
Transient Results	1 Standard						•
Transient Results Option	1 Standard						•
Transient Results Option File Compression	1 Standard Default						• •
Transient Results Option File Compression Output Equa	1 Standard Default tion Residuals						•
- Transient Results Option File Compression Output Equa	1 Standard Default tion Residuals t Variables List						•
Transient Results Option File Compression Output Equa Dextra Output Output Frequence Output Frequence	1 Standard Default tion Residuals t Variables List						•
Transient Results Option File Compression Output Equa Output Frequence Output Frequence Option	1 Standard Default tion Residuals t Variables List ty Timesten	Interval					•
Transient Results Option File Compression Output Equa Output Frequence Option	1 Standard Default tion Residuals t Variables List :y Timestep	Interval					•

Figura 121: Parâmetros do Trn Results

12. Na sequência é necessário definir todos os parâmetros referentes às interfaces da cúpula e do túnel de vento. Para isso clica-se com o botão direito do *mouse* sobre *Default Domain>insert>boundary* e se define os domínios de acordo com as seleções criadas anteriormente na etapa de *Mesh*, podendo ter os mesmos nomes: cúpula, entrada, saída, paredes, piso, e pitot.



Figura 122: Inserindo os domínios.

Para cada *boundary* ou interface definida, será necessário detalhar suas propriedades e desse modo, deve-se entrar em cada uma delas e especificar: sua localização, se ela é um elemento de entrada (*inlet*), ou de saída (*outlet*) do escoamento, ou uma superfície (*wall*); e ainda os detalhes característicos de cada item anterior, tais como: se o domínio é de entrada, então é necessário definir a velocidade do fluido (no caso 20 m/s), no caso de uma superfície é necessário definir como o fluido interage com essa superfície e assim por diante. Todos os dados aplicados podem ser vistos da Figura 123 até a Figura 133.

Observa-se que as interfaces adotadas como paredes, de modo geral, foram adotadas como "sem deslizamento". Já o tubo de Pitot foi adotado "com deslizamento".



Figura 123: Definindo a *boundary* entrada como *inlet* e relacionando ela com a seleção "Entrada" definida na etapa de *Mesh*

File Edit Session I	Insert Tools Help							
	i 🔊 🕶 📲 🔐 🕹 🤌 🐷 🖬 🕲 🖉 🕷 📾 🛪 🔞 🖉 👘 🔛 🖉							
Outline Boundary: Entrada								
Details of Entrada in De	efault Domain in Flow Analysis 1							
Basic Settings Bou	undary Details Sources Plot Options							
Boundary Type	Inlet 👻							
Location Entrada v								
Coordinate Fram	e 🗄							

Figura 124: "Boundary Entrada".

utine Bounda	ary: Entrada n Default Domain	in Flow Ana	ilysis 1							
lasic Settings	Boundary Details	Sources	Plot Options							
Flow Regime						E				
Option	Subsonic	beonic								
Mass And Momen	ntum					E				
Option	Normal Spee	b								
In second Council	20			m s^-1	-	1				

Figura 125: Detalhes da "Boundary Entrada"



Figura 126: Após definida a entrada o modelo gráfico mostra o sentido do escoamento.

File Edit S	ession	insert Tools	Help	2 6 2	Z i	00	(#):		CI ha	日月	<u>ه</u> بر	0	
Outline E Details of Said	loundary la in Def	: Saida ault Domain in f	Flow Analys	sis 1								oprzed do	E
Basic Settin	gs Bo	oundary Details	Sources	Plot Options	1								
Boundary Ty	Boundary Type												
Location		Saida									~		
Coord	nate Fra	me											⊞



Outline Bound	dary: Saida Default Domain in	Flow Analysis 1		1							
Basic Settings	Boundary Details	Sources Plot Options									
Flow Regime Option	Subsonic	Subsonic -									
Mass And Mome	entum Average Sti	tic Pressure	•	8							
Relative Pressu	ne O	ol Pa									
Pres. Profile Ble	nd 0.05	.05									
Pressure Avera	ising			8							
Option	Average Ov	er Whole Outlet									



File	:	Edit	Sess	ion	Insert	Tools	Help																	
		¢	e 1	e l	01 🤊	e	😤 ja	· 🖓 🤇	3 👌	x	Vac Sub	f ≈	C	3	d j	It 🕫		t l	o 🖄	þ	۶	"à 🖪	****	
0	Dutli	ine	Bour	ndar	y: Parade																			×
Details of Parade in Default Domain in Flow Analysis 1																								
Basic Settings Boundary Details Sources																								
Boundary Type					Wall	Wall											•							
L	Location				Parec	Paredes V											¥							
	•	Co	ordinate	e Fra	ame																			Ð


File Edit Session Insert Tools Help	
🛛 🔐 🔩 📾 🥠 🔍 🖓 💩 🚸 🎗 📾 🔊 🛠 🕼 🖬 🖈 🗒 🚳 🖡	
Outline Boundary: Parade	×
Details of Parade in Default Domain in Flow Analysis 1	
Basic Settings Boundary Details Sources	
Mass And Momentum	
Option No Slip Wall 👻	
C Wall Velocity	Ŧ
- Wall Roughness	Ξ
Option Smooth Wall 🗸	

Figura 130 Detalhes das *boundary*: Paredes, Piso, e Cúpula.

Charles Internet	2010 (2010)							
utine bound	oary: Mso	Flow Anaber						
ass of Piso in D	erault pomain m	now Analys						
lasic Settings	Boundary Details	Sources						
oundary Type	Wall						•	

Figura 131: "Boundary Piso".

File Edit Sesse	e Mil 🤊 😋 🖁	Help		: (a) (a)	A 0	a a	1:00	E La	とお	<u>ه</u> بر	B	
Outine Boun	dary: Cupula n Default Domain in	Flow Analys	is 1				8	-8-120	- Strange			1
Basic Settings	Boundary Details	Sources										
Boundary Type	Wall										•	
Location	Cupula										¥	124
Coordinate	Frame											



File Edit Sess	on Insert Tools	Help	1 I 6 20	0 5	a 1: e	. K A	5- °4 F	6	
Outine Bour	dary: Pitot	flow Analysi				u		-11	E
Basic Settings	Boundary Details	Sources							
Boundary Type	Wall							-	
Location	Pitot							¥ .	
Coordinate	e Frame							E	1



	a 160 - 0 0 - 1	- A- A	5 A A 3	K 🖸 🖬	6 0	8 0	a di	L 1	A 5		
Outline Boun	dary: Pitot							5-0 mm			۲
Basic Settings	Boundary Details	Sources	is 1								
Mass And Mom Option	entum Free Sip Wa	al								-	Β

Figura 134: Detalhes da "Boundary Pitot".

13. *Solver*: Para se editar o solver é necessário voltar ao *Outline* e entrar no campo referente ao *Solver Control*, onde será possível editar os critérios de convergência e de resolução tais como na Figura 135.

Outline Solver Con	rol		1
tais of Solver Contr	ol in Flow Analysis 1		
Basic Settings Eq	ation Class Settings Advanced Options		
Advection Scheme			
Option	High Resolution	•	
Transient Scheme		E	
Option	Second Order Backward Euler	-	
Timestep Initializati	n	8	
Ontion	Automatic		
Lower Courar	t Number		
Upper Courar	t Number		
Turbulence Numerics		F	-
Centiere	High Deschution		
opuan	First Order		
Convergence Contro	High Resolution		
fin. Coeff. Loops	1		
Max. Coeff. Loops	10	C	ב
Fluid Timescale Con	rol	8	1
Timescale Control	Coefficient Loops	*	
Convergence Criteri			
Residual Type	RMS	•	
Desidual Tarnet	1.F-4		
Conservation T	rget	E	
Elapsed Wall Clo	k Time Control	E	Ð
Interrupt Contro		E	9

Figura 135: Opções utilizadas no Solver Control

14. *Default Domain*: É necessário editar também o *Default Domain* para se definir as propriedades do fluido que consiste o escoamento analisado. Para tanto entrar no campo referente ao item e editar as propriedades básicas e o modelo do fluido conforme a Figura 136 e a Figura 137.

Edit Session 1	naer 1006 hep 1 🖄 🖏 🖬 🖬 🖉 🖉 🗛 📖 🗴 🤌 🖉 👫 🙀 🎬 🦃 🎔	ا 🖻 🖁 🔧
utline Domain: De	-fault Domain	
ails of Default Doma	ain in Flow Analysis 1	
Location and Type	d Models Initialization	
coation	8108	
	Dido	· · · ·
Jomain Type	Fluid Domain	•
Coordinate Frame	Coord 0	•
Fluid and Particle Def	nitions	Ξ
Fluid 1		*
		×
Ehrid 1		
Option	Material Library	-
Material	Air at 25 C	¥ []
Morphology		
Option	Continuous Fiula	•
		Œ
Domain Models		
Pressure		
Reference Pressure	1 [atm]	
Buoyancy Model		Ξ
Option	Non Buoyant	-
Domain Motion		Ξ
Option	Stationary	•
Mesh Deformation		

Figura 136: Definindo as propriedades básicas do fluido.

utline Domain: Defa	ult Domain	
ails of Default Domai	n in Flow Analysis 1	
lasic Settings Fluid I	Models Initialization	
Heat Transfer		F
	• endersonal	
Option	Isothermal	
Fluid Temperature	25 [C]	
Turbulence		F
in built nee		_
Option	Shear Stress Transport 🔹	
Wall Function	None (Laminar)	
- Advanced Turbulence	K-Epsilon Shear Stress Transport	Ē
Transitional Turbu	BSL Reynolds Stress	Ē
	SSG Reynolds Stress	
Combustion		6
Option	None	
Thermal Radiation		E
Ontion	None	

Figura 137: Definindo o modelo do fluido.

Além do *Basic Settings* e do *Fluid Models* também é necessário editar o *Initialization* para definir os parâmetros iniciais do processamento numérico. Assim ao entrar na *Initialization*, assinala-se o campo *Domain initialization* e edita-se seus parâmetros conforme a Figura 138. Observa-se que ao se clicar *apply* a outra mensagem de alerta no canto inferior esquerdo deverá desaparecer.

Após essa última etapa, pode-se salvar e fechar a janela do *Setup* e ir para *Solution*.

utline Domain: De	fault Domain	
ils of Default Dom a	in in Flow Analysis 1	
asic Settings Flui	I Models Initialization	
Domain Initializat	n	E
Coordinate Fran	ie -	Ŧ
Initial Conditions		
Velocity Type	Cartesian	•
Cartesian Velocity	Components	Ξ
Option	Automatic with Value	•
U	0 [m s^-1]	
v	0 [m s^-1]	
w	20 [m s^-1]	
Static Pressure		Ξ
Option	Automatic with Value	•
Relative Pressure	0 [Pa]	
Turbulence		Ξ
Option	Medium (Intensity = 5%)	

Figura 138: Parâmetros do Initialization.

15. *Solution*: Na etapa do *Solution* é possível editar o modo de processamento, de forma que ele possa ser realizado mais rapidamente. Observase, no entanto, que essas opções serão limitadas conforme a capacidade do computador utilizado. Aqui o *Run mode* foi definido como *Platform MPI Local Parallel* sendo utilizada três partições como ilustra a Figura 139.

Ao se definir o modo de processamento se dá início ao mesmo.

Type of Run Full Double Precision Parallel Environment Run Mode Platform MPI Local Parallel Host Name Partitions labeec 3 *	Run Definition	Initial Values	Partitioner	Solver	Inter	1
Double Precision Parallel Environment Run Mode Platform MPI Local Parallel Host Name Partitions labeec 3 + Show Advanced Controls	Type of Run	Ful			*	
Run Mode Platform MPI Local Parallel Host Name Partitions labeec 3	Double Precis Parallel Environ	ion ment				8
Host Name Partitions	Run Mode	Platform	MPI Local Para	allel	•	
labeec 3 +	Host Name		Partitions			
Show Advanced Controls	labeec					
Show Advanced Controls			3			+
			3			+

Figura 139: Opções para se iniciar o processamento

O término do processamento ocorrerá quando o resquício numérico for inferior ao que foi pré-estabelecido na etapa do *Setup*, ou quando o número de passos máximos definidos for atingido. Observa-se que depois de um certo número de passos é comum que os ruídos numéricos se estabilizem.



Figura 140: Etapa de processamento.

16. *Results*: Ao terminar o processamento passa-se a análise dos resultados.

Na etapa de resultados é possível avaliar muitos efeitos tais como a mudança de velocidade do vento e de pressão sobre os domínios. Aqui nesse tutorial apenas será apresentado como as pressões e os coeficientes de pressão são visualizados.

Assim para se visualizar as pressões sobre os domínios da cúpula e do "Pitot" cria-se duas visualizações de contorno dentro de *User Location and Plot*, selecionando-se a variável a ser avaliada como pressão (*pressure*). A visualização da pressão sobre as superfícies da cúpula são ilustradas na Figura 142 e Figura 143.



Figura 141: Resultados, definindo-se os contornos a serem visualizados.



Figura 142: Visualização da pressão sobre a cúpula.



Figura 143: Visualização da pressão sobre a cúpula e o tubo de Pitot.

Os coeficientes de pressão não são ainda possíveis de serem visualizados, pois não há uma opção no ANSYS CFX com essa variável. Assim, é necessário definir uma expressão que sirva depois como variável.

Os passos para se fazer isso são os seguintes:

- a. Ir a aba *expression* e criar uma nova expressão (clique com o botão direito do *mouse* em *expressions* e seleciona-se *new*)
- b. Definir *Total pressure* dividido pelo o valor de pressão máxima no tubo de pitot como a expressão de cálculo dos coeficientes de pressão.



Figura 144: Nova expressão.

O valor de pressão máxima no tubo de Pitot foi de 267,1Pa, assim no espaço para se definir a expressão se escreve: "*Total Pressure/267.1[Pa]*"

Outline	Variables	Expressions	Calculators	Turbo			
- 🖨 Ex	pressions				1		
Nor	Accumula	ted Time Step	625				
100	Current T	me Step	625				
1G	Reference	e Pressure	1 [atm]				
G	Sequence	Step	625				
1	Time		0.5[8]				
Ner	atstep		Accumulated In	te Slep			
100	orten		Convenie nine Sia	÷.			
100	t		Time				
100							
Details of f	CP						
Details of O	CP n Plot	Evakuate					
Details of G Definition	CP n Plot	Evakaate (0a.i					
Details of 0 Definition <i>Total Pre</i>	CP n Plot ssure/267.1	Evakuate					
Details of (Definition <i>Total Pre</i>	CP n Plot ssure/267.1	Evakuate.					
Details of (Definition <i>Total Pre</i>	CP n Plot ssure/267.1	Evakate. [Paj				 	

Figura 145: Definindo a expressão do coeficiente de pressão.

Após criar a expressão de coeficiente de pressão, deve-se criar uma variável que receba essa expressão na aba de *Variables*, criando para tanto uma nova variável.



Figura 146: Criando-se uma nova variável.

> \$ª veloc	ity		
Veloc	ity u,Gradient		
Veloc	sty v.Gradient		
Veloc	ity w.Gradient		
Ja Wall	Scale.Gradient		
> 🐉 Wal	Shear		
4 🕺 User De	fined		
χ.φ			
Expression	œ		
	Jobal Range		
Calculate (
Calculate (Boundary Dat	a 🔘 Hybrid	 Conservative 	
Calculate (Boundary Dat	a 🕓 Hybrid	 Conservative 	

Figura 147: Relacionando a nova variável com a expressão definida anteriormente.

Por fim, e para se concluir a descrição deste tutorial, cria-se um novo contorno em *User Location and Plot*, selecionando-se agora a variável criada ("CP"). Na Figura 148 são apresentados os valores dos coeficientes de pressão para a análise numérica processada no ANSYS CFX.



Figura 148: Valores dos coeficientes de pressão da cúpula.