



GRIDSHELL CONFECCIONADO COM MADEIRA DE EUCALYPTUS GRIDSHELL COMBINED WITH EUCALYPTUS WOOD

Anderson D. da Fé, Julio C. Molina

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Guaratinguetá, Brasil

Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. UNESP. Guaratinguetá, Brasil

* **Contacto: Anderson D. da Fé: anderson.diego_07@hotmail.com**

CÓDIGO: 4477489

Resumen

As *Gridshells* são estruturas leves em forma de casca, que oferecem a possibilidade de alcançar grandes vãos livres, além de apresentar uma ampla variedade de formas arquitetônicas. No entanto, no Brasil, não são encontrados registros de construção de estrutura *Gridshell*, seja permanente ou demonstrativa, além de que informações bibliográficas sobre este tipo de estrutura são bastante escassas, principalmente sobre seu comportamento estrutural. Neste trabalho, são apresentados os principais tópicos teóricos, seu contexto histórico, os detalhes de projeto, assim como evidenciado o acompanhamento da execução de uma estrutura *Gridshell*, construída em madeira em escala real, com dimensões totais de 10 m x 10 m, na UNESP campus de Itapeva/SP. Na construção da estrutura utilizou-se uma configuração de malha quadrangular plana, formada por ripas duplas de madeira de Lyptus (Classe D40), unidas ortogonalmente entre si por parafusos com diâmetro de 6,35 mm. A malha plana foi deformada até a obtenção da forma curva desejada e, posteriormente, travada por contraventamentos diagonais e fixada verticalmente nos elementos de fundação executados propriamente para receber a estrutura. Após a execução do projeto, foi realizado uma simulação numérica para conhecimento dos esforços atuantes na estrutura. O desenvolvimento prático da estrutura permitiu avaliar e reconsiderar as variáveis relacionadas ao controle da forma da estrutura durante as fases de montagem e à otimização das estratégias executivas. Além disso, enriquece a literatura nacional sobre o tema, reforçando e ampliando o leque de aplicações da madeira em estruturas.

Palabras-clave: Gridshell; estruturas de madeira; Eucalyptus; simulação numérica.

Abstract

Gridshells are light shell-shaped structures that offer the possibility of reaching large free spans, as well as presenting a wide variety of architectural forms. However, in Brazil, no records of the construction of this type of structure, either permanent or demonstrative, are found, and bibliographical information on this type of structure is scarce, especially on its structural behavior. In this work, the main theoretical topics, their historical context, the details of design are presented, as well as the monitoring of the execution of a gridshell structure, constructed in wood in real scale, with total dimensions of 10 mx 10 m, in the UNESP campus of Itapeva / SP. In the construction of the structure a square quadrangular mesh configuration was used, formed by double slats of Lyptus wood (Class D40), orthogonally joined together by screws with a diameter of 6.35 mm. The flat mesh was deformed until obtaining the desired curved shape and, subsequently, braked by diagonal bracings and fixed vertically in the foundation elements executed properly to receive the structure. After the execution of the project, a numerical simulation was carried out to know the structural forces. The practical development of the structure allowed to evaluate and reconsider the variables related to the control of the structure shape during the assembly phases and to the optimization of the executive strategies. In addition, it will enrich the national literature on the subject, reinforcing and expanding the range of wood applications in structures.

Keywords: Gridshell; wood structures; Eucalyptus; numerical simulation.



1. INTRODUCCIÓN

Desde os primórdios de sua existência, o homem se encontra em constante evolução na busca de satisfazer as necessidades de abrigo, priorizando, num primeiro momento, a proteção contra fatores da natureza - como chuva, vento e frio – e dada as evoluções das técnicas construtivas, possibilitando atentar para outros aspectos, como conforto, criando uma identidade cultural significativa, consolidando as características de um determinado povo, região, crença e época. Boa parte das evoluções dos sistemas construtivos é resultado não somente de conceitos empíricos, mas principalmente da capacidade intelectual do homem em desenvolver o conhecimento científico e conciliá-lo com as necessidades, podendo aperfeiçoar e harmonizar aspectos estéticos arquitetônicos (CARVALHO, 2015).

Na antiguidade, o emprego de abóbodas e cúpulas gerou um marco da engenharia e arquitetura, fazendo com que, apesar de utilizar materiais sólidos de peso considerável, se alcançasse vãos maiores conciliados com estruturas mais leves, além de fazer com que colunas pudessem ser mais esbeltas e paredes mais delgadas (MASSARA, 2002). Com o desenvolvimento de novas técnicas e tecnologias, sistemas construtivos mais leves e eficientes foram descobertos, fazendo com que as estruturas tivessem desempenho eficaz aliado à necessidade de menores quantias de matéria prima.

Em coerência com às evoluções e desenvolvimentos tecnológicos, as técnicas construtivas inovadoras prezam pela conformidade com a essência da engenharia, buscando otimizar a máxima eficiência com o mínimo de recursos possíveis. Neste contexto, podemos destacar as *Gridshells* como uma técnica bastante útil e arrojada, com comportamento estrutural análogo ao das abóbodas e cúpulas (CAFFARELLO, 2016).

De acordo com Bouhaya, apesar das *Gridshells* não serem um sistema construtivo muito empregado e de grande conhecimento da população em geral, sua origem ocorreu ainda no século XIX, em 1897 (2010 apud CARVALHO, 2015). A primeira estrutura do tipo *Gridshell* com dimensões consideráveis que utiliza a madeira como matéria prima foi construída em 1975, na cidade de *Mannheim*, na Alemanha, para a *Bundesgartenschau* – uma feira de exposição hortícola – por Frei Otto e Edmund Happold (PAOLI, 2007 apud CARVALHO, 2015).



Figura 1: Imagem da primeira *Gridshell* durante sua execução, em 1897



Figura 2: Vista interna da *Mannheim Multihalle Gridshell*, Alemanha Fonte: FASP+EPP

O sistema *Gridshell* cativa também pela grande variabilidade de materiais que podem ser utilizados, além da madeira, o aço, o alumínio, plástico e compósitos, por exemplo (CAFFARELLO, 2016).



*Figura 1: Gridshell construída em compósito de fibra de vidro. Ephemeral Cathedral of Créteil, França, 2013.
Fonte: Du Peloux et al, 2015*



*Figura 3: Gridshell em aço do Kogod Courtyard em Washington, D. C., Estados Unidos da América
Fonte: Behance*



*Figura 2: Gridshell feita de papelão. Pavilhão japonês da Expo Hannover 2000, Alemanha
Fonte: Kuiken e Mentegazzi, 2014*



*Figura 4: Gridshell em madeira do Savill Building em Surrey, Reino Unido
Fonte: AtelierTen, 2007*

De acordo com Caffarello (2016), apesar de ser um material utilizado desde a antiguidade, a madeira se mostra bastante versátil, tendo a capacidade de se “reinventar”, “adequando-se” com o desenvolvimento de novas técnicas e sistemas construtivos, principalmente no sistema *Gridshell*, em que se aproveita diversas características próprias da madeira.

Conforme relatos de Kuijvenhoven (2009 apud CAFFARELLO, 2016), a vantagem do uso da madeira é pela redução dos impactos sobre os recursos naturais e tempo de construção, facilidade em se conseguir a adequação das formas complexas graças à possibilidade da grade poder ser deformada por dobragem.

Ferreira e Calil Junior (2002) afirmam que podem ser ponderadas outras vantagens no emprego da madeira em estruturas de *Gridshell*, como:

- Industrialização do processo de fabricação de construções;
- Sustentabilidade;
- Variabilidade do comprimento das peças de acordo com a necessidade relatada em projeto, possibilitando o uso de madeiras de reflorestamento;



- Possibilidade de grandes vãos sem a necessidade de apoios verticais entre os apoios de sua extremidade;
- Padronização e controle dos elementos constituintes da construção;
- Leveza do material;
- Alta resistência;
- Contrariando a crença popular, grandes elementos de madeira, tem boa resistência ao fogo.

Podemos ampliar ainda mais o leque de vantagens da *Gridshell* quando consideramos que devido à capacidade de armazenar carbono, a flora tem respeitável importância no controle climático, dado que o dióxido de carbono – CO₂ – da atmosfera é absorvido pelas árvores, sendo liberado o oxigênio para a atmosfera e armazenado o carbono durante seu crescimento em suas folhas, raízes e lenho, apenas o liberando para atmosfera quando apodrecem na natureza (GREEN, 2012 apud KUNZ, SILVA, SILVA 2016). Desta forma, a madeira também se apresenta como uma opção eficiente na procura da redução dos impactos nas mudanças físico-climáticas que a construção civil pode causar, visto que o ciclo de armazenamento de carbono pode ser recommençado quando se faz o reflorestamento da área em que a madeira fora extraída (N.W, 2012 apud KUNZ, SILVA, SILVA 2016).

Apesar de ser um sistema originado ainda no século XX, além das mais diversas vantagens apresentadas, a aplicação das *Gridshells* ainda é pouco frequente e desconhecida até mesmo por profissionais da área, sendo a quantia construída relativamente baixa (CAFFARELLO, 2016).

Durante muitas décadas no Brasil os exemplos de construção em madeira geraram uma visão negativa da madeira como material estrutural pela utilização incorreta do material. Nesse sentido, há a necessidade imediata de maior divulgação das possibilidades de construção em madeira através de exemplos de estruturas demonstrativas diferentes das convencionais como pontes, telhados entre outras. A madeira quando bem utilizada é bastante competitiva com os outros materiais utilizados como alternativas de construção, como o aço e o concreto.

Apesar das estruturas do tipo *Gridshell* não serem comumente encontradas no Brasil, alguns países da Europa, como Alemanha e Itália, possuem uma maior utilização da técnica. É muito comum nos países com tradição em madeiras a utilização de madeiras de pinus na construção de estruturas deste tipo. No entanto, as espécies de pinus encontradas no Brasil apresentam muitos defeitos próprios e por se tratar de uma estrutura em forma de cúpula existe um grande risco de ruptura da madeira nas regiões com presença de nós por exemplo.

A utilização de madeiras de Eucalyptus na construção da estrutura de *Gridshell* busca diminuir os defeitos na estrutura e principalmente aumentar a sua resistência e eficiência durante sua construção. Pretende-se também melhorar a distribuição das tensões nas regiões das ligações metálicas que são os pontos mais críticos das estruturas de madeira.

Através da construção da estrutura do tipo *Gridshell*, montada no Campus da UNESP de Itapeva, foi possível estudar o comportamento da madeira de Eucalyptus do



ponto de vista físico e mecânico assim como verificar os principais problemas e dificuldades na construção da estrutura.

Este trabalho tem por objetivo projetar o sistema estrutural Gridshell, estudar os materiais (aço e madeira de Eucalyptus) utilizados na sua confecção, e acompanhar as etapas de produção do sistema como um todo, desde a fundação até a cobertura completa.

2. MATERIAL E MÉTODO

Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre as *Gridshells* para um maior embasamento teórico, sendo fundamentada pela literatura nacional e internacional sobre o assunto. Posteriormente, utilizou-se do embasamento teórico para a construção de uma estrutura de *Gridshell*.

Gridshell é um sistema construtivo composto por uma estrutura com seu formato em curvatura, como uma casca, consistindo em uma malha elástica, tendo por base a deformação de uma grelha plana de ripas contínuas relativamente longas e de pouca espessura (FIGURA 5), sendo estabelecida a estrutura flexionando as ripas e deformando a grelha para a obtenção da superfície curva desejada (FIGURA 6) apertando os nós para que a estrutura consiga rigidez diagonal (FERREIRA, 2002).

A grelha (ou malha) pode ser composta por elementos curtos conectados por nós de conexão ou realizando a flexão de barras (ou ripas) contínuas que se interceptam formando losangos, fazendo a flexão ou içamento até se atingir a formação desejada e posteriormente a fixação dos nós (TOUSSAINT, 2012 apud KUNZ, SILVA, SILVA 2016).

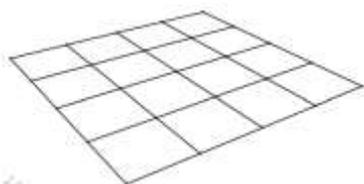


Figura 5: Representação da grelha plana
Fonte: Toussaint, 2007

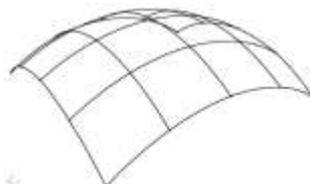


Figura 6: Representação da grelha curvada
Fonte: Toussaint, 2007

A grelha plana de ripas pode ser com camadas simples ou duplas, que são fixadas em suas interseções por nós com encaixe pela parte externa (FIGURA 6) ou com parafusos internos (FIGURA 7), que são apertados posteriormente para consolidação da estrutura (CARVALHO, 2015).



Figura 7: Ligação com encaixe na parte externa
Fonte: Carvalho, 2015

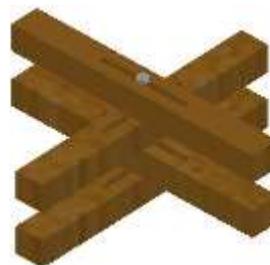
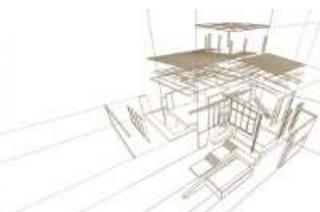


Figura 8: Ligação com parafusos internos
Fonte: Carcalho, 2015



Conforme relatos de Kunz e Prauchner (2015), a malha contínua faz com que as cargas sejam distribuídas pela extensão da *Gridshell* sendo transferidas para as bordas externas, consolidando um sistema rígido.

3. RESULTADOS

3.1. Projeto

A planta baixa da estrutura foi obtida através da utilização do *software* AutoCAD® AUTODESK. Na Figura 9 tem-se o desenho da estrutura de *Gridshell* e na Figura 10, a estrutura do *Gridshell* com os contraventamentos a serem considerados para manter a estrutura em forma de cúpula somente com quatro apoios laterais e sem a utilização de apoios intermediários no meio do vão:

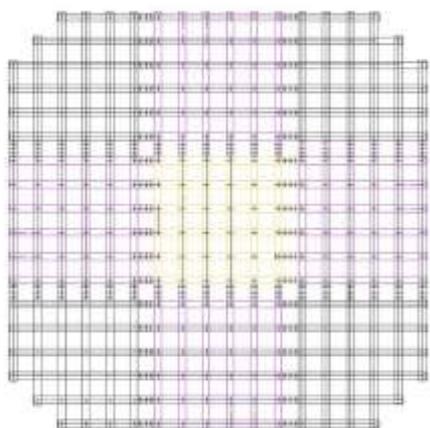


Figura 9: Componentes da estrutura de *Gridshell* – total de 9 módulos de madeira

Fonte: Autoria própria

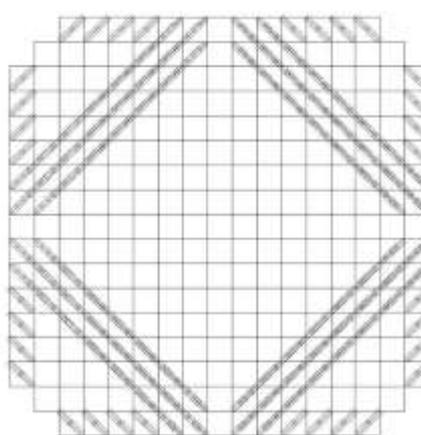


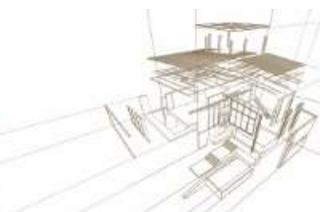
Figura 10: Contraventamentos do *Gridshell*

Fonte: Autoria própria

3.2. Confecção das peças

As peças do *Gridshell* foram compostas de madeiras Eucalyptus disponíveis na região de Itapeva (Eucalyptus Grandis). Mesmo o Eucalyptus sendo uma madeira de alta densidade foi efetuado o tratamento preservativo das lâminas de madeira em autoclave com CCA (solução de Cobre, Cromo e Arsênio) no laboratório de preservação da madeira na UNESP Campus de Itapeva. Neste caso, foi verificada a permeabilidade do tratamento na madeira utilizada. A intenção do tratamento é garantir que as partes da estrutura compostas por alburno sejam preenchidas com a solução preservativa. A madeira quando tratada tem uma duração de até 40 anos contra apenas 5 anos da madeira sem tratamento.

Foram confeccionados um total de 9 módulos quadrados com lâminas de madeira. Cada módulo possui dimensões planas de aproximadamente 3 metros de comprimento e largura. Os módulos foram confeccionados no Laboratório de Propriedades Mecânicas da UNESP/Itapeva conforme projeto e, posteriormente, foi feita a identificação de todas as peças de madeira, componentes da estrutura de *Gridshell*, além de ser estimado o número total de parafusos com proteção contra corrosão utilizados na composição da estrutura de cobertura para aquisição.



3.3. Caracterização física e mecânica

A partir da madeira de Eucaliptus escolhida para construção do sistema foram retiradas amostras para o ensaio de caracterização física e mecânica da madeira como também das ligações parafusadas que compõem a estrutura de *Gridshell*.

Todos os ensaios mecânicos foram realizados na máquina universal de ensaios EMIC disponível no Laboratório de Propriedades Mecânicas da UNESP de Itapeva.

Foram realizados os seguintes ensaios de caracterização: tração, flexão, compressão, cisalhamento e embutimento dos parafusos na madeira. Os procedimentos de ensaios seguiram as recomendações da norma brasileira de madeiras ABNT NBR 7190:1997, e foram consideradas um total de 12 amostras de corpos de prova para cada caso de ensaio. Os procedimentos considerados em cada ensaio estão disponíveis no anexo B da norma ABNT NBR 7190:1997.

O peso da estrutura foi obtido a partir das dimensões dos elementos de madeira e também com base na densidade aparente da madeira a 12% conforme ABNT NBR 7190:1997. Foi verificada também a relação do peso real das ligações parafusadas com o peso da estrutura de madeira, tendo-se em vista que a norma de madeiras admite o peso das ligações como sendo 3% do peso próprio total da estrutura de madeira. O peso real da estrutura e ligações foi conferido através da pesagem por uma balança de precisão disponível no laboratório, sendo cada módulo pesado individualmente.

3.4. Montagem da estrutura

As peças de madeira preparadas para a estrutura foram dispostas conforme projeto para a composição da grelha plana e fixadas com parafusos protegidos contra a corrosão.

Foi confeccionado um tanque de água com revestimento impermeável para umedecer inicialmente a madeira a ser utilizada para facilitar a montagem da estrutura, evitando que as peças se quebrem durante o processo de curvamento para formação dos arcos laterais e cúpula como um todo.

Para fazer o içamento da estrutura e montagem foi usado em caminhão muck, elevando-se o centro da grelha e simultaneamente tracionando-se as diagonais da estrutura com cordas ligadas em X a uma chapa metálica central posicionada abaixo da estrutura. A Figura 11 mostra os detalhes de como foi feito o tracionamento das diagonais para levantamento do centro do Grid para geração do formato em cúpula.

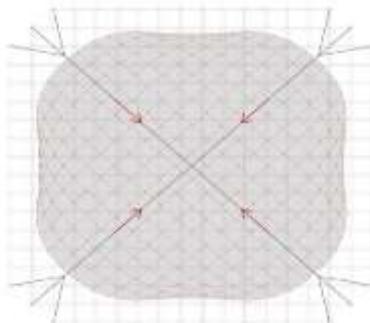
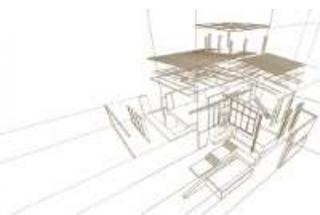


Figura 11: Tração das diagonais para levantamento do centro do Gridshell
Fonte: D' Angelo (2011)



Durante o levantamento da grelha, a estrutura ficou permanentemente sendo umedecida com o uso de aspersores colocados em seu topo. O umedecimento das peças visa torná-las mais flexíveis e evitar a ruptura durante a flexão das mesmas. As regiões da madeira com tendência de ruptura, principalmente nas regiões dos arcos laterais, foram reforçadas com cobrejuntas de madeira.

O tensionamento da estrutura foi realizado aos poucos, de forma constante até que se atingisse a altura de aproximadamente 2,20m no centro – pé direito – e 1,50m nos quatro arcos laterais. A forma desejada a ser confeccionada para a estrutura de *Gridshell* em questão é apresentada na figura 12.



Figura 12: Forma da estrutura construída
Fonte: Autorial própria

Posteriormente, a estrutura foi exposta ao ar livre para secar, e foi feito todo o acompanhamento de perda de umidade e diminuição das dimensões das lâminas de madeira. Consequentemente foi realizado o reaperto constante dos parafusos até que a estrutura estivesse completamente seca, pronta para receber a pintura final e ter as variações das dimensões com a perda de umidade cessadas. A perda de umidade da estrutura provoca o afrouxamento dos parafusos até que a estrutura seja impermeabilizada. A pintura do sistema foi realizada com a utilização de *stein* na cor *gold Montana Química*. O processo de pintura em questão garante a impermeabilização da estrutura aumentando a sua vida útil e melhorando seu aspecto estético e visual.

Após a instalação da estrutura de *Gridshell*, foi realizado um sistema de fundação em madeira com postes de Eucalyptus tratado para dar suporte e maior consolidação da estrutura. Cada poste foi fixado na profundidade de 1,00m e a altura do solo até o apoio do *Gridshell* foi de 0,90m aproximadamente. Foram também confeccionados apoios em aço galvanizado a fogo para sustentação da estrutura sobre os postes de Eucalyptus. Os apoios metálicos confeccionados têm a função de impedir as translações horizontais e verticais dos nós de apoio do *Gridshell*, sendo dimensionados em função do peso próprio estimado para a estrutura toda, ou seja, 500 kg/12 apoios. Ao redor dos postes, foi feito um acabamento utilizando floreiras, tendo, função estética para esconder os postes de Eucalyptus. As madeiras das floreiras também foram tratadas e pintadas com *stein*.



Figura 13: Detalhes dos postes roliços de Eucalyptus
Fonte: Autorial própria

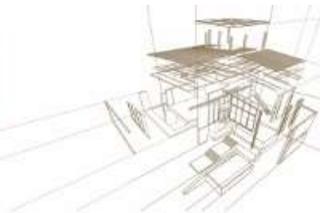


Figura 14: Gridshell instalado
Fonte: Autoria própria

4. CONCLUSÃO

As ações simultâneas na estrutura do *Gridshell* de torção, flexão e cisalhamento bidimensional, não apresentam um método analítico de cálculo específico, sendo necessário utilizar os critérios de combinações existentes propostos no documento normativo Eurocode 5 (2008).

A deflexão deve se aproximar da deflexão de equilíbrio natural, para não ocorrer uma dissimetria geométrica da malha curvada após a remoção dos suportes para sua acomodação, desviando a estrutura para a sua posição de equilíbrio. A mudança de geometria de forma indesejada, ocasiona a ruptura das ripas que compõem a estrutura, dessa maneira, é imprescindível o uso de contraventamentos diagonais para garantir a rigidez da estrutura.

O umedecimento da madeira resulta na obtenção da forma da curva, podendo substituir esse método pelo uso de madeiras verdes, facilitando a curvatura da malha durante a montagem da estrutura e diminuindo os riscos de ruptura. A curvatura da malha plana é impulsionada pela combinação de tensionamentos horizontais nas bases de apoio associados ao içamento vertical da parte central da estrutura, reduzindo o uso de força horizontal.

Ademais, o volume da madeira impacta significativamente a relação entre o comportamento do modelo reduzido e a estrutura real, ainda que obtenham efeitos similares. Nesse sentido, ao ponderar o tamanho do vão denota-se o uso eficiente da madeira, contribuindo para um menor consumo de material.

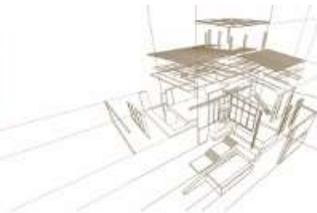
AGRADECIMENTOS

UNESP Campus de Itapeva por ceder equipamentos e espaço físico para o desenvolvimento do trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1997). NBR 7190: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro.

AtelierTen@ (2007). <http://www.atelierten.com/2011/projects/the-savill-building/#>. "The Savill Building, Windsor, UK."



AUTODESK INC., “Autodesk AutoCAD,” 2017. [Online]. Available: <http://www.autodesk.com/products/autocad/overview>.

Barroso, J.M.; Fernandes, J.G.; Branco, J.M. (2016). A utilização de ferramentas digitais como suporte à idealização, análise e construção de malhas estruturais de madeira. Congresso Português de Building Information Modelling, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

Behance@ <https://www.behance.net/gallery/6950327/Smithsonian-Portrait-Gallery-courtyard>.

Bouhaya, L. (2010). Optimisation structurelle des *Gridshells*. 147 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ecole Doctorale Science Ingénierie Et Environnement, Université Paris-est, Paris.

Carvalho, D.F.P.A. (2015). *Gridshells* em madeira: morfologia, aplicabilidade, comportamento estrutural e projeto. Dissertação – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.

Caffarello, F.M. (2016). Análise estrutural de cobertura em *Gridshell* de madeira. Dissertação – Departamento de estruturas (DES), Faculdade de Engenharia Civil Arquitetura e Urbanismos (FEC), Campinas, Brasil.

D’Angelo, P. (2011). La tecnologia delle Gridshell. Sperimentazione di un sistema di copertura “automontante”. 2011. 175 f. Tese (Doutorado) -Università degli studi di Napoli Federico II, Facoltà di Architettura, Dottorato in Tecnologia dell’Architettura.

FASP+EPP. Fast + Epp to Retrofit the World’s Largest Self-supporting Timber Grid Shell. Disponível em: <http://www.fastep.com/index.php/en/news/news/302-fast-epp-offices-now-oqm-certified-14>. Acesso em: 28 de abril. 2017.

Ferreira, N.S.S.; Calil Junior, C. (2002). Estruturas lamelares de madeira para coberturas. Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, n.18, p. 109-138.

Kuijvenhoven, M. (2009). A *design* method for timber grid shells, Delft.

Kuiken, J.; Mentegazzi, E. (2014). Behind *gridshells*: morphogenetic and parametric *design* strategies. Amsterdam: Bna Research Fund., . 112 p.

Kunz, M.; Prauchner, M.B. (2015). Uso do sistema estrutural *Gridshell* na criação de formas complexas em estruturas de madeira. Revista de Arquitetura Imed, Porto Alegre, v. 1, n. 4, p.19-25, jan. 2015. Semestral.

Kunz, M.; Silva, C.C.A.; Silva, J.L. (2016). Estruturas em madeira: uso do sistema *Gridshell* para cobertura de picadeiro para centro de terapias alternativas. Seminário Internacional de Construções Sustentáveis Imed, Porto Alegre, out. 2016.

Massara, B. (2002). A Arquitetura Gótica. Artigo Online. Disponível em http://www.territorios.org/teoria/H_C_gotica.html. Acessado em: 17/04/2017.

Peloux, L.D.U. et al. (2015). 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.

Toussaint, M.H. (2007). A design tool for timber gridshells: The development of a grid generation tool. Mestre. Dissertação, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences.