



2024

Panorama sobre o uso e as generalidades construtivas em *Wood Gridshell*

Isadora Carine da Silva Duarte ^a; Christiane Areias Trindade ^b

^a Aluno de Graduação em Engenharia Civil, isadora.duarte@ufms.br

^b Professor Orientador; Engenharia Civil, christiane.trindade@ufms.br

Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Av. Costa e Silva, s/nº | Bairro Universitário | 79070-900 | Campo Grande, MS, Brasil.

RESUMO

As *wood gridshells* são formadas por peças de madeira conformadas em dupla curvatura, proporcionando rigidez e permitindo atingir formas curvilíneas. Dado um objetivo ou projeto, a grade plana é curvada até atingir a forma de concha. Essas estruturas podem ser empregadas tanto em construções temporárias quanto duráveis, como em galpões, pátios, pavilhões, museus e hangares. Assim, trata-se de um modelo estrutural paramétrico cujas análises se respaldam em elementos finitos; ideais para projetos que precisam atender grandes vãos com menores usos de materiais. Além disso, a fabricação adequada da madeira auxilia no combate de efeito estufa e aprisionamento de carbono. Ao se analisar a literatura, verificou-se que cada *wood gridshell* é única; sendo assim, os estudos voltados a entender seus elementos construtivos, técnicas, materiais, teorias são muito particulares para cada caso. Por conseguinte, haja vista que há poucas estruturas construídas no mundo; poucos trabalhos escritos; bem como a pungência do uso de tecnologias construtivas que contribuam para a sustentabilidade e que acrescentem a literatura brasileira; portanto, este trabalho propõe desenvolver um panorama do uso e das generalidades construtivas de estruturas *wood gridshell* conforme o estado da arte.

Palavras-chave: *wood gridshell*, *wooden gridshell*, construções em *gridshell*, *gridshell design*.

ABSTRACT

Wood gridshells are made up of pieces of wood shaped into double curvatures, providing rigidity and allowing curvilinear shapes to be achieved. Given a goal or project, the flat grid is curved until it reaches the shape of a shell. These structures can be used in both temporary and durable constructions, such as warehouses, yards, pavilions, museums, and hangars. Thus, it is a parametric structural model whose analyses are supported by finite elements; ideal for projects that need to cover large spans with less use of materials. In addition, the appropriate manufacture of wood helps to combat the greenhouse effect and promotes carbon sequestration. When analyzing the literature, it was found that each wood gridshell is unique; therefore, studies aimed at understanding its construction elements, techniques, materials, and theories are very specific to each case. Given that there are few such structures built worldwide, few written works, and considering the relevance of construction technologies that contribute to sustainability and add to Brazilian literature; therefore, this work proposes to develop an overview of the use and construction generalities of wood gridshell structures according to the state of the art.

Keywords: *wood gridshell*, *wooden gridshell*, *gridshell construction*, *gridshell design*.

1 INTRODUÇÃO

As estruturas em *gridshell* são estruturas em cascas (“shell”) que formam grelhas (“grid”) curvilíneas de forma livre (V. Souza, 2022). São feitas com segmentos de madeiras retos conformados em dupla curvatura e apresentam a vantagem de atender grandes vãos; possuem boa aparência estética, resistência e podem ser construídos seja na

modalidade de serem feitas a fim de serem construções duráveis ou temporárias.

Dessa maneira, o padrão de grelha se distingue das estruturas convencionais, formadas por elementos verticais e horizontais; permitindo a estrutura global se beneficie da ação combinada de arcos e concha, obtendo formas únicas (Paoli, 2007).

No que tange aos materiais componentes, cabe considerar também que há possibilidade de se fazer

gridshells metálicas, em madeira, ou concreto; bambu; materiais compósitos, como o Poliéster Reforçado com Fibra de Vidro (GFRP); e, mais recentemente nos projetos do arquiteto Shigeru Ban, com tubos de papelão.

Para grades em aços, é necessário o processo industrial para que se obtenha a precisão exigida pela forma prevista no projeto. Por outro lado, o uso da madeira prevê a possibilidade de moldar *in loco*, devido à capacidade de chegar à forma desejada.

As *wood gridshells* são consideradas uma alternativa sustentável, mormente, quando o material utilizado na fabricação das peças de madeira advém de manejo florestal ambientalmente amigável ou de florestas produzidas para corte (I. Souza, 2019).

Isso representa menor pressão sobre florestas nativas, aprisionamento de carbono durante o ciclo de produção de madeira; confere proteção ao solo e mananciais de água; além de auxiliar no combate ao efeito estufa (SNIF, 2015 *apud* I. Souza, 2019).

No entanto, a implementação de estruturas em *gridshell* apresenta dificuldades significativas durante o projeto e execução, incluindo a avaliação de carregamentos, modelagem precisa e escolha de materiais adequados.

Embora se tenham registros de obras desde o século XIX, sendo notável a aplicação em pavilhões, museus, teatros, hangares e galpões industriais; ainda são poucas as construções em gridshell no mundo; cabendo citar o Multihalle Mannheim (Alemanha); Museu Weald e Downland Sussex (Reino Unido), o Pompidou-Metz (França); no Jardim Botânico de Taiyuan.

Face a literatura, por muito tempo, os modelos físicos não eram suficientes para estruturas não-funiculares, sendo preciso o uso de métodos computacionais para se entender o comportamento da estrutura frente aos carregamentos (Paoli, 2007); assim, representando um desafio ao corpo de engenheiros e designers nas primeiras aplicações de *wood gridshell*.

Há diferentes vertentes de estudo sobre *wood gridshell*, sendo muito particular a escolha do tema; nessa perspectiva, Collins e Cosgrove (2016), afirmam que muitos aspectos dos gridshells podem ser personalizados, dando a cada gridshell um apelo completamente diferente. Para os autores, se faz necessário o estudo detalhado e individual de cada grade para avançar o conhecimento do tema.

Por conseguinte, considerando as dificuldades associadas ao modelo estrutural e que trata-se de um tema com pouca produção científica no âmbito (inter)nacional; esta pesquisa bibliográfica busca desenvolver um panorama das generalidades construtivas acerca do uso de estruturas em *wood gridshell*.

Para tanto, cabe estudar as teorias e métodos acerca da estabilidade, modelagem e também dos materiais a serem empregados; além de apontar suas principais dificuldades, benefícios e tendências construtivas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

As *gridshells* são modelos de estruturas que podem ser interpretadas como conchas de formato livre que compõem uma estrutura reticulada.

De acordo com I. Souza (2019), essas estruturas atendem ao paradoxo de construir mais com menos recursos, enfrentado pelas atuais gerações de arquitetos, engenheiros e construtores (AEC).

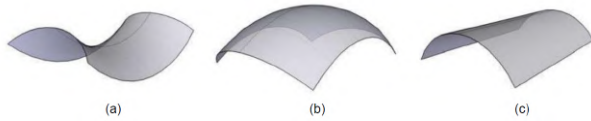
A forma e a função são os principais requisitos ao se pensar em gridshells; sendo possível usar seja como cobertura; toda estrutura, na qual não há distinção entre parede e cobertura; e até de forma temporária. Um exemplo de aplicação recente em papelão é o Pavilhão de Hanover no Japão.

Figura 1 - Pavilhão de Hanover em papelão. Fonte: E. Alves, 2019.



Segundo Toussaint (2007), a concepção de forma de cascas se baseiam nas superfícies Gaussianas, que mostram em único ponto de casca diferentes curvas que podem ser desenhadas na superfície através desse ponto, todas com raios de curvatura diferentes; sendo a diferença de curvatura que desenham três diferentes superfícies: anticlásticas ($\ddot{y}g < 0$), clásticas ($\ddot{y}g > 0$); e cilindros (curvatura principal é 0).

Figura 2 - Superfícies de curvatura gaussiana negativa (a), positiva (b) e zero (c). Fonte: TOUSSAINT, 2007.



Outra maneira de curvatura de cascas se baseiam nas superfícies geradas, que abrangem as superfícies de revolução¹, superfícies de translação²; e superfícies regradas³.

Nessa premissa, Mesnil e Baverel (2023) estudam as formas de construção em pseudo-geodésicas para *wood gridshell*; neste trabalho, ele explica que as estruturas geodésicas são mais fáceis de serem executadas principalmente em aplicações menores; mormente em casos de pesquisas; já que uma das dificuldades das estruturas assintóticas, é que elas só são possíveis de aplicar em superfícies Gaussianas de curvatura negativa. O que pode ser superado ao se aplicar formas pseudo-geodésicas, que alcançam superfícies gaussianas positivas.

Os modelos estruturais podem ser divididos em duas categorias: pré-formadas e pós-formadas. As pré-formadas normalmente são feitas em materiais metálicos; outrossim, as pós-formadas são usualmente em madeiras ou materiais compósitos.

Dessarte, as estruturas pré-formadas são moldadas com forma final antes de serem construídas. Por outro lado, as pós-formadas, *a priori*, são formadas por elementos delgados retos; construídos no chão e depois encurvados até alcançarem a superfície desejada.

Ademais, as estruturas pós-formadas, são consideradas grades elásticas, haja vista que podem voltar a forma inicial (I. Souza, 2019).

Analogamente, a autora classifica em flexão ativa quando há o processo de curvatura para obter a forma, o que é típico de estruturas pós-formadas; como também associa a flexão inativa às estruturas

¹Criadas da revolução em torno de um meridiano, como hiperbolóides e cilindros.

²Geradas a partir da translação de curvas planas contidas em um mesmo plano, como o parabolóide hiperbólico.

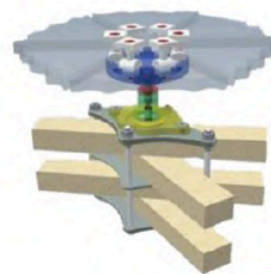
³Resultam da translação de uma linha reta em que uma das extremidades é uma curva e a outra é uma linha reta, alguns exemplos são hiperboloide de revolução e cones (SENA, 2008 *apud* FREITAS, 2016).

pré-formadas, visto que são fabricadas em aço com a forma final segundo o projeto.

Quando se analisa o modelo construtivo, percebe-se que a escolha de material da estrutura e também dos elementos de ligação são pungências desde a etapa de pré-projeto; já que pode ocorrer a ruptura durante o processo de tensionamento para obtenção da forma desejada (I. Souza, 2019).

Em geral, as ligações podem ser parafusadas, com chapas, poliméricas e podem prever o encaixe da espera das coberturas em vidro (evidenciado na Figura 3), como mostra a figura 3.

Figura 3 - Placas metálicas com suporte para fixação de vidros. Fonte: Adaptado de Naicu, Harris e Williams (2014) *apud* I. Souza (2019).



Placas metálicas com suporte para fixação de vidros

O uso de vidro para cobertura de gridshells é bastante difundido no mercado. Para esse uso, E. Alves (2019) explica que é necessário a otimização com as ferramentas atuais para sanar a dificuldade na determinação da malha, devido ao número de vigas e conexões necessárias; evitando, assim, o consumo de materiais.

Além do uso do vidro, é possível realizar também a cobertura da estrutura com membranas; ou até mesmo, em casos de fins decorativos, podem não receber coberturas. No estudo de Freitas (2019), ela mostra o Pishwanton uma estrutura de pequeno porte coberta com telhado verde em East Lothian, Reino Unido (Figura 4).

Figura 4 - Telhado Verde em *wood gridshell*. Fonte: LOWESTEIN, 2002 *apud* FREITAS (2019).



Conforme Collins e Cosgrove (2016), uma concha treliçada pode ser vista como uma série de arcos conectados entre si, criando uma série de formas (geralmente) quadriláteras, como mostra a figura 5.

Por conseguinte, a concepção de formas estruturais de grade mais comuns podem ser ou triangulares (Figura 6) ou, como mencionadas, quadriláteras.

Figura 5 - Malhas quadriláteras em Neckarsulm, Alemanha. Schober. Fonte: E. Alves, 2019.



Figura 6 - Malhas triangulares em MyZeil Mall, Frankfurt, Alemanha. Fonte: E. Alves, 2019.



Outra estrutura com malha triangular é a Carioca *Wave gridshell* (Rio de Janeiro), em aço e vidro, baseada na cultura e no relevo local (Figura 7), com dificuldades de realizar devido a falta de mão de obra, tendo projeto europeu e as peças importadas da Europa e Ásia.

Figura 7 - Carioca *Wave gridshell*. Fonte: <<https://link.ufms.br/CUGmI>>.

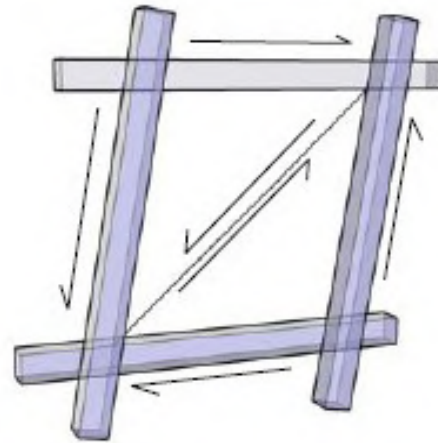


Em geral, E. Alves (2019) defendem que para arquiteturas mais simples o uso da malha retangular pode ser preferível, enquanto para arquiteturas arrojadas pode ser empregada a malha triangular.

Assim, é oportuno explicar que a geometria quadrilátera tem como propriedade ser flexível; então pode alterar sua forma sem alterar as dimensões dos elementos que as compõem; mas isso não acontece com grades triangulares.

Logo, uma possível solução para esse problema é o uso de cabos nas diagonais, como mostrado na figura 8. Conforme Wang *et al.* (2024), essa aplicação melhora em até 1,3 vezes a rigidez da malha.

Figura 8 - Elementos de gridshell com amarração diagonal. Fonte: TOUSSAINT, 2007.



Para que essa concha treliçada se adapte é preciso que as tensões de cisalhamento no plano possam ser distribuídas ao longo da casca formando uma grade; isto é, por meio de contraventamento para triangular os quadriláteros da estrutura (Collins; Cosgrove, 2016).

A rigidez diagonal pode ser fornecida em várias formas: juntas rígidas; laços em forma de cruz; travamentos rígidos; e uma camada contínua servindo de cobertura (Kunz; Prauchner, 2015).

3 METODOLOGIA

Ao classificar este estudo acerca de *wood gridshell*, é possível enquadrá-lo, quanto à natureza, como uma pesquisa básica, a qual pretende gerar novos saberes; porém, sem uma aplicação prática prevista.

Em relação à abordagem do problema, ela se caracteriza como uma pesquisa qualitativa; cuja análise de dados será realizada por meio do método

indutivo das características e teorias vistas no estado da arte.

Por conseguinte, sabendo que este tema é mais abundante em trabalhos internacionais, quanto aos objetivos, é possível classificar este *review* como uma pesquisa exploratória; a qual se respalda na bibliografia e estudos de casos para desenvolver um recorte generalista para a academia brasileira.

Somado a isso, cabe ressaltar também que esta é uma pesquisa bibliográfica sistemática, haja vista que pretende responder uma pergunta específica e utiliza métodos explícitos para identificar, selecionar e avaliar os estudos de forma criteriosa.

Sendo assim, no período de novembro de 2023 até julho de 2024, foi realizada uma revisão de literatura em plataformas científicas online (Scielo®, Capes®, Elsevier® etc.), sites não indexados e uma busca por livros concernentes à temática na biblioteca da Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS).

Dada a premissa, se suscitou a pergunta norteadora: **Quais são os usos, desafios, técnicas e teorias sobre estruturas em *wood gridshell*?**; e adotando como descritores: *wood gridshell*, *wooden gridshell*, *gridshell construction*, *gridshell design*.

Respaldado nisso, é possível estabelecer hipóteses: a) A *gridshell* é capaz de vencer grandes vãos; b) O processo construtivo tem dificuldades de execução devido a curvatura da estrutura; c) É uma estrutura com alto custo benefício; d) Há escassez de profissionais capacitados para projetar a estrutura; e) O avanço em *softwares* tem impacto positivo para a *wood gridshell*.

Assim, cabe abordar a seleção de materiais, técnicas de modelagem estrutural, métodos de montagem no local e os requisitos normativos, como também tendo em vista a otimização do desempenho estrutural e a sustentabilidade do projeto.

Nessa perspectiva, os critérios adotados foram: ano de publicação e qualidade dos trabalhos; buscar artigos de revisão ou técnicos, teses, dissertações e relatórios; seja nos idiomas português, inglês ou espanhol.

Durante o processo de revisão de literatura, foi notado que seriam necessários estudos mais específicos sobre os métodos de modelagem da *wood gridshell*, haja vista que, em casos de estruturas

anti-funiculares, as análises computacionais se tornam imprescindíveis frente aos modelos físicos.

Além disso, foi observado que as principais características e dificuldades construtivas poderiam ser melhor salientadas com base em estudos de casos de obras já executadas.

Logo, os conceitos teóricos e computacionais serão descritos na seção de Resultados, na qual evidenciar-se-ão as técnicas, materiais e *softwares* simulação usados para validar as hipóteses.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Jordan Woodson *apud* Gawell (2021) afirma que para entender como alguma coisa se levanta você tem que entender como ela pode cair. Assim, o autor explica que ao se entender o estado de falha da estrutura, se revela sua “incerteza”, o que leva a inferir como projetar com segurança uma estrutura portante.

Quando se estuda cascas no geral, sabe-se que elas são caracterizadas pela relação de extensão muito maior que espessura. Nesse sentido, é preciso conhecer a teoria de cascas e que ela é regida mormente pelo princípio da ação de membrana.

A teoria da membrana propõe que em uma casca fina carregada distribuída apenas campos de tensão de membrana puros são desenvolvidos; onde apenas são desenvolvidas tensões normais e de cisalhamento no plano, que são distribuídas uniformemente ao longo da seção transversal (Toussaint, 2007).

As condições de equilíbrio dessa teoria não são satisfeitas quando se alteram as condições de contorno, geometria ou aplica-se um carregamento concentrado. Logo, é necessário o reforço.

Dessa maneira, sabendo que os esforços são trabalhados por meio de triangulação e que a *wood gridshell* é um tipo especial de estrutura; os próximos tópicos irão expor como é *design*, elementos, método construtivos, aplicações e visão geral do uso.

4.1 O processo *form finding*

Segundo Gawell (2021), a base do projeto arquitetônico é, portanto, a busca por formas espaciais cujas a beleza estrutural está em simbiose com as forças físicas que as afetam.

Antes de definida a forma, as camadas desacopladas se deformam de forma independente; por

consequente, após definida, essas camadas individuais são conectadas e criam estruturas compostas; cuja maior resistência à flexão está fora do plano (Collins, Cosgrove, 2016).

O processo de *form finding* corresponde a otimização da arquitetura juntamente com a estrutura; ou seja, cabe encontrar a geometria mais eficiente para resistir ao carregamento externo e atender aos requisitos do arquiteto (Paoli, 2007).

Respaldo em Toussaint (2007), podem ser vistos como métodos de otimização, a função de LaGrange, programação linear e não linear, mas também modelos inteligentes e adaptativos, concernentes à Inteligência Artificial.

Além disso, Toussaint (2007) enfatiza que por meio dos modelos físicos se obtém uma visão rápida, com alta precisão, do comportamento e da forma estrutural; e o uso de métodos computacionais garante a acurácia necessária para projetos e construções adicionais.

Nesse contexto, Gawell (2021) conversa com Paoli (2007), visto que defendem a ideia de que a inovação e o desenvolvimento técnicos, nessa fase, impactam significativamente a eficiência, desempenho e economia do projeto.

Uma vez atingida a forma final, essa será a conformação que resiste ao seu peso próprio. Dessa maneira, essa forma definida é assegurada pelas condições de contorno; e como as forças são aplicadas à estrutura, não resultam forças de flexão (PAOLI, 2007).

Logo, E. Alves (2019) discretizaram esse processo em: otimização da forma e geometria; construção e otimização da malha da grelha; dimensionamento das conexões nodais; análises estruturais; e execução.

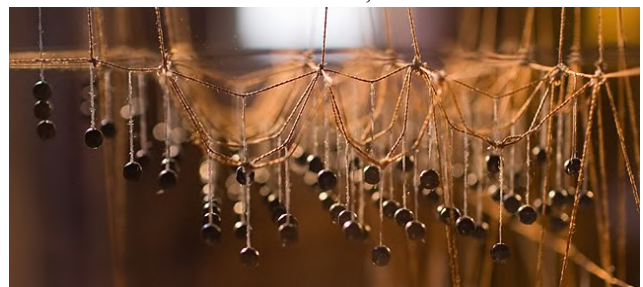
4.2 Modelos físicos

Os modelos físicos foram bastante difundidos nos estudos de cúpulas, catedrais góticas, sendo mais recente o uso na localização de formas por Antonio Gaudí, na Sagrada Família em Barcelona; e por Frei Otto no *Multihalle Manheim* (Figuras 9 e 10).

Figura 9 - Sagrada Família - Modelos físicos. Fonte: DRAGICEVIC, 2019.

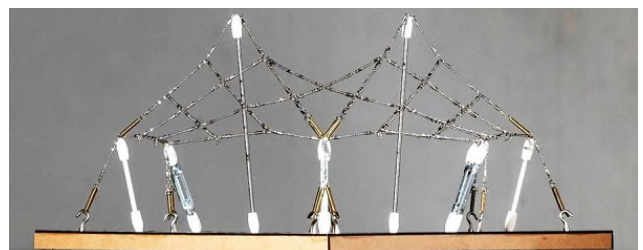


Figura 10 - Sagrada Família - Modelos físicos. Fonte: DRAGICEVIC, 2019.



Essa metodologia busca encontrar a forma mais eficiente usando o comportamento de uma corrente, presa ou fixada em extremidades, modelado pela ação da gravidade, como pode-se observar na figura 11.

Figura 11 - Modelos físicos. Fonte: HAYDAMUS, LARA, 2020.



Assim, Paoli (2007) explica que a corrente assume a forma de catenária, se for aplicado um carregamento adicional, ela se deforma e chega a forma mais adequada para que o momento fletor seja zero.

Então, é preciso frisar que esse formato funcionará apenas para um único carregamento. Em consequência, a forma da estrutura precisa atender a diferentes tipos de carregamento aplicados.

Para aplicar esse método em arcos, é importante se conhecer a carga a ser aplicada, conduzir o

experimento em uma escala menor e virar ao contrário a corrente para obter a forma. O arco trabalha principalmente a compressão e resistirá aos esforços por meio da rigidez geométrica.

De acordo com Paoli (2007), como a corrente atua na flambagem por tração, problemas que não existiam no modelo de corrente podem aparecer no modelo de arco; portanto, cabe verificar a rigidez e a inércia necessárias para evitar a encurvadura.

Por conseguinte, no caso das cúpulas, que também trabalham principalmente a compressão, é possível obtê-las com o cruzamento de arcos em um ponto comum.

Nesse sentido, Toussaint (2007) afirma que a construção desses modelos é muito demorada e uma mudança no design não pode ser transmitida facilmente ao modelo. Hoje em dia, os modelos físicos são utilizados principalmente como representações físicas do design e para melhor compreensão. O projeto é feito com auxílio de *softwares* de desenho e engenharia, nos quais alterações podem ser feitas rapidamente.

4.3 Modelos Computacionais

Os primeiros modelos computacionais são uma adaptação dos modelos físicos clássicos; então, o uso de programas de elementos finitos se limitava ao dimensionamento real, determinação da inércia e a verificação das estruturas sob seu peso próprio e, depois, de carregamento externo (Paoli, 2007).

Porquanto, Paoli (2007) corrobora que se o peso próprio não é o dominante e a estrutura não avança sobre grandes vãos, a seleção da forma funicular não é adequada; como foi para o Downland (madeira leve e pequenos vãos), cujos principais carregamentos eram vento e neve.

Nesses casos, E. Alves (2019) salientam que a geometria é obtida por meio do método matemático da relaxação dinâmica; que consiste em atingir o ponto de equilíbrio por meio de deformações aplicadas.

Isto é, primeiro se aproxima da forma; em seguida, altera essa forma a fazendo oscilar, enquanto monitora a energia cinética da estrutura (Paoli, 2007).

Esse método é muito usado em estruturas de tensão; destarte, precisou ser modificado para se suportar esforços de cisalhamento e compressão; outrossim,

para se determinar posteriormente os tipos de apoio a serem empregados.

Dessa maneira, para que se obtenha a forma, os dados de materiais e propriedades do sistema precisam ser adicionados; correspondendo à uma análise parametrizada da estrutura; sendo simplificado os processos de ajustes e correções.

Na literatura, diversos autores usam o *software Rhinoceros 3D* com o módulo *Grasshopper*; com os quais é possível realizar a programação e a obtenção da geometria parametrizada.

Somando o *plug-in Kangaroo Physics*, é possível associar as propriedades mecânicas e determinar a geometria pelo método de relaxação dinâmica. Além disso, é possível fazer integração com arquivos CAD.

Igualmente, com funções e princípios bastante parecidos, há também o *Karamba3D*, que é um *plug-in* de análise estrutural para o *Grasshopper*; sua principal vantagem é realizar a simulação em um único ambiente sem necessidade de transferências entre *softwares*. Esse *plug-in* baseia-se nas teorias de Timoshenko, contabilizando as análises de cisalhamento; bem como usa a teoria de Kirchhoff, que define as tensões e deformações para cascas finas sujeitas às forças e momentos (Matos; Martinez, 2020).

Além disso, outro programa de análise de elementos de elementos finitos é o ANSYS e sua plataforma CFX; o qual foi empregado por Cefarello, Mascia e Basaglia (2015) para verificar o efeito do vento por meio de interação de fluido-estrutura.

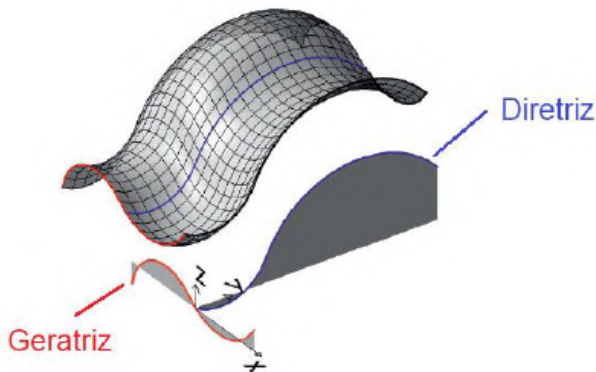
Nesse sentido, apesar de não muito utilizados, E. Alves (2019) citam também que os modelos computacionais avançados ou métodos digitais por algoritmos generativos usam da programação genética para determinar a geometria das gridshells; dessa forma, a otimização faz o uso de inteligências artificiais e serão de grande utilidade em formas complexas.

Outra maneira mais usual de se obter a forma é usando o método das superfícies translacionais; esse procedimento é apropriado para topologias de malhas contínuas, com regiões de transição suaves e que pudesse ser coberta por painéis planos.

Esse método cria uma superfície tridimensional, transladando uma curva arbitrária no espaço, denominada geratriz, ao longo da outra curva

arbitrária no espaço, denominada diretriz (E. Alves, 2019), como mostra a figura 13.

Figura 13 - Superfície translacional. Fonte: E. Alves, 2019.



Dado o exposto, parafraseando Paoli (2007), o uso de processos computacionais não obtém a forma final de imediato, são necessários processos iterativos, que testam o comportamento das barras sob carregamento e necessitam de uma certa densidade de elementos para descrever com precisão a superfície.

4.4 Formas geométricas da grade e camadas

Ao se realizar a curvatura da grade, é possível se deparar com limitações físicas e práticas relativas à rigidez (Collins, Cosgrove, 2016).

Somado a isso, cabe o estudo separado das propriedades da madeira a ser utilizada; seja esse baseado na literatura, ensaios ou em processos baseados em algoritmos (Gawell, 2021).

Quando se pensa na geometria, tem-se os modelos de grade quadriláteros ou triangulares; sendo que as triangulares conferem maior resistência quanto aos esforços de cisalhamento e deformabilidade lateral; pois se assemelham mais ao modelo de conchas, cujas malhas são mais fechadas.

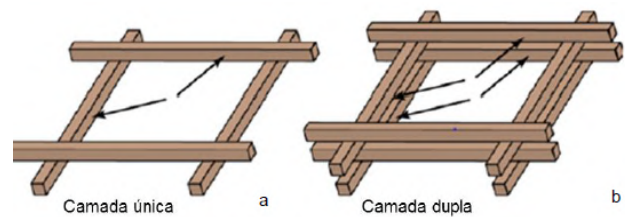
Inobstante, no seu estudo, Mesnil *et al.* (2017), constata que *gridshells kagome*, que são compostas de triângulos e hexágonos, têm maior resistência a tensões biaxiais no plano; sendo o desempenho superior a grades quadrilaterais, em casos (as)simétricos.

Ademais, conforme mencionado anteriormente, isso se dá porque as malhas triangulares são até três vezes mais rígidas que o sistema de grade *kagome* (Mesnil *et al.*, 2017).

Logo, se faz necessário o uso de juntas mais rígidas, além do reforço com cabos em estruturas de grades quadriláteras; ou caso o projetista prefira conexões de momento em vez de empregar cabos (Mesnil *et al.*, 2017).

As *wood gridshell* podem ser formadas por grades de camada única, com ripa em cada direção; ou com grade de camada dupla, com duas ripas em cada direção, como mostra a figura 14.

Figura 14 - Tipos de camadas de *wood gridshell*. Fonte: Adaptado de Naicu, Harris e Williams (2014) *apud* I. Souza, 2019.



De maneira simples, as camadas duplas podem ser vistas como uma sobreposição da camada única; unidas por nós.

Nesse sentido, I. Souza (2019), recomenda o uso de camadas duplas, devido ao risco de falhas ou deformidades que reduzem a seção transversal.

É oportuno destacar algumas considerações quanto ao número de camadas destacadas por Collins e Cosgrove (2016):

- Quando se aproxima a forma final, há o aperto dos nós e são formados blocos de cisalhamento em forma de cunha entre as camadas;
- Para estruturas de camadas duplas, cuja espessura do espaçamento de camada seja igual a dos elementos, a rigidez aumenta até 26 vezes comparada com uma única camada de mesmo material.
- São atingidos valores maiores de rigidez e também de vãos para *gridshells* multicamadas (>2);
- O raio de curvatura seria pelo menos três vezes menor que para as camadas únicas equivalentes.

Os autores explicam que o último tópico se deve a teoria da flexão elástica linear da viga; na qual o raio

de curvatura que uma viga pode atingir é diretamente proporcional à espessura.

Em consequência, supondo rigidez e resistências constantes, para uma gridshell de camada dupla, seus elementos seriam três vezes menores que uma geometria equivalente em camada única.

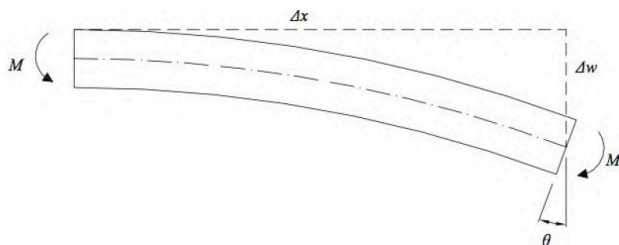
4.5 Métodos de Curvatura

Ao aplicar uma força no nó da rede, os membros girarão, deformando as células em paralelogramos. Essas deformações alteram o comprimento da diagonal de cada célula, permitindo a formação da casca em uma superfície duplamente curvada (Paoli, 2007).

A curvatura máxima de um elemento depende da força máxima e do módulo de elasticidade; mas uma resistência à flexão maior também implica um maior módulo de elasticidade. Isso significa que o raio de curvatura não diminui proporcionalmente com o aumento do momento (Freitas, 2016).

De maneira prática, isso representa que ao dobrar madeiras com diferentes resistências e raios iguais, será necessário maior momento para encurvar a madeira com maior resistência (Freitas, 2016).

Figura 15 - Elemento da estrutura Gridshell em curvatura. Fonte: TOUSSAINT, 2007.



A partir da relação entre altura da seção transversal e o raio de curvatura é possível aplicar a teoria de flexão simples para obter o esforço máximo de flexão.

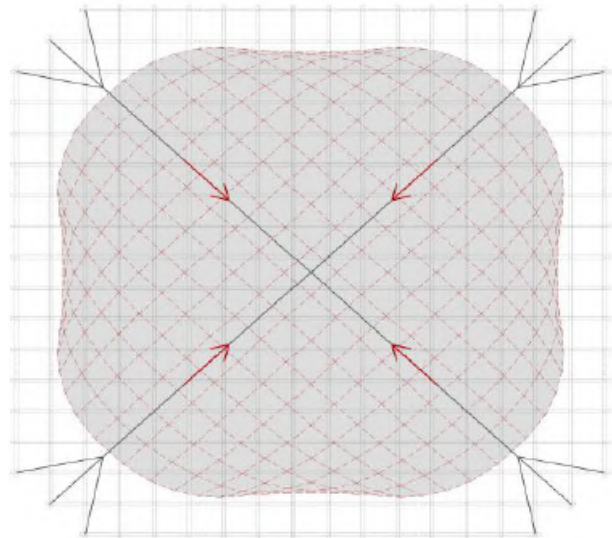
Para isso, considerando a tensão máxima de torção, o Eurocode (2003) aplica um fator de redução para ter em conta as tensões de flexão nos laminados de madeira laminada colada curvada devido à produção (Freitas, 2016).

Uma maneira fácil de visualizar a curvatura de uma gridshell é comparando a empurrar as bordas de uma folha de papel para formar um túnel ou uma colina,

pois as bordas da grade também são empurradas uma em direção à outra para corresponder à curva prevista (Paoli, 2007).

Assim, conforme Freitas (2016), uma maneira de atingir a forma de cúpula é utilizando dois guinchos manuais de alavanca; sendo as duas diagonais da estrutura são presas com cordas e então os quatro lados menores convergem em direção ao centro, como mostra a figura 16.

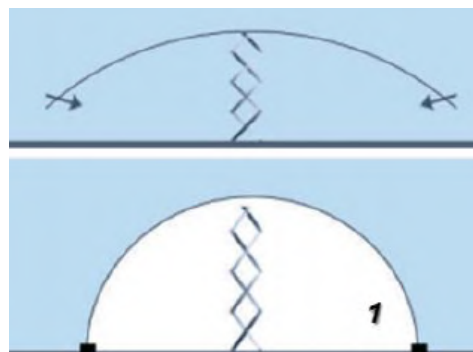
Figura 16 - Forças exercidas na estrutura para obter a forma de cúpula. Fonte: D'ANGELO (2011) *apud* FREITAS, 2016.



Somado a isso, I. Souza (2019) destaca cinco formas de realizar o processo de curvatura da *wood gridshell*:

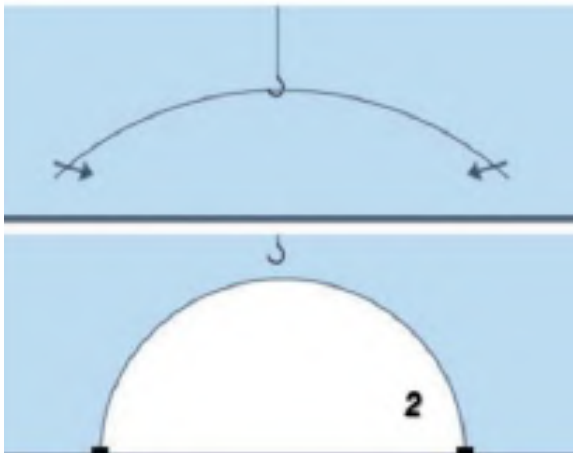
- *PUSH UP* (empurrar para cima): são usados conjuntos de andaimes ao longo da estrutura para se obter a forma (Figura 17). Esse método foi aplicado na construção do *Multihalle Mannheim*.

Figura 17 - Curvatura *push up*. Fonte: Adaptado de Fernandes, Kirkegaard e Branco (2016) *apud* I. Souza 2019.



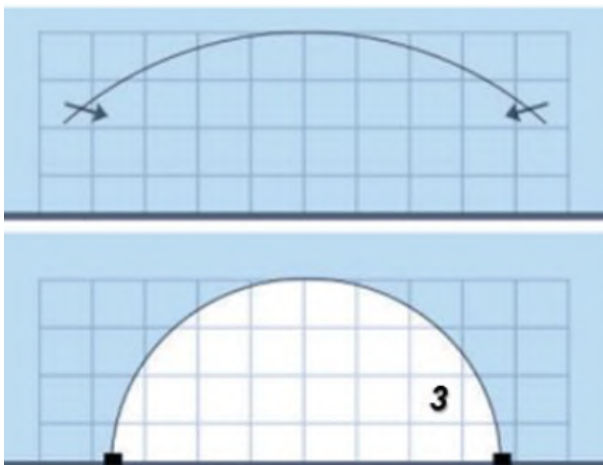
- **PULL UP** (puxar para cima): içamento por meio de guindastes (Figura 18); um exemplo de aplicação prática é o *Soliday's Festival Gridshell*.

Figura 18 - Curvatura *pull up*. Fonte: Adaptado de Fernandes, Kirkegaard e Branco (2016) *apud* I. Souza 2019.



- **EASE DOWN** (encurvamento facilitado): a estrutura é montada e a gravidade auxilia a chegar à forma final (Figura 19). Assim, tem-se como exemplo de uso o Pavilhão do Japão e Weald & Downland Centre Gridshell, nos quais foram construídos com andaimes apoiando toda estrutura, com deslocamento controlado das ripas.

Figura 19 - Encurvamento facilitado. Fonte: Adaptado de Fernandes, Kirkegaard e Branco (2016) *apud* I. Souza 2019.



- **PNEUMATIC FRAMEWORK** (estrutura pneumática): o encurvamento se dá pelo uso de uma membrana pneumática inflável; um

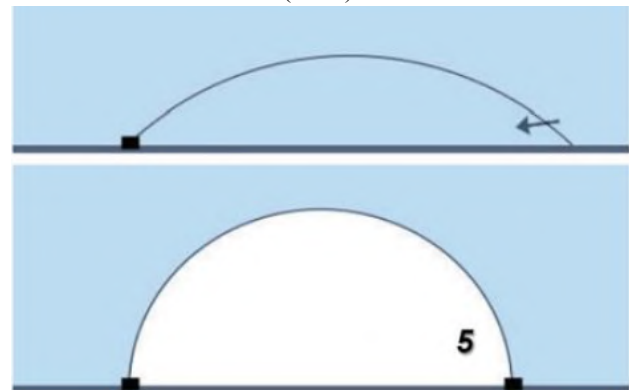
exemplo de uso é a estrutura *Airshell* que monitora o processo de enchimento por meio de um circuito em *Arduino* (Figura 20).

Figura 20 - Estrutura pneumática. Fonte: Adaptado de Fernandes, Kirkegaard e Branco (2016) *apud* I. Souza, 2019.



- **RECESSING / CONSTRAINING** (embutindo / restringindo): consiste na aplicação de uma força em um dos apoios, enquanto o outro apoio está sob restrição de deslocamento (Figura 21); foi utilizado na construção do *Moving Castle*.

Figura 21 - Curvatura restringindo. Fonte: Adaptado de Fernandes, Kirkegaard e Branco (2016) *apud* I. Souza (2019).



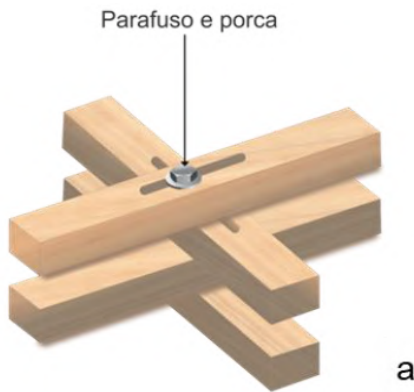
Próximo ao chão, para absorver as tensões de tração é preciso adotar contraventamentos para estabilizar a estrutura após o processo de curvatura (Freitas, 2016).

4.6 Tipos de juntas

Durante a construção do *Multihalle Mannheim*, era preciso para as ligações internas, juntas de nó com parafusos internos; os quais durante a montagem não eram tão apertados a fim de permitir o deslizamento;

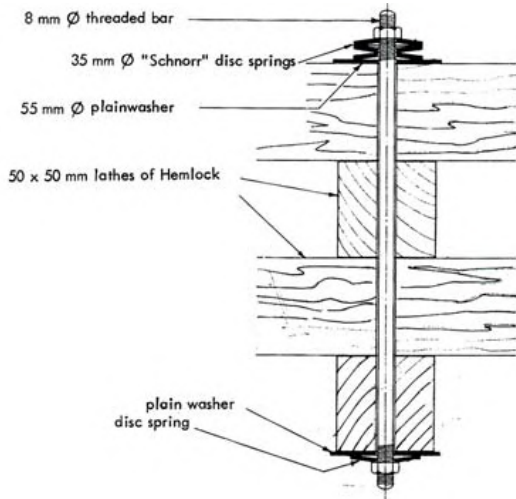
as duas camadas internas tinham furos e as duas externas tinham fenda (Freitas, 2016).

Figura 22 - Junta de nó com parafuso interno. Fonte: Adaptado de Naicu, Harris e Williams (2014) *apud* I. Souza, 2019.



Após a montagem, os parafusos são apertados para fornecer atrito suficiente. Segundo testes, foram usadas arruelas de pressão (Figura 23) para evitar a perda de tensão nos parafusos com o tempo, devido ao encolhimento da madeira (Kunz; Prauchner, 2015).

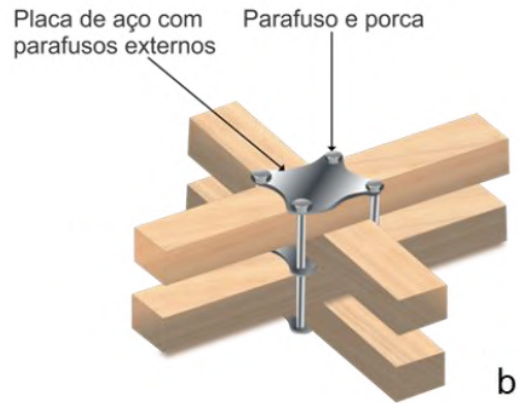
Figura 23 - Junta de nó com parafuso interno. Fonte: BURKHARDT et al, 1978 *apud* TOUSSAINT, 2007.



Na construção do *Downland*, foi desenvolvida a junta de nó com encaixe pela parte externa (figura 24). Essa junta é composta por três placas, conectadas com quatro parafusos. Dois dos quatro parafusos podem ser usados para fixar a diagonalização. As duas placas exteriores ficam livres para deslizar no sentido da curvatura (Kunz;

Prauchner, 2015). A placa entre ripas tem um pino no centro e tem a função de manter a posição da conexão.

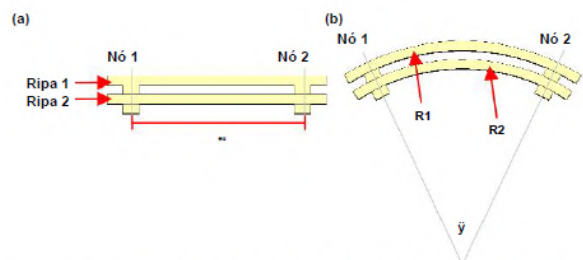
Figura 24 - Junta de nó com encaixe pela parte externa. Fonte: Adaptado de Naicu, Harris e Williams (2014) *apud* I. Souza, 2019.



Nesse contexto, Collins e Cosgrove (2016) explicam que a razão para permitir o deslizamento entre camadas é evitar o acúmulo de qualquer tensão indesejada nas ripas durante a conformação, permitindo a obtenção de curvaturas mais estreitas.

É sabido que os membros paralelos podem deslizar uns em relação aos outros durante o processo de formação, como mostra a figura 25; em consequência, a distância entre nós antes e depois da curvatura sofre alteração.

Figura 25 - Deslizamentos relativos antes e depois da deformação das camadas. Fonte: COLLIS E COSGROVE, 2016.



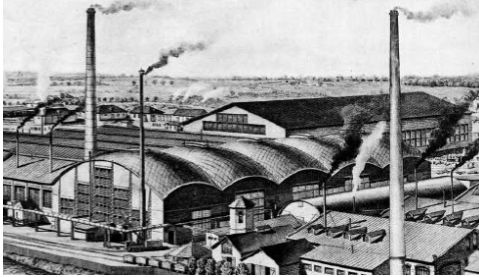
Assim, mantém-se os ângulo iguais; mas para o raio $R1 > R2$; assim como a distância (L) entre os nós 1 e 2 fica $L1 > L2$.

4.7 Estruturas existentes

Historicamente, a primeira construção em gridshell é de 1898, em aço, tratando-se de uma cobertura de pátio fabril indústria siderúrgica, *Vyksa Steel Production Hall* (Figuras 26 e 27), onde foram

aplicados algoritmos matemáticos e princípios observados na natureza, comparáveis aos métodos computacionais usados hoje (I. Souza, 2019).

Figura 26 - Vyksa Steel Production Hall. Fonte: BECKH BARTHEL (2009) *apud* I. SOUZA, 2019.



Esse projeto foi utilizado até 1980, devido ao mau estado de conservação da estrutura, tendo poucos pontos ainda cobertos na estrutura; sendo preciso estudos de aproveitamento e reparação da obra.

Figura 27 - Vyksa Steel Production Hall. Fonte: ARSENYEV (2011) *apud* I. SOUZA, 2019.



Por conseguinte, a primeira construção de *wood gridshell* foi na Europa, em 1975, o *Multihalle Mannheim* (Figuras 28 e 29), com formato de duas cúpulas principais conectadas com túneis; com extensão variando de 60 x 60 m e 40 x 40 m; e altura de 15,50m (Collins; Cosgrove, 2016).

Figura 28 - *Layout* do *Multihalle Mannheim*. Fonte: BURKHARDT et al, 1978 *apud* TOUSSAINT, 2007.

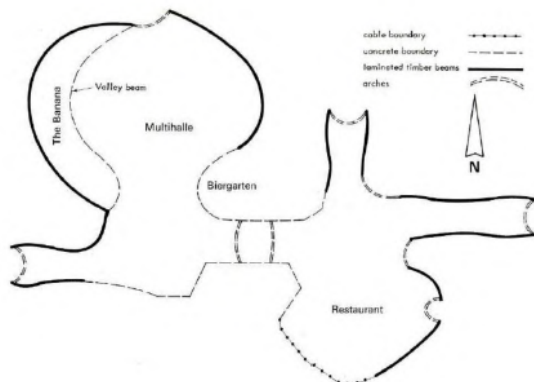


Figura 29 - *Multihalle Mannheim*. Fonte: <<https://link.ufms.br/3pR4p>>.



A obra foi feita por Frei Otto, por meio de modelos físicos; foi construída usando cicuta ocidental; cabos de aço para enrijecer a grade; juntas de dedos, bem como foi coberta com membrana na cobertura.

A construção do *Multihalle* ocorreu no chão e foi elevada com plataformas móveis, usando vigas espalhadoras para aplicar a força de conformação, conforme descrito no item 4.5. Nesse processo, muitas fraturas ocorreram durante o processo de curvatura; assim, peças laterais eram acrescentadas onde tinham essas rupturas.

Em 2002, foi feita a *Weald & Downland* com forma de ampulheta tripla; feito em carvalho verde (com alta taxa de umidade); com plano de 50m x 16m e altura variando de 7,35 a 9,50 m. As peças são de 50 mm x 35 mm x 1 m (Collins; Cosgrove, 2016); curvada pelo método *Ease Down*, conforme item 4.5.

Figura 30 - *Weald & Downland*. Fonte: TOUSSAINT (2007)



Uma curiosidade interessante, é que esse projeto foi feito utilizando métodos computacionais; um estudo para seleção de processamento de materiais; além do controle durante a curvatura; resultando na redução

dos casos de ruptura durante o processo de conformação.

Segundo Collins e Cosgrove (2016), a estrutura foi revestida com tábuas de cedro vermelho ocidental, vidros de policarbonato para permitir a entrada de luz e um telhado de fita feito de concreto polimérico flexível.

No Brasil, são poucos os exemplos de estruturas em *gridshell*, sendo o CASACOR *gridshell* a primeira construção (Figura 31), e realizado de maneira temporária. Posteriormente, foi doado para UNESP, onde foi usado para estudos com voluntários e modelagens de novas juntas metálicas e apoios (I. Souza, 2019).

Figura 31 - CASACOR *gridshell*. Fonte: Carlito Calil Neto (2015) *apud* I. SOUZA (2019).



4.8 Panorama do emprego da *wood gridshell*

Ao analisar a literatura, foi possível notar diferentes visões sobre o uso da *wood gridshell* em virtude dos modelos matemáticos, físicos ou computacionais empregados.

Por exemplo, Paoli (2007) ponderou que a criatividade e a engenharia tinham limitações, sejam elas financeiras, sejam de execução. Por conseguinte, expressou que as obras são fruto da disponibilidade e vontade daqueles que irão realizá-las.

Isso se deve que, na segunda metade do século XX, as primeiras construções em *gridshell* não dispunham de métodos computacionais para auxiliar no processo de dimensionamento estrutural; além do oneroso custo de obras, da dificuldade construtiva, bem como de escassez de mão de obra (técnica ou de execução prática); observada no estudo do *Multihalle Manheim*.

Dessarte, para ela, os primeiros projetos edificados, foram resultado da escolha arquitetônica e, mormente, das entidades responsáveis pelo financiamento.

Ademais, até 2010, uma dificuldade seria o vislumbre do uso de tecnologias em canteiro de obra; visto que, em contraste de hodiernamente, já são usados equipamentos eletrônicos *in loco*, como *tablets*, projetores, celulares, computadores etc., com auxílio de *softwares* que contém informações paramétricas da obra, sendo que muitos destes possibilitam a visualização do projeto por meio de modelos 3D; os quais podem ser visto tanto nesses aparelhos, como também via realidade aumentada projetada no canteiro de obras.

Nessa perspectiva, tem-se que o uso de tecnologias interativas e projetos *Building Information Modeling (BIM)*, associados aos modelos físicos correspondem ao método mais empregado na concepção e desenvolvimento das grelhas espaciais (Gawell, 2021; I. Souza, 2019; Toussaint, 2007).

Sendo os métodos computacionais usados de forma essencial ou complementar ao estudo das deformações da estrutura (des)carregada, em grande maioria dos trabalhos estudados no levantamento bibliográfico.

É oportuno salientar que nem sempre os métodos computacionais são necessários para modelar a malha (I. Souza, 2019); por exemplo, em casos de obras de estruturas pequenas, como o edifício *Pishwanton*; nas quais um modelo ou protótipo é o suficiente para avaliar o desempenho estrutural.

Analogamente, é sabido que o custo que uma obra dispense é particular, variando com o porte e cabe a análise econômica de todas as partes envolvidas desde o projeto até o fim da execução.

Dessa maneira, é oportuno destacar como possíveis temas de estudos futuros:

- Aproveitamento de água pluvial;
- Construção de *wood gridshell* com bambu ou madeira laminada;
- Uso de telhado verde como cobertura;
- Estudos sobre realidade aumentada em canteiro de obras de *wood gridshell*;
- Projetos englobando o conceito de arquitetura biofílica, outrossim, arquitetura biomimética.
- Estudos comparando diferentes desenho de malha;
- Investigações sobre como diferentes geometrias influem na necessidade de reforço ou alteração de tipo de juntas.

Dadas as assertivas, foi possível observar que embora não se tenham muitas estruturas construídas no mundo, há diversas possibilidades de aplicação, não só nos exemplos supracitados, como também em pontos de ônibus, pavilhões, anfiteatros, abrigos (J. Alves, 2021).

Logo, tendo a necessidade de concepção apropriada a mão de obra, materiais e levando em consideração a disponibilidade técnica local para realizá-la.

5 CONCLUSÕES

O uso da madeira na construção civil torna-se uma escolha natural, devido à sua capacidade de renovação e sustentabilidade; juntamente com suas propriedades heterogêneas e anisotrópicas, aliadas à capacidade de flexão ativa e realizar grades elásticas.

Desse modo, ficou patente que a busca por soluções naturais não é uma tendência, mas sim uma realidade desafiadora, como apresentado nessa revisão, que também mostrou que soluções biônicas auxiliaram a minimizar o arranjo estrutural do Vyksa Steel Production Hall.

Ao analisar a base literária, foi possível notar que existem autores voltados a analisar elementos específicos da estrutura, como o tipo de junta, escolha de materiais, maneira de reforçar as gridshells com cabos; como também há estudos de casos que visam explicar como são as características principais e desempenhos de obras já executadas.

Dada a premissa, foram contemplados a pergunta norteadora e o objetivo geral deste trabalho. Inobstante, ficou claro que as normativas e teorias podem variar bastante dependendo do estudo científico consultado; sendo notável o Eurocode como principal norma norteadora para o tema.

Quanto às hipóteses levantadas, foi possível validá-las em sua maioria. Contudo, conforme o item 4.8, a dificuldade construtiva é inerente ao porte da obra, disponibilidade técnica e de matéria-prima. Dessa forma, a falseabilidade das hipóteses é válida em casos de obras reduzidas, cujas análises estruturais e execução sejam menores.

Além disso, fora salientada a relevância da escolha geométrica para desempenho e capacidade de resistência de esforços atuantes; que está diretamente atrelada à modelagem da forma final; o aumento de rigidez, bem como possível minimização de reforços ou influência nas condições de contorno.

Face ao exposto, é indubitável que o uso de softwares será cada vez mais empregado nesses modelos estruturais; pois auxiliam a realizar alterações na superfície de maneira muito mais ágil e prática que os modelos físicos.

Somado a isso, constatou-se também que o *BIM*, a realidade aumentada e aparelhos tecnológicos usados *in loco* são alternativas que facilitam possíveis dificuldades na compreensão do projeto durante a execução da obra.

6 AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, primeiramente, à Deus; em segundo, a Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), pela oportunidade de realizar a graduação, pelo aprendizado e amadurecimento. Por conseguinte, agradecer muitíssimo a paciência e orientação da professora Christiane. Essencialmente, aos meus pais e minha irmã; igualmente aos meus amigos que me apoiaram, me incentivaram em todos os momentos e foram a minha família escolhida nessa jornada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, Eric Allonso Oliveira. **Análise da instabilidade de estruturas tipo Gridshell**. Orientador: Raul Rosas e Silva. 2019. 94 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-RIO, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <<https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/49498/49498.PDF>>. Acesso em: 11 jul. 2024.
- ALVES JUNIOR, Francisco Edinardo Barroso. **Estudo das conexões de gridshell através da modelagem paramétrica e aplicabilidade em espaços públicos de João Pessoa**: FELIPE TAVARES DA SILVA. 2021. 17 f. Relatório de Estágio Supervisionado I (Graduação em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa - PB, 2021. Disponível em: <<https://www.ct.ufpb.br/ccau/contents/documentos/estagio-supervisionado-i/acervo-virtual-estagio-supervisionado-i-2021.1/estudo-das-conexoes-de-gridshell-atraves-da-modelagem-parametrica-e-aplicabilidade-em-espacos-publicos-de-joao-pessoa.pdf/view>>. Acesso em: 11 jul. 2024.
- CAFFARELLO, Flavio M.; MASCIA, Nilson T.; BASAGLIA, Cilmar D. Análise estrutural de cobertura em gridshell de madeira considerando o efeito do vento. In: **XV EBRAMEM:**

- Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 11 maio 2015, Curitiba. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/303346905_ANALISE_ESTRUTURAL_DE_COBERTURA_EM_GRIDSHELL_DE_MADEIRA_CONSIDERANDO_O_EFEITO_DO_VENTO. Acesso em: 11 jul. 2024.
- COLLINS, M.; COSGROVE, T. A review of the state of the art of timber gridshell design and construction. **University of Limerick research repository**. p. 1-6, 1 jan. 2016. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/10344/5192>>. Acesso em: 11 de jul. de 2024.
- DRAGICEVIC, P. **Gaudís's hanging chain models. Barcelona, 2015**. Disponível em: <<http://dataphys.org/list/gaudis-hanging-chain-models/>>. Acesso em: 11 de jul. de 2024.
- FREITAS, Ulysses Martins de. **Análise, caracterização e adequação de um sistema de cobertura do tipo gridshell para o Campus da UNESP/Itapeva**. 2016. Trabalho de conclusão de curso (bacharelado - Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Campus Experimental de Itapeva, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/items/9653e1e5-899e-4380-90ca-ee42e530c0f4>>. Acesso em: 11 jul. 2024.
- GAWELL, Ewelina. Optimal design of wooden pavilion gridshell structures in the context of architectural and structural collaboration. In: **CAADRIA**, v. 1, The Chinese University of Hong Kong and Online, 1 jan. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.52842/conf.caadria.2021.1.473>>. Acesso em: 11 jul. 2024.
- KUNZ, M.; PRAUCHNER, M. B. Uso do Sistema Estrutural Gridshell na Criação de Formas Complexas em Estruturas de Madeira. **Revista de Arquitetura IMED**, v. 4, n. 1, p. 19–25, 30 jun. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.18256/2318-1109/arqimed.v4n1p19-25>>. Acesso em: 11 jul. 2024.
- MATOS, Elisa Bomtempo; MARTINEZ, Andressa Carmo Pena. Gridshell structural evaluation criteria based on Upward and Downward Modeling Methods in Karamba3D. **Blucher Design Proceedings**, v. 8, n. 4, p. 9, 1 dez. 2020. Disponível em: <[10.5151/sigradi2020-26](https://doi.org/10.5151/sigradi2020-26)>. Acesso em: 11 jul. 2024.
- MESNIL, Romain; BAVEREL, Olivier. Pseudo-geodesic gridshells. **Engineering Structures**, v. 279, p. 115-558, 1 mar. 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115558>>. Acesso em: 11 jul. 2024.
- MESNIL, R.; BAVEREL, O.; DU PONT, L. Linear buckling of quadrangular and kagome gridshells: A comparative assessment. **Engineering Structures**, v. 132, p. 337–348, fev. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.11.039>>. Acesso em: 11 jul. 2024.
- PAOLI, CÉLINE. **Past and Future of Grid Shell Structures**. 2007. 63 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) - Massachusetts Institute of Technology - MIT, Cambridge, 2007. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1721.1/39277>>. Acesso em: 11 jul. 2024.
- SOUZA, Isabela Cavalcanti de. **Processo construtivo de estrutura gridshell pós-formada com uso de pinus**. Orientador: Edna Moura Pinto. 2019. 176 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/27675>>. Acesso em: 11 jul. 2024.
- SOUZA, Vanessa Carolina de. Centro Pompidou-Metz e o uso do Gridshell como estrutura. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 8, p. 58352–58365, 22 ago. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.34117/bjdv8n8-227>>. Acesso em: 11 de jul. de 2024.
- TOUSSAINT, M. **A design tool for timber gridshells**. 2020. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Delft University of Technology, Delft, 2020. Disponível em: <<https://repositorio.tudelft.nl/record/uuid:883da6d1-8f61-47db-afb8-099aa2ab536c>>. Acesso em: 11 jul. 2024.
- WANG, G. *et al.* Analysis of factors affecting the stability of large-span cable-braced timber gridshells. **Developments in the built environment**, v. 17, p. 100–360, 1 fev. 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100360>>. Acesso em: 11 jul. 2024.