

FORMA, ESTRUTURA E PROCESSO CONSTRUTIVO NAS OBRAS EM GRIDSHELL NA ARQUITETURA CONTEMPORÂNEA

Ricardo Bianco de Abreu (IC) e Célia Regina Moretti Meirelles (Orientadora).

Apoio: PIBIC Mackpesquisa

RESUMO

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento das estruturas em *gridshell* de flexão ativa e inativa na arquitetura contemporânea, seu processo construtivo, a forma, a estrutura e como o processo pode ser considerado sustentável. A relevância do trabalho se dá ao mostrar como sistemas curvos podem ser sustentáveis, na comparação das obras estudadas e na distinção das duas principais tipologias de *gridshell*. O método desta pesquisa foi realizado em cinco etapas, que abrangeram a revisão da literatura, estudos de caso, experimentação, modelagem digital e a análise das duas obras estudadas com base no material coletado e nos modelos produzidos. Concluiu-se que *gridshells* em madeira são consideradas sustentáveis por possuírem formas curvas com eficiência estrutural gerando economia de materiais não renováveis. As diferenças entre as duas tipologias de *gridshell* são evidenciadas desde sua forma geral até o detalhe estrutural: estruturas em *gridshell* de flexão ativa são mais simples em sua concepção e montagem, porém possuem um gasto maior em conexões metálicas e mais tempo em canteiro, ao passo que estruturas de flexão inativa possuem maior dificuldade em sua concepção e necessitam da modelagem paramétrica e algorítmica, utilizando programas como o *Rhinoceros* e o *Grasshopper* para tal fim, materiais industrializados e mão de obra qualificada em sua realização também são requeridos, porém como suas peças são pré-fabricadas o tempo de montagem é reduzido.

Palavras-chave: *Gridshells*. Estruturas leves. Formas curvas

ABSTRACT

The aim of this work is to analyze the behavior of active and inactive flexion gridshell structures in contemporary architecture, its construction process, shape, structure and how the process can be considered sustainable, investigating how the active flexion gridshell shapes and inactive, interfere in the assembly process. The relevance of the work lies in showing how curved systems can be sustainable, in comparing the works studied and in distinguishing the two main types of gridshell. The method of this research was carried out in five stages, which included the literature review, case studies, experimentation, digital modeling and the analysis of the two works studied based on the collected material and the models produced. It was

concluded that wooden gridshells are considered sustainable because they have curved shapes with structural efficiency, generating savings in non-renewable materials. The differences between the two gridshell typologies are evidenced from their general shape to the structural detail: active flexion gridshell structures are simpler in their conception and assembly, but they spend more on metallic connections and more time on site, while that inactive flexion structures have greater difficulty in their design and require parametric and algorithmic modeling, using programs such as Rhinoceros and Grasshopper for this purpose, industrialized materials and skilled labor in their realization are also required, but as their parts are pre-manufactured, assembly time is reduced.

Keywords: Gridshells. Light Structure. Curved shapes

1. INTRODUÇÃO

Um dos temas mais relevantes da última década é a construção sustentável, diversas tecnologias foram resgatadas, criadas, adaptadas e melhoradas para atender a essa demanda. Neste sentido a construção civil deve diminuir o impacto ambiental, racionalizando materiais e maximizando as suas propriedades, diminuindo os custos da obra.

O sistema em *gridshell* não é técnica recente, pois o primeiro exemplar foi projetado pelo russo Vladimir Shukhov em 1897, executada em aço. O sistema somente seria construído em madeira oitenta anos depois, em uma grande cobertura curva, projetada por Frei Otto e calculada por Ove Arup nos meados dos anos 70. Atualmente os edifícios em *gridshell* voltam a ter interesse acadêmico em especial na arquitetura, pois apresenta qualidades como, formas ousadas, eficiência estrutural, são mais esbeltas criando grandes vãos (ARSENYEV, 2011).

O interesse no *Gridshell* em madeira é recente, devido à possibilidade de formas curvas não convencionais, a estabilidade da forma, a montagem a partir de pequenas peças e tramas. São obras muito leves e finas, de grande eficiência estrutural comparada com cascas de ovo. (WATT,1998).

A madeira perdeu muito espaço na engenharia civil no último século, seu potencial estrutural foi desprezado pois foi aplicada em elementos secundários, telhados, pisos e formas para concreto. Em 1992, a Agenda 21 declarou a importância da construção civil aplicar materiais renováveis, devido à incorporação de CO₂. Outro aspecto é a sua alta resistência paralela à fibra e a facilidade de produção, chamada de madeira engenheirada, como Madeira laminada colada MLC (vigas, pilares, arcos) e os painéis estruturais em CLT (Madeira laminada cruzada).

Segundo Collins e Cosgrove (2016) os processos construtivos em *gridshell* podem ser classificados em estruturas de flexão ativa e flexão inativa. As estruturas de flexão ativa são construídas no plano e são deformadas para dar formato a peça, flexionando seus elementos. Já as de flexão inativa, onde suas peças não são flexionadas para chegarem ao formato final.

Na Europa e Ásia foram executadas várias obras em *gridshells* entre estas pode-se destacar o *Mannheim-Multihalle* (Mannheim) projeto dos arquitetos Frei Otto, Carlfried Mutschler e Joachim Langner, como uma estrutura de flexão ativa. E a cobertura do *Nine Bridges Country Club* (Yeoju-Gun) projeto do arquiteto Shigeru Ban como uma estrutura de flexão inativa e construída em MLC. No Brasil, este processo foi aplicado em um pequeno número de edificações, destaca-se, a CASACOR *Gridshell*, executada durante a CASACOR SP de 2015. Esta foi calculada pelo renomado professor Carlito Calil Neto, como uma estrutura de flexão ativa aplicando o conceito das tramas italianas em madeira serrada. Outro

exemplo relevante foi o *Gridshell* Bambu Carbon Zero, projetada e desenvolvida pelas empresas Bambu Carbono Zero e Geral e calculada pelo engenheiro Alan Dias como uma estrutura de flexão ativa, aplicando na estrutura principal o bambu, ligações de aço e madeira (SOUZA, 2019).

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento das estruturas em *gridshell* de flexão ativa e inativa na arquitetura contemporânea, seu processo construtivo, a forma, a estrutura e como o processo pode ser considerado sustentável, investigando como as formas do *gridshell*, de flexão ativa e não ativa, interferem no processo de montagem.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

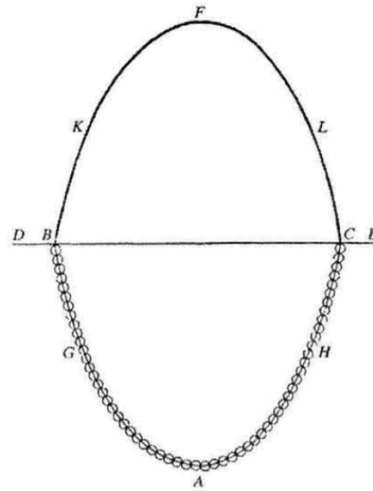
Na busca de estruturas eficientes ao longo da história vários mestres trabalharam com conceito das formas curvas como Antoni Gaudí, Pier Luigi Nervi, Félix Candela, Frei Otto e Heinz Isler. Meirelles, Kishi (2013) observam que devido à dificuldade do cálculo estrutural da época cada um destes arquitetos buscou técnicas construtivas distintas a resposta mais eficiente dos materiais locais.

Meirelles; Kishi (2013) observam que a eficiência estrutural é majorada pelo aumento do número de curvatura da forma, este fator diminui nas formas retas como nas vigas do Modernismo. Portanto, as formas curvas permitem elementos mais esbeltos. Entre as estruturas de simples curvatura estão os infinitos tipos de arcos, as abobadas catenárias ou parabólicas. Já entre as formas de dupla curvatura estão os clássicos paraboloides elípticos, as cúpulas, os paraboloides hiperbólicos e hiperboloides de rotação.

Os trabalhos de Gaudí situam-se entre os anos 1878 e 1926 executando inúmeras obras. Em 1961, Heinz Isler observou que a “estrutura em forma de concha” apresenta uma “capacidade própria” definida pela forma de dupla curvatura além de “expressar a beleza estrutural”. Ele estudou o potencial das estruturas em parabolóide elíptico (KOTNIK, SCHWATZ, 2011).

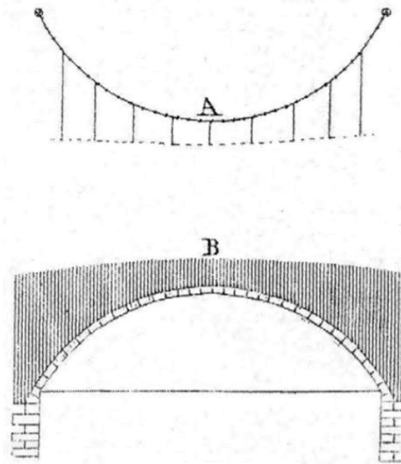
Huerta (2006) destaca que este método foi desenvolvido no século XVII por Robert Hook ao propor a solução do problema de um arco ideal. Hook observou que a forma se modificava ao pendurar o carregamento e a mesma “invertida definia arcos em compressão” (HOOK 1675 apud HUERTA, 2006, tradução própria). O carregamento uniforme ao longo do fio define os arcos em catenária, e carregamentos com distâncias igualmente espaçadas na horizontal define os arcos parabólicos como observa-se nas figuras 1 e 2.

Figura 1: Analogia de Hook sobre fios pendurados e arcos.



Fonte: desenho de Poleni, 1748

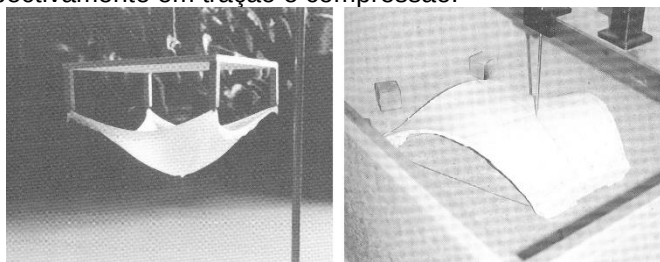
Figura 2: Projeto de ponte usando modelo pendurado.



Fonte: Young, 1807.

Muitos pesquisadores consideram Gaudí e Heinz Isler como os principais construtores e desenvolvedores do processo *“form finding”*. Este conceito pode ser definido como uma maneira de encontrar as formas de suas estruturas por meio de modelos pendurados. Gaudí estudava os modelos funiculares, como é o caso dos arcos da Sagrada Família, em Barcelona; sua arquitetura é caracterizada pelos elementos em formato de catenária. Já Heinz Isler encontrava as formas de suas estruturas por meio de modelos pendurados, como fazia Gaudí, porém ao invés de utilizar um fio, ele aplicava lonas finas, conseguindo formas com o formato de “conchas”, que se estendiam nos dois sentidos do plano cartesiano e eram deformadas pelo efeito da gravidade, atingindo assim seu formato final tracionado. Após esse processo bastava copiar o mesmo modelo com algum material com resistência a compressão e invertê-lo, fazendo com que a estrutura estivesse puramente comprimida (KOTNIK, SCHWATZ, 2011). Ver figura 3.

Figura 3: modelos respectivamente em tração e compressão.



Fonte: Isler; Heinz, parametric semiology

Em relação as estruturas de dupla curvatura Shigeru Ban destaca “creio que para construir um edifício estável não é necessário usar um material resistente. A solidez de um edifício não tem nada que ver com a resistência do material, mas com a forma curva” (SHIGERU BAN, 2015, p.1, Tradução própria).

Como diz o arquiteto Shigeru Ban no texto acima, para criar construções estáveis não é necessário a obra possuir materiais de alta resistência, pois é possível atingir a solidez desejada de uma obra com materiais leves, de baixa resistência, que ao serem colocados juntos definem uma inércia estrutural a obra. As *Gridshells* se relacionam muito bem a essa ideia, pois são formadas de materiais que possuem sozinhos pouca resistência estrutural, que ao serem ligados a outras peças, esses materiais se tornam parte de um sistema de travamento e no caso das *gridshells* flexionadas, o material ganha uma resistência extra com o seu flexionamento. (SHIGERU BAN, 2015).

Materiais leves tornam a obra mais eficiente, pois possuem baixo custo e o transporte se dá de maneira mais rápida e segura. Pode-se dizer também que são comumente elementos sustentáveis, como exemplo a madeira. Como estruturas que usam esse tipo de elemento precisam ser muito bem pensadas, acaba havendo pouco desperdício de material, se comparado a uma obra feita em alvenaria, o aproveitamento é muito alto. Como o elemento por si só não tem capacidade de suportar cargas muito pesadas, o projetista precisa surgir com ideias criativas para conferir os travamentos necessários para uma estrutura assim se sustentar, o que garante formas e desenhos complexos e interessantes, que acrescentam valor na sociedade e no local onde tal construção for instalada.

A madeira é um ótimo elemento a ser usado na confecção de uma *gridshell* por ter um peso próprio entre 70 N/m² e 20 N/m² que confere leveza a estrutura e sustentabilidade. (MESNIL, 2013) (KUNS; PRAUCHNER, 2015). Ainda porque possui um peso específico baixo, em média 6 KN/ m³ quando comparada com materiais como concreto que pesa 24 KN/m³ ou o aço 78 KN/m³.

Segundo Collins e Cosgrove (2016), *gridshells* pode ter várias formas, porém elas apresentam características semelhantes, o autor agrupa em dois principais grupos: *gridshells* com estruturas de flexão ativa, que no princípio são distribuídas em apenas duas dimensões,

e que posteriormente é aplicado uma força sobre a estrutura, conferindo o formato final e estabilidade na obra, flexionando seus elementos estruturais, também chamada de *gridshell* pós-formada. Ver figura 4

Figura 4: Gridshell pós-formada.



Fonte: laben ufrn

Outras formas de estruturar um gridshell são as estruturas inativas, que não são flexionadas para chegar a seu formato final, essas estruturas possuem peças pré-fabricadas que já definem suas características finais, e que frequentemente são montadas com encaixes, também chamadas de pré-formadas. Ver figura 5.

Figura 5: Swatch and Omega Campus.



Fonte: Archdaily

Estruturas em gridshell são complexas de serem calculadas e projetadas, pois não possuem elementos retos e são compostas em sua maioria por sistemas não ortogonais. Com o advento da tecnologia, programas de modelagem virtual como o *Rhinoceros* e o *Grasshopper* são uma solução para tal problema. Muitos arquitetos atualmente utilizam estes programas para simular os efeitos da gravidade em um plano, como fazia Hook, Gaudí e Heinz

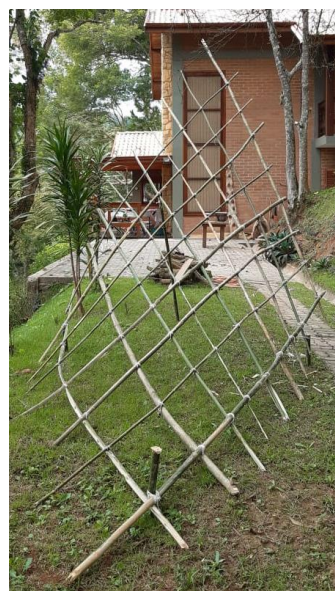
Isler com seus modelos pendurados, no que é chamado de “*form finding*”. Tendo a forma geral é possível detalhar todo o modelo, até a escala dos nós, estabelecendo parâmetros que podem ser futuramente alterados sem a necessidade de redesenhar o projeto. As gridshell de flexão inativa dependem deste tipo de modelagem, pois a maioria de suas peças apresentam diferentes dimensões e são cortadas por uma máquina de precisão numérica, a perfeição neste tipo de estrutura é essencial para que sua montagem seja possível. (HOLZER,2007).

Para poder compreender melhor o comportamento de estruturas em *gridshell* de flexão ativa, foi elaborado, pelo autor desse trabalho de iniciação científica um protótipo, em escala diminuta e posteriormente em escala 1:1. Ver figuras 6.A, 6.B, 6.C, 6.D. O protótipo foi desenvolvido e montado na cidade de Santo Antônio do Pinhal -SP, abril, 2020.

Figura 6.A: Modelo escala reduzida



6.B: gridshell escala 1:1



6.C: Detalhe construtivo



6.D: gridshell escala 1:1



(Fonte do autor)

Interessante notar no experimento realizado como as forças externas são importantes para que a estrutura atinja sua forma final. “A forma final da estrutura é obtida através da deformação elástica de uma grelha plana de elementos” (CARVALHO, 2015). Diferente das estruturas *gridshell* de flexão inativa, onde grandes deformações não são desejadas, pois podem comprometer sua montagem e estabilidade.

3. METODOLOGIA

A primeira etapa da metodologia foi a revisão da literatura, como previsto no projeto de pesquisa, sobre as características da *gridshell*, seu comportamento estrutural, *gridshells* de flexão ativa e inativa, com base em autores relevantes.

Na segunda etapa foram realizados dois estudos de caso, o *Mannheim-Multihalle* (Mannheim) projeto dos arquitetos Frei Otto, Carlfried Mutschler e Joachim Langner (flexão ativa) e o *Nine Bridges Country Club* (Yeoju-Gun) projeto do arquiteto Shigeru Ban (flexão inativa).

A terceira etapa foi composta por duas partes, uma anterior a pesquisa, onde uma *gridshell* de bamboo foi feita em escala 1:1, e outra prevista durante a pesquisa, onde quatro modelos físicos foram confeccionados: uma maquete e um detalhe construtivo de cada obra estudada.

A quarta etapa foi realizada em conjunto com a terceira, onde uma maquete digital de cada obra estudada foi modelada no programa *Rhinoceros*, o que facilitou a compreensão da forma das *gridshells*.

A quinta etapa foi composta pela análise das duas obras estudadas, com base em todo o material coletado e nos modelos produzidos.

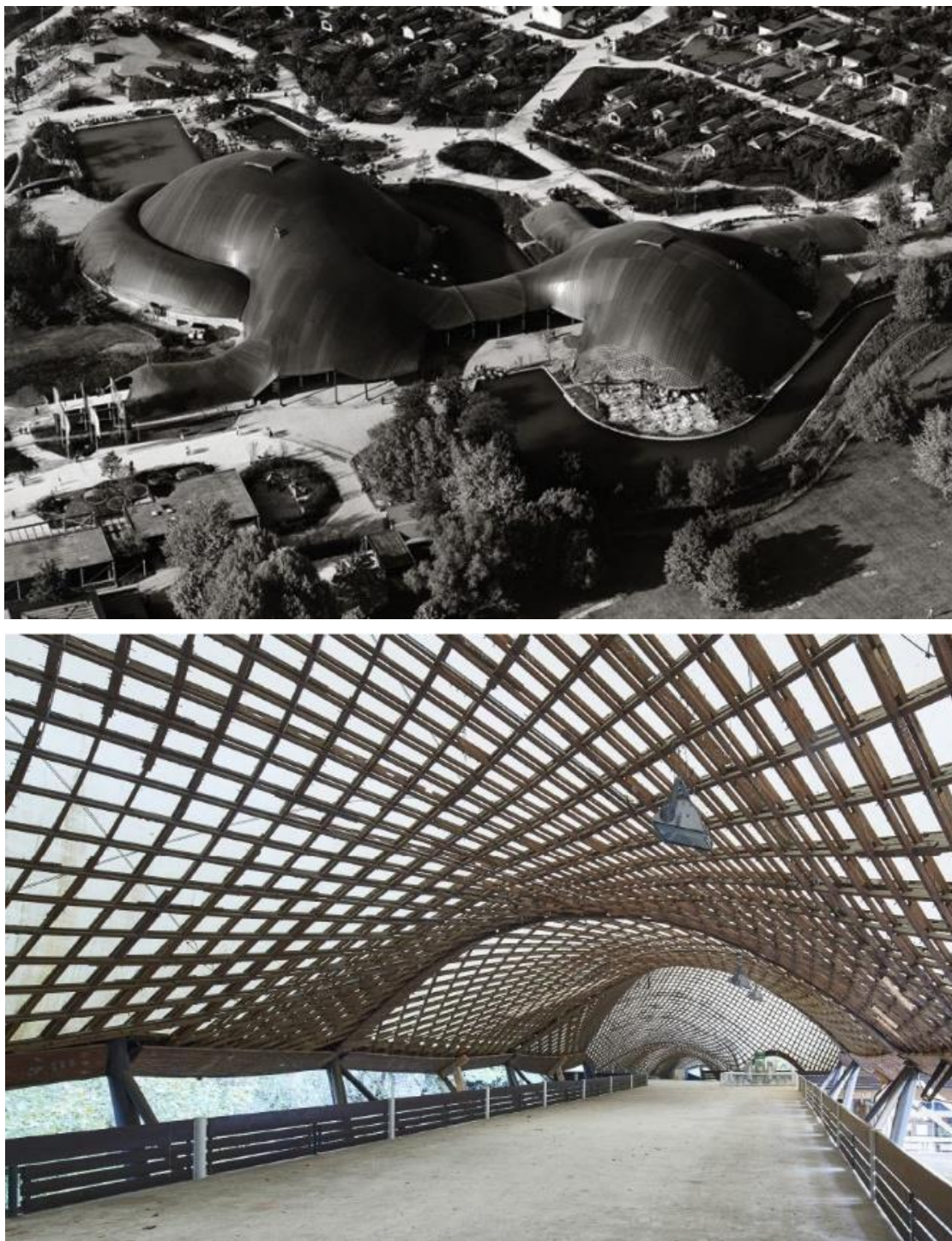
4. RESULTADO E DISCUSSÃO

Nesta etapa do trabalho foram realizados dois estudos de caso, as obras foram escolhidas de forma que atendessem a proposta da pesquisa: evidenciar as diferenças entre estruturas de flexão ativa e estruturas de flexão inativa.

A primeira obra escolhida foi o *Mannheim-Multihalle* (Mannheim) projeto dos arquitetos Frei Otto, Carlfried Mutschler e Joachim Langner, de flexão ativa. O *Multihalle* foi construído para o Salão Federal de Horticultura de 1975 no *Herzogenriedpark* de *Manheim*. Ele é um salão multifuncional sendo a maior *gridshell* de madeira de forma livre do mundo. O edifício é composto por um salão de eventos, uma área extensa com passagens, várias instalações

operacionais e um restaurante. O interior é iluminado de maneira uniforme por conta de seu revestimento translúcido. A comprovação de estabilidade da estrutura foi feita pela Ove Arup & Partners de Londres. (SANTIFALLER, 2021). Ver figuras 7.

Figura 7: Vista aérea e vista interna respectivamente.



Fonte: Mannheim-Multihalle

O segundo estudo de caso selecionado foi o *Nine Bridges Country Club* (Yeoju-Gun) projeto do arquiteto Shigeru Ban de flexão inativa (2009). Construído para ser uma casa de

club e um campo de golfe, o complexo conta com três edifícios: a casa de club, a área *VIP* e as acomodações para membros *VIP*. Cada uma das edificações utiliza um sistema construtivo diverso, criando uma releitura moderna de métodos tradicionais coreanos, a cobertura do edifício principal é formada por uma *gridshell*, a área para membros *VIP* foi construída em concreto armado e as acomodações em estrutura metálica. O átrio é transparente e aberto e funciona como salão de festas, recepção e lounge para os membros. A área mais privativa deste edifício possui programas mais privados como o *spa*, serviços e vestiários. A *gridshell* foi concebida pelo arquiteto Shigeru Ban, foi modelada digitalmente na Alemanha, pré-fabricada na Suíça pela *Krusi* e enviada para a Coreia de navio antes de ser montada. (BREDA,2013). Ver figura 8.

Figura 8: *Gridshell* e vista externa respectivamente.



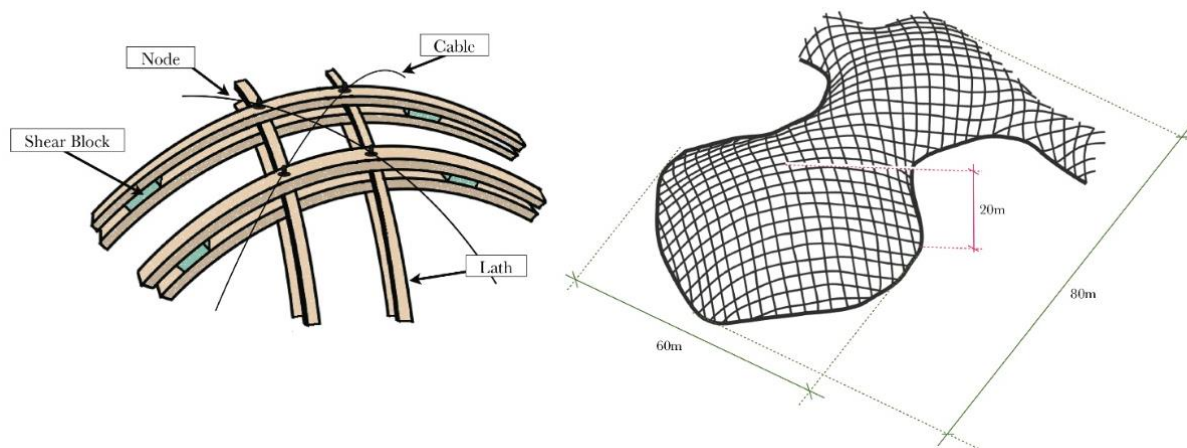


Fonte: Archdaily

4.1 Mannheim-Multihalle

A *gridshell* do Mannheim-Multihalle possui 160m de comprimento, 115m de largura e 20m de altura, como mostrado na figura 9. Foi feita com ripas de madeira de pinho ou cicuta de 5cm/5cm, dispostas transversalmente em duas ou quatro ripas numa distância de 50/50cm, resultando em uma área de telhado de 9.500m². Para sua construção foram necessários 34.000 parafusos e 144.000 furos, 7.150m de cabos. Na cobertura foi utilizado o tecido *Trevira*, enegrecido, revestido com PVC, que apresentou vazamentos e foi substituído por uma lona branca em 1981. (SANTIFALLER, 2021).

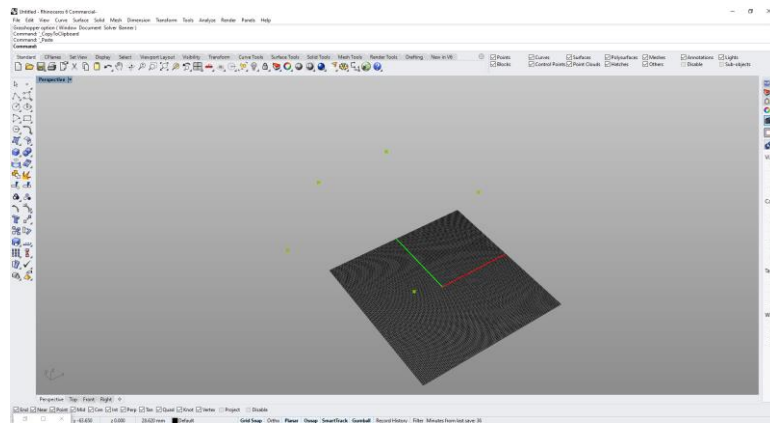
Figura 9: Mannheim-Multihalle: detalhe e vista geral respectivamente.



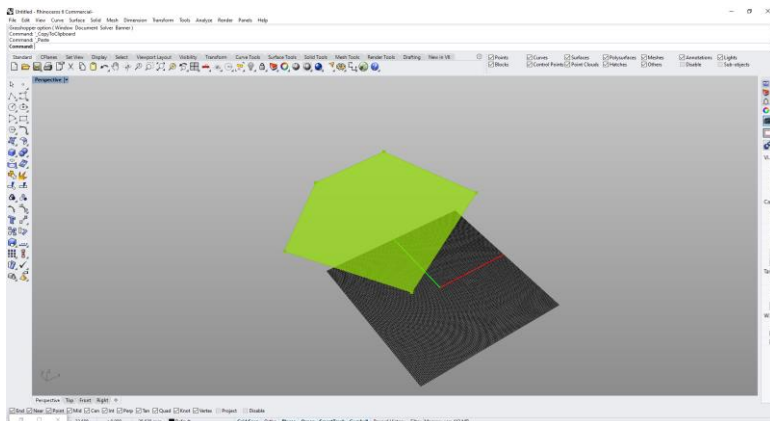
Fonte: Princetown

Para um estudo mais aprofundado, um modelo virtual foi produzido utilizando o princípio do *form-finding*, onde se aplicam cargas específicas em um plano com o intuito de deformá-lo para que este atinja a sua forma final. Para este fim foi utilizado o plugin *kangaroo2* que faz simulações físicas dentro do programa *Grasshopper* do *Rhinoceros*, a modelagem foi feita criando pontos âncora ligando eles a uma superfície que depois foi sujeitada a cargas iguais em seus nós, os pontos âncora servem para que a trama tenha pontos de apoio para se deformar. Nas imagens abaixo será possível visualizar o processo. Embora a forma resultante não condiz com a *gridshell* do *Mannheim-Multihalle*, a sua base de modelagem é a mesma. A capacidade estrutural da *gridshell* poderia ser simulada dentro do *Rhinoceros*, o que facilita na produção e no cálculo de uma estrutura como esta. Ver figuras 10.A, 10.B, 10.C, 10.D e 10.E.

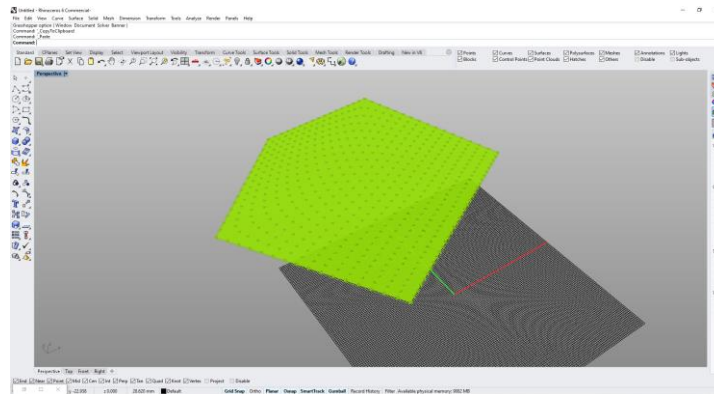
Figura 10.A: Criação de pontos âncora.



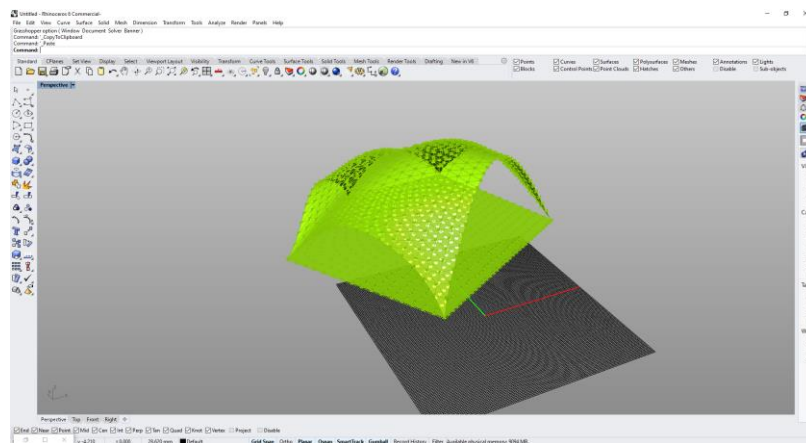
10.B: Criação de superfície.



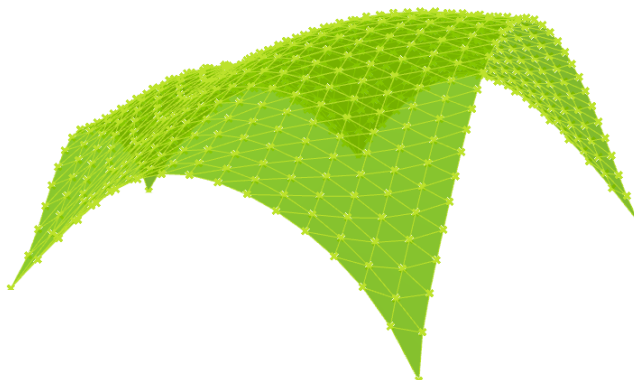
10.C: Criação da trama.



10.D: Aplicação das cargas: deformação da trama.



10.E: Resultado.



(Fonte do autor)

4.1.1 Modelo físico global do *Mannheim-Multihalle*.

O modelo físico do *Mannheim-Multihalle* foi realizado utilizando o princípio do *form finding*, ou seja, aplicando cola sobre um pano molhado e deixando o modelo suspenso até a secagem da cola, resultando em um formato funicular curvo. Ver figuras 11.A, 11.B, 11.C, 11.D.

Figura 11.A: modelo suspenso



11.B: modelo seco



11.C: modelo pronto



11.D: modelo pronto



(Fonte do autor)

O modelo não atingiu sua forma perfeita, isso porque o pano utilizado não possuía a maleabilidade necessária para estar puramente em tração ao ser suspenso, numa futura pesquisa seria recomendado testar o material anteriormente para um resultado perfeito.

4.1.2 Detalhe do *Mannheim-Multihalle*

O modelo do detalhe da gridshell do *Mannheim-Multihalle* foi feito em escala reduzida, um serrote manual foi utilizado para o corte das peças e uma furadeira para a confecção dos furos onde são articulados os nós. As peças planas são barras compostas em sanduíche, unidas por um parafuso articulado. A grelha estrutural parte de um modulo quadrado, este conjunto definido pelo modulo quadrado articulado não apresenta uma boa estabilidade geral, o detalhe da figura 12.A mostra esta característica da sua estrutura global, pois sem os contraventamentos a peça tende a rotacionar. Esta rotação foi solucionada utilizando cabos de aço ligados nos conectores metálicos, assim a estrutura foi travada por meio da criação de triângulos. Além da estabilidade da forma foi possível compreender que a forma curva seria atingida ao flexionar o sistema. Ver figuras 12.A, 12.B, 12.C.

Figuras 12.A, 12.B e 12.C respectivamente: detalhe construtivo sem travamento, estrutura rotacional, estrutura com contraventamentos: travada.

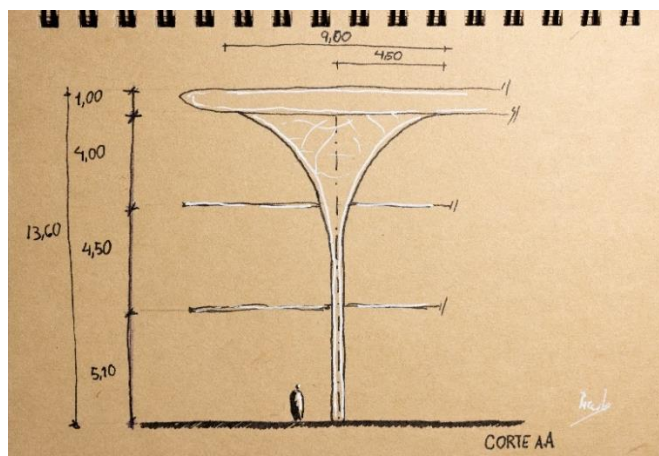


(Fonte do Autor)

4.2 *Nine Bridges Country Club*

A *gridshell* do *Nine Bridges Country Club* possui 63m de comprimento, 27m de largura e 13,60m de altura, sendo que é composta por 21 pontos de apoio, que medem 9m de comprimento, 9m de largura e 13,60m de altura, ver figura 13. (BREDA,2013)

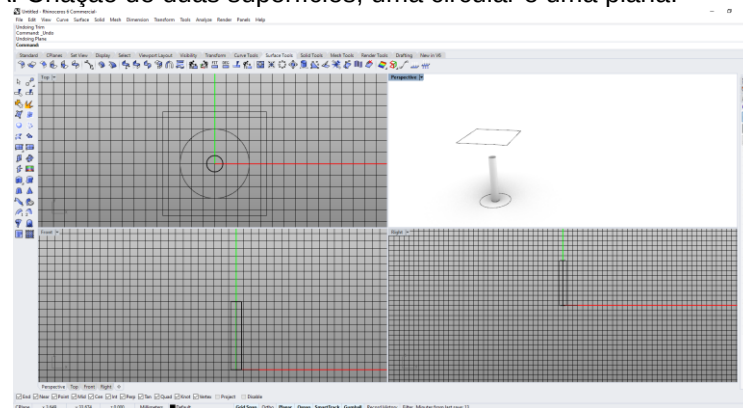
Figura 13: croqui “Pilar” do *Nine Bridges Country Club*.



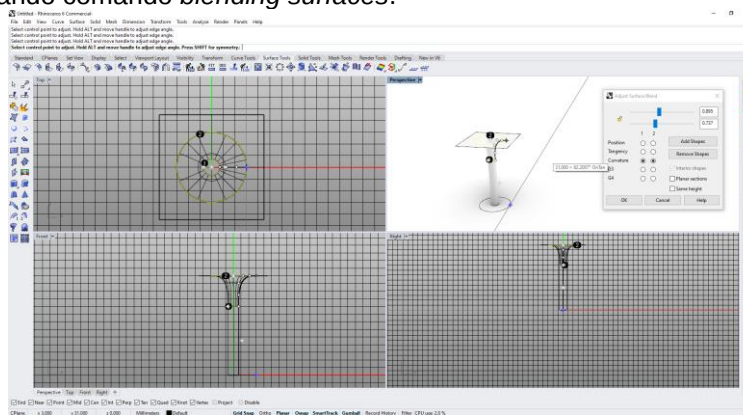
(Fonte do autor)

A trama do *NineBridges* foi modelada utilizando a projeção de uma trama e uma superfície. (LOMOS, 2021). Ver figuras 14.A, 14.B, 14.C e 14.D.

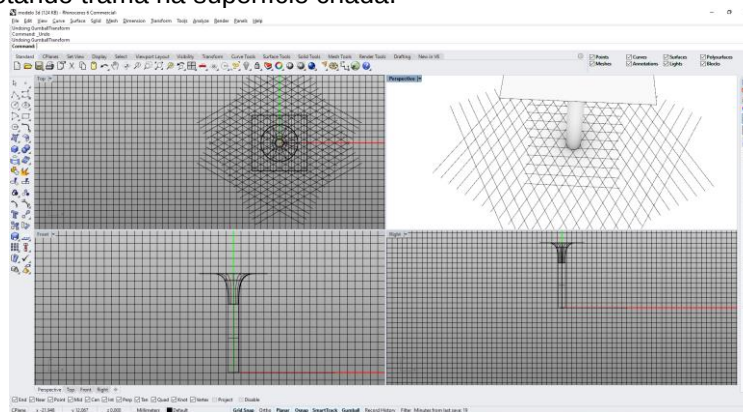
Figura 14.A: Criação de duas superfícies, uma circular e uma plana.



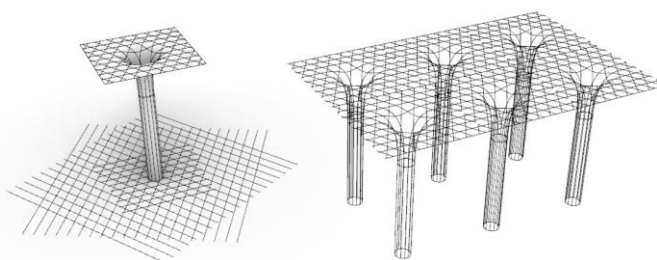
14.B: utilizando comando *blending surfaces*.



14.C: Projetando trama na superfície criada.



14.D: Resultado.

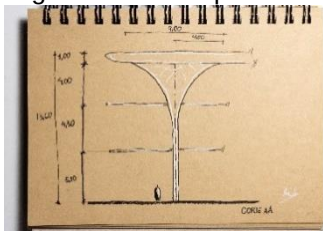


(Fonte do autor)

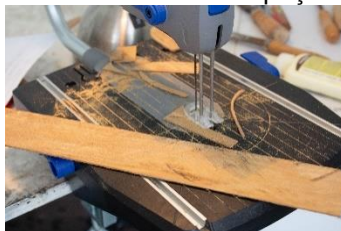
4.2.1 Modelo físico global do *Nine Bridges Country Club*.

O modelo do *Nine Bridges Country Club* foi realizado com madeira serrada, colocando em prática sua forma de flexão inativa, a montagem da maquete provou ser complexa, pela dificuldade de criar formas curvas utilizando peças sólidas. Ver figuras 15.A, 15.B, 15.C, 15.D, 15.E, 15.F, 15.G, 15.H.

Figura 15.A: Croqui da maquete



15.B: corte das peças



15.C: Peças cortadas



15.D: montagem dos pilares



15.E: maquete finalizada



15.F: maquete finalizada



15.E: maquete finalizada



15.E: maquete finalizada



(Fonte do autor)

4.2.2 Detalhe do *Nine Bridges Country Club*.

O detalhe do *nine bridges country club* foi complexo de ser realizado por não possuir conexões metálicas, é todo feito em encaixes. As peças e os nós foram cortados com um serrote manual, os entalhes foram feitos utilizando um formão de carpinteiro para escavar a madeira e uma lima manual para dar o acabamento. Para entender a sequência de montagem ver figuras 16.A, 16.B, 16.C, 16.D, 16.F.

Figura 16.A: primeira peça 16.B: Encaixe da segunda peça 16.C: Encaixe da terceira peça



16.D: Encaixe da quarta peça

16.E: Encaixe da quinta peça



(Fonte do autor)

4.3 Comparação

Com a confecção dos modelos físicos foi notado que embora a estrutura *Mannheim-Multihalle* fosse mais simples de ser projetada e fabricada, seu gasto em conexões metálicas é notável e o tempo de construção no canteiro é maior do que a estrutura *gridshell* do *Nine Bridges Country Club*, onde não há presença de conexões metálicas nos nós, porém sua geometria é muito mais complexa o que dificulta notavelmente sua fabricação.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estruturas em *gridshell* de madeira se classificam em dois principais tipos: de flexão ativa e de flexão inativa. Este trabalho buscou analisar seu comportamento, processo construtivo, a forma, a estrutura e como o processo pode ser considerado sustentável.

É notável a economia de material em ambas as estruturas, as formas curvas são mais eficientes. Por possuir a superfície em grelha e não contínua ela fica mais econômica, diminui assim consideravelmente o gasto de materiais, *gridshells* são formas mais leves que cascas em concreto armado. Outro aspecto é que a madeira é um material sustentável por ser renovável e por incorporar CO₂.

Estruturas em *gridshell* de flexão ativa são estruturas fáceis de serem projetadas e realizadas, pois não necessitam de modelagem digital para sua montagem, que pode ser feita diretamente no canteiro, ou então pré-fabricada e posteriormente montada no local.

Estruturas em *gridshell* de flexão inativa não possuem a mesma facilidade projetual que as de flexão ativa, pois necessitam ser modeladas digitalmente de forma precisa, porém isso implica em uma redução de gastos e tempo de canteiro, já que as peças são necessariamente pré-fabricadas. Grande parte das estruturas *gridshell* de flexão inativa não possuem conectores metálicos, são estruturadas em encaixes, o que reduz o gasto da obra.

Como mostra e conclui a pesquisa realizada, existe ainda um grande campo para o estudo das estruturas em *gridshell*. Como visto na obra do *Mannheim-Multihalle* estas estruturas conseguem vencer grandes vãos com gastos mínimos de matéria prima. Embora possuam certa complexidade projetual e construtiva, suas vantagens instigam arquitetos no mundo todo a darem continuidade no que Hook iniciou a mais de trezentos anos com os primeiros estudos em modelos pendurados. Mas estas obras não se destacam apenas pela sua estrutura mínima e sustentabilidade, a infinidade de formas que o processo de “*free form*” possibilita, como visto na obra de Shigeru Ban onde a *gridshell* embora esteja confinada dentro de uma caixa, se destaca no projeto como elemento principal, sendo não apenas uma solução estrutural como formal.

6. REFERÊNCIAS

ABREU, Nicole Maria Nunes. **Criação de uma malha industrial de madeira a partir da análise das técnicas de cestaria**. 2015. Tese de Doutorado em Arquitetura, Universidade do Minho, Braga, 2015.

ADRIAENSSENS, S.; GLISIC, B. **Evolution of German Shells: Efficiency in Form**. Disponível em: <<http://shells.princeton.edu/>>. Acesso em: 13 ago. 2021.

ARSENYEV, Sergei. 1897: **World's First Diagrid Shell by Vladimir Shukhov in Vyksa**. 2011. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=iJ0hScrDqXQ>>. Acesso em: 20 mar. 2020.

BALDASSINI, N.; RAYNAUD, J. **Free-form, form finding and anisotropic gridshell**. In: Symposium of the International Association for Shell and Spatial Structures (50th), Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures: Universitat Politècnica de València, València, 2009.

BLASS, H. J. et al. (ed). **Timber engineering STEP 1: basis of design, material properties, structural components and joints**. Alemanha: Centrum Hout, Almere. 1995.

BREDA, Violetta. **Strutture in legno: l'eleganza del golf club di Shigeru Ban**. 2013. Disponível em: <<https://www.architetturaecosostenibile.it/architettura/progetti/strutture-legno-golf-club-shigeru-ban-243>>. Acesso em 26 mar. 2020.

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

CARVALHO, D. F. P. A. **Gridshells em madeira**: morfologia, aplicabilidade, comportamento estrutural e projeto. Coimbra, 2015. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2015.

COLLINS, Matt; COSGROVE, Tom. **A Review of the State of the Art of Timber Gridshell Design and Construction**. CIVIL ENGINEERING RESEARCH IN IRELAND CONFERENCE, 1., 2016, Limerick. p. 1-6. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Matt_Collins2/publication/307546000_A_Review_of_the_State_of_the_Art_of_Timber_Gridshell_Design_and_Construction/links/57c7f5e108aec24de04313f1/A-Review-of-the-State-of-the-Art-of-Timber-GridshellDesign-and-Construction.pdf> . Acesso em: 8 mar. 2020.

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: <<http://hdl.handle.net/11449/157047>>.

HERZOG, Thomas et al. **Timber construction manual**. Basilea: Gustavo Gili, 2012.

HOLZER, D.; HOUGH, R.; BURRY, M. **Parametric Design and Structural Optimisation for Early Design Exploration**. *International Journal of Architectural Computing*, v. 5, n. 4, p. 625-643, 2007.

HUERTA, Santiago. *Structural design in the work of Gaudi*. **Architectural science review**, Madrid v. 49, n. 4, p. 324-339, mai. 2006.

KOTNIK, Toni; SCHWATZ, Joseph. *The architecture of Heinz Isler*. **Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures**. Madri, v. 52. 185-190, set. 2011.

KUNZ, M.; PRAUCHNER, M. B. Uso do sistema estrutural gridshell na criação de formas complexas em estruturas de madeira. **Revista de Arquitetura IMED**, Passo Fundo, v 4., n.1, p. 19-25, jun. 2015.

LABORATÓRIO DE ESTUDOS DA MADEIRA. **Rota da madeira**. Universidade federal do Rio Grande do Norte-UFRN, 2018. Disponível em: <<https://www.labem.ct.ufrn.br/copia-rota-da-madeira>>. Acesso em: 31 mar. 2020

LOMOS, **Surface blending in Rhinoceros**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=AMbx06Yt4iQ>>. Acesso em: 15 jun. 2021..

MEIRELLES C.R.M; KISHI, S. Grandes Coberturas na Arquitetura Contemporânea: Estudos de Caso do Sony Center e do Mercado de Santa Caterina. **Cadernos de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo**. São Paulo, v. 13, n.2, p.1-19. 2013.

MOLINA, Júlio Cesar et al. *Gridshell em madeira*: aspectos teóricos e construtivos. **Ambiente Construído**, São Carlos, v. 20, n. 1, p. 277-295, 2020.

NAICU, D.; HARRIS, R.; WILLIAMS, C. **Timber gridshells: design methods and their application to a temporary pavilion**. In: World conference on timber engineering, Quebec, 2014.p.1-9.

PONE, S. et al. Construction and form-finding of a post-formed timber grid-shell. In: **Structures And Architecture: Concepts, Applications And Challenges**, Londres, v 2., p. 245 - 253. 2013. Disponível em:

<http://www.researchgate.net/publication/235921308_Construction_and_formfinding_of_a_post-formed_timber_grid-shell>. Acesso em: 22 abr. 2020.

SANTIFALLER, E. Architecture – **Mannheim Multihalle**. Disponível em: <<https://mannheim-multihalle.de/en/architecture/>>. Acesso em: 17 jul. 2021.

SOUZA, Isabela Cavalcanti de. **Processo construtivo de estrutura *gridshell* pós-formada com uso de pinus**. 2019. 177f. Dissertação Mestrado em Engenharia Civil- Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

TOUSSAINT, M. H. A. ***A design tool for timber gridshells: the development of a grid generation tool***. 2007. *Thesis (Master of Science in Civil Engineering)*, Delft University of Technology, Netherlands, 2007.

WATTS, Andrew. **Modern construction handbook**. Nova York: Birkhäuser, 2016.

Contatos: 31911633@mackenzista.com.br e celiaregina.meirelles@mackenzie.br