



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus Experimental de Itapeva

ULYSSES MARTINS DE FREITAS

**ANÁLISE, CARACTERIZAÇÃO E ADEQUAÇÃO DE UM SISTEMA DE
COBERTURA DO TIPO *GRIDSHELL* PARA O CAMPUS DA
UNESP/ITAPEVA**

Itapeva – SP
2016

ULYSSES MARTINS DE FREITAS

**ANÁLISE, CARACTERIZAÇÃO E ADEQUAÇÃO DE UM SISTEMA DE
COBERTURA DO TIPO *GRIDSHELL* PARA O CAMPUS DA
UNESP/ITAPEVA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado na Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” – Campus Experimental de Itapeva, como requisito para conclusão do curso de Engenharia Industrial Madeireira.

Orientador: Prof. Dr. Júlio Cesar Molina

Itapeva – SP
2016

F866a Freitas, Ulysses Martins de.
Análise, caracterização e adequação de um sistema de cobertura do tipo *gridshell* para o campus da Unesp/Itapeva / Ulysses Martins de Freitas. – Itapeva, SP, 2016.
53 f.: il.

Trabalho de conclusão de curso (bacharelado – Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus Experimental de Itapeva, 2016
Orientador: Júlio Cesar Molina
Banca examinadora: Alexandre Jorge Duarte de Souza, Juliana Cortez Barbosa
Bibliografia

1. Estruturas de madeira (Construção civil) 2. Coberturas. 3. Cascas (Engenharia) I. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus Experimental de Itapeva. II. Título.

CDD 624.1776

Este trabalho eu dedico aos meus pais João Batista Martins de Freitas e Rosângela Martins da Silva Freitas, que sempre me ensinaram a dar o meu melhor e lutar pelos meus sonhos. Vocês são exemplos para mim. Eu só tenho a agradecer por todo cuidado, amor, carinho, sabedoria e por sempre me encorajarem nas horas difíceis e comemorarem comigo nas horas felizes. Amo vocês, obrigado por tudo e essa é só a minha primeira vitória que dedico a vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso pudesse acontecer ao longo de minha vida e não somente nestes anos como universitário. Ele é o maior Mestre que alguém pode adorar e amar.

Agradeço à minha namorada Larissa Almeida Rosolem, por sempre ter me ajudado durante toda a faculdade e nunca ter deixado de me apoiar nas decisões que tomei. É uma pessoa que eu amo muito e retribuo todo o carinho e companheirismo.

Agradeço também a toda a minha família que sempre apoiou e incentivaram em todas as minhas decisões.

Agradeço ao meu orientador Júlio Cesar Molina, pela orientação, apoio, confiança, suporte necessário para que conseguisse fazer este trabalho e por ter dividido seus conhecimentos comigo.

Agradeço a Gabriela da Silva Matos, Pablo Henrique Morais, Juliano Brito e Valdecir por me ajudarem a realizar esse trabalho.

Agradeço a todos meus amigos que fizeram parte da minha formação, pela ajuda em toda graduação em estudos, trabalhos e provas. São amigos que vou levar para a vida com certeza

Agradeço a todos os professores que me proporcionaram o conhecimento não apenas racional, mas que me ensinaram ter caráter e educação no processo da minha formação profissional, por não apenas ter me ensinado, por terem me feito aprender.

De modo geral, agradeço a todos que indiretamente ou diretamente fizeram parte da minha formação e da primeira caminhada das muitas que estão por vir.

“Ninguém baterá tão forte quanto a vida. Porém, não se trata de quão forte pode bater, se trata de quão forte pode ser atingido e continuar seguindo em frente. É assim que a vitória é conquistada.”

Rocky Balboa

RESUMO

Neste trabalho foi realizado o acompanhamento da construção de um *Gridshell* que é um sistema de construção de cobertura que pode ser traduzido como casca em formato de grade. Possui geometrias diferenciadas, normalmente ondular. Na estrutura, foram analisadas características como comportamento da casca, dimensões dos elementos estruturais, detalhes construtivos e das ligações, quantidade de elementos do sistema, caracterização e proteção da estrutura confeccionada. A madeira utilizada na confecção tem classe de resistência C40 e que madeira do tipo *Lyptus* (Híbridos de *Eucaliptus grandis* com *urophylla*), necessita de sistema de proteção contra a demanda biológica e também contra as ações do tempo. A estrutura servirá como divulgação de estruturas de madeira na região de Itapeva uma vez que é considerada leve que certamente economizará no sistema de fundação. Assim como servirá de início para outras pesquisas sobre o tema que ainda são escassas no Brasil.

Palavras-chave: Construção. Cobertura. Madeira. *Gridshell*. Estrutura.

ABSTRACT

This present paper aimed in overseeing a *Gridshell* construction, which is a roofing construction system. It has differentiated geometries, usually wavy ones. Several characteristics were analyzed in the structure, like shell behavior, structural elements dimensions, constructive and connections details, number of system elements and characterization and protection of the obtained structure. The chosen wood for the confection has a C40 resistance class and, likewise all the *Lyptus* woods (which are hybrids from *Eucaliptus grandis* and *urophylla*), needs a protection system against biological demand and also against the weather actions. The structure may be used as a disclosure for wood structures in the region of Itapeva, as it is considered light, which certainly may save money in the foundation system, as well as it may be used to start other researches about the subject, which are still scarce in Brazil.

Keywords: Construction, Roofing, Wood, *Gridshell*, Structure.

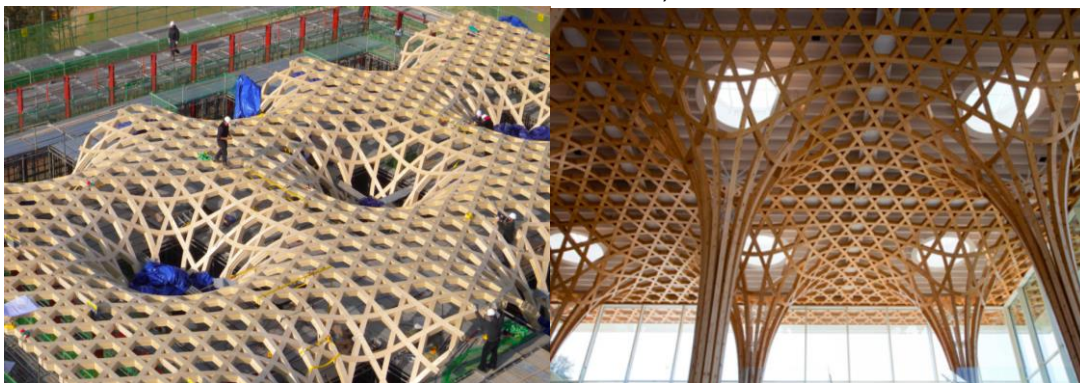
SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 Estruturas em <i>Gridshell</i>	13
3.2 Histórico das estruturas em casca	13
3.3 Formas	16
3.4 Teoria das cascas	19
3.5 Princípios estruturais do <i>Gridshell</i>	21
3.6 Resistência e detalhes construtivos do sistema	24
3.7 Comportamento dos elementos da estrutura	25
3.8 Avaliação do comportamento da estrutura	28
4 METODOLOGIA	29
4.1 Aquisição do material	29
4.2 Caracterização física e mecânica	32
4.3 Confeção das peças faltantes do <i>Gridshell</i>	42
4.4 Estimativa do peso da estrutura	42
4.5 Tratamento das peças sob pressão	43
4.6 Andamento geral do trabalho	43
5 RESULTADOS	44
6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	46
7 CONCLUSÃO	47
8 RECOMENDAÇÕES PARA ETAPAS/ ATIVIDADES FUTURAS	47
REFERÊNCIAS	48
APÊNDICE A – GRÁFICOS DOS ENSAIOS	51

1 INTRODUÇÃO

Gridshell é um sistema de construção que pode ser traduzido como grade em formato de casca, possui geometria ondular e normalmente arquitetonicamente mais agradável. São estruturas leves e possuem alta capacidade de resistir esforços com baixo consumo de material. Assim, o *Gridshell* é um exemplo de otimização do material, utilizando peças curtas para formação de uma espécie de membrana de cobertura para diferentes tipos de construções. A Figura 1 mostra uma estrutura em *Gridshell* de um arquiteto de origem japonesa.

Figura 1- Construção em *Gridshell* do arquiteto japonês Shigeru Ban (Haesley Nine Bridges Golf Club House - Korea, 2010).



Fonte: Shigeru Ban Architects, 2016.

É importante destacar que além da capacidade estrutural do *Gridshell*, as formas das cascas engradadas são quase ilimitadas e funcionais para arquitetos e engenheiros estruturais. Podem vencer grandes vãos, diminuindo o número de elementos verticais no edifício, apresenta funcionalidade acústica e luminosidade adequadas para anfiteatros, quadras de esporte, indústrias, galpões de exposição, shoppings, entre outros locais. Possui uma forma orgânica, assemelha-se as cúpulas geodésicas, entretanto estas estão limitadas as superfícies esféricas enquanto o *Gridshell* pode assumir curvatura diferente em cada direção.

A técnica ainda conta com um excelente desempenho quando sujeita a agressivas intempéries. Contudo, em alguns países há uma dificuldade na implantação do *Gridshell* devido à dificuldade de mão de obra técnica, mesmo com a fácil obtenção de materiais, tendo edifícios desta tipologia em concreto, madeira, metais, bambu e a mistura destes.

A criação de uma estrutura em *Gridshell* é baseada em uma grade plana, montada utilizando elementos delgados contínuos que são fixados por parafusos em

suas intersecções. O processo de travamento da estrutura é realizado após a obtenção do formato desejado com a aplicação de esforços de compressão. Este tipo de construção em madeira possui muitas peculiaridades em comparação aos sistemas convencionais, e o estudo e construção de um protótipo que se realizou neste trabalho permite o melhor entendimento do sistema *Gridshell*.

Este trabalho de pesquisa tem o objetivo de acompanhar o projeto de construção uma estrutura demonstrativa de cobertura em *Gridshell* em madeira para o campus da UNESP de Itapeva. Pretende-se instalar a referida estrutura no gramado intermediário entre os prédios de salas de aula. As etapas de confecção da estrutura foram desenvolvidas até o ponto de pré-montagem necessários em função da disponibilidade de verba orçamentária do campus.

2 OBJETIVO

Acompanhamento das etapas de produção de uma estrutura de cobertura em *Gridshell*, afim de, entender o processo completo de construção, e demais informações de interesse, tais como: dimensões dos elementos, detalhes construtivos e das ligações, quantidade de elementos do sistema e caracterização e proteção da estrutura confeccionada.

3 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

3.1 Estruturas em *Gridshell*

De acordo como Pfluger (1965) pode-se definir como estrutura em casca, aquelas cujo modelo é contínuo, elástica e tridimensional, sendo que podem ser constantes ou variáveis as superfícies médias curvas, onde a espessura é normal em cada ponto em relação as duas superfícies paralelas que formam a casca.

Sena (2008) explica que as cascas podem ser classificadas em finas ou espessas. As cascas finas, proporcionam que a rigidez no plano seja consideravelmente superior à rigidez de flexão, entretanto, não se aplica em condições de apoio que o impossibilitem, a resistência da estrutura é gerida devido a pequenos esforços na flexão e esforços de corte desprezíveis. A maioria das coberturas, depósitos, torres com solução estrutural do tipo casca, pertencem ao grupo das cascas finas. Nas cascas espessas, diferentemente das cascas finas, podem ser solicitadas substancialmente na flexão, logo pode-se desenvolver estruturas mais complexas como túneis, barragens, entre outras estruturas. Ramaswamy (1968) classificou as estruturas em cascas de maneira que se tem a relação entre espessura (e) e o raio interno (r_i) da mesma. Esta diferenciação é dada para determinar as cascas finas, logo para ser uma casca fina deve-se respeitar a condição expressa na relação (1):

$$\frac{r_i}{e} \leq \frac{1}{20} \quad (1)$$

O sistema estrutural *Gridshell* é formado por ripas contínuas que em suas intersecções são travadas. Assim obtém-se uma superfície curva com a flexão das ripas que inicialmente eram apenas um plano engradado. Na construção da superfície, quando se atinge a forma requerida, os nós são apertados, logo a estrutura ganha rigidez com a imobilização diagonal, formando um sistema complexo de peças trabalhando em conjunto (KUNZ; PRAUCHNER, 2015).

3.2 Histórico das estruturas em casca

Em 1897, o engenheiro russo Vladimir Shukhov construiu uma sala para a empresa na cidade de Vyksa, a primeira estrutura com dupla curvatura (Figura 2). O edifício tem uma superfície com área 73 x 38,4m, nesta época as estruturas em

Gridshell não eram comuns e os cálculos estruturais de Shukhov não foram encontrados até agora, suas suposições de design permanecem desconhecidas. (BECKH E BARTHEL, 2009).

O primeiro rascunho conhecido de um *Gridshell* foi feito na Universidade da Califórnia em Berkeley nos Estados Unidos em 1962. O projeto liderado por Frei Otto, a fim de buscar uma forma para o sistema de construção. Este, foi feito em aço com uma área de 52 m² e sua construção foi realizada manualmente. No mesmo ano, construiu-se um *Gridshell* com uma área maior (198 m²) que foi construído utilizando o método da rede invertida. Este método proposto por Frei Otto para projetar *Gridshell* foi feito em madeira laminada colada coberto por uma camada de plástico pregada para reforçar a grelha que foi levantada por uma grua (BOUHAYA, 2010).

Cinco anos depois, em 1967, um novo projeto foi proposto em Montreal (Canada), o Pavilhão da Alemanha para a exposição Universal de Montreal (Figura 2b), onde o júri elegeu o arquiteto alemão Frei Otto como o trigésimo nono vencedor do Prêmio Pritzker. A construção cobria 8000 m², consistia em uma grande membrana suspensa sobre oito mastros de aço, que eram apoiados por cabos ancorados (ARCHDAILY, 2015).

Figura 2 – a) Em Vyksa (Russia), Vladimir Shukhov; b) Pavilhão da Alemanha (Montreal – CA), Frei Otto.



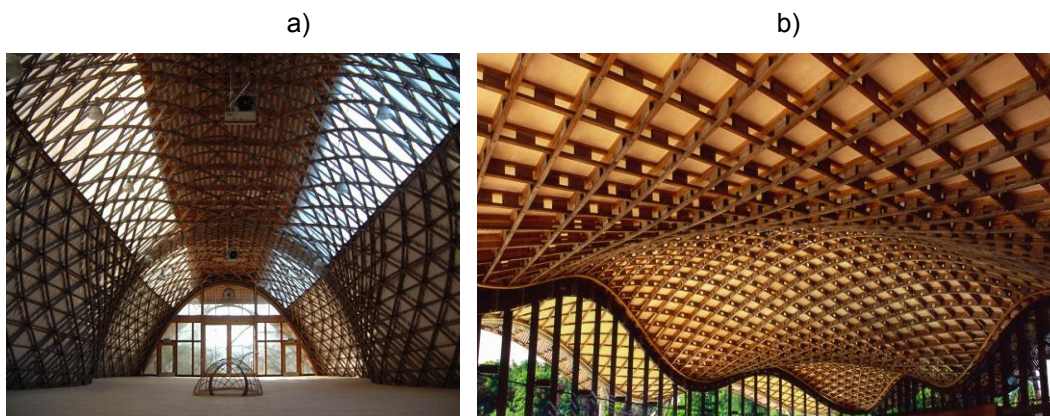
Fonte: a) Beckh e Barthel, 2009; b) Archdaily, 2015.

Burkhardt et al (1978) explica que nesta época o interesse da arquitetura nas formas livres crescia nas últimas décadas, assim como as estruturas em madeira do sistema *Gridshell*. A primeira estrutura *Gridshell* em larga escala foi construída em 1975, em Mannheim na Alemanha.

Mannheim foi um dos maiores centros industriais da Alemanha. Como resultado do seu papel na fabricação, Mannheim também foi visto como um alvo principal para as forças aliadas e ataques aéreos sobre a cidade que começou em dezembro de 1940, os ataques duraram até o fim da guerra, devastando a cidade e deixando metade em ruínas. A extensão dos danos feito para Mannheim durante a Segunda Guerra Mundial fez a reconstrução pós-guerra um processo lento e foi durante essa fase da reconstrução da cidade que o Mannheim Pavilion acabou por ser escolhido para sediar o Bundesgartenschau (Bienal Federal de Horticultura) que financiava a transformação de uma área aberta e geralmente um lugar degradado. Os arquitetos analisaram vários projetos para o pavilhão antes de chegar ao conceito final do *Gridshell*, trouxeram para o projeto um arquiteto famoso chamado Frei Otto para o conselho, que decidiu projetar uma grelha de madeira em formato de escudo, depois Otto concordou em servir como um engenheiro consultor para o projeto. A construção do pavilhão começou em dezembro de 1973, e a estrutura foi gradualmente erguida ao longo de abril e junho do ano seguinte, o Mannheim Pavilion foi erguido com sucesso em novembro de 1974, a exposição em jardim aberto ao público aconteceu em 18 de Abril, de 1975 (PRINCETON, 2013).

Outras construções ocorreram após este período como um pavilhão de exposição na Escola Politécnica Federal de Lausanne, França (1991), O “Earth Centre”, Doncaster - Inglaterra (1998), Pavilhão do Japão, Hanôver – Alemanha (2000), o museu Weald & Downland (2002), no Reino Unido (Figura 3a), O centro de pesquisa de Peshwanton Wood, Reino Unido (2002), O posto do zoológico de Helsinki, Finlândia (2003), seda da união de Norwich, Inglaterra (2006), Savil Garden (2006), Reino Unido (Figura 3b) e O Hotel Yas, Abu Dhabi (2009) (BOUHAYA, 2010).

Figura 3 – a) Museu Weald & Downland (Reino Unido); b) Savil Garden (Reino Unido).

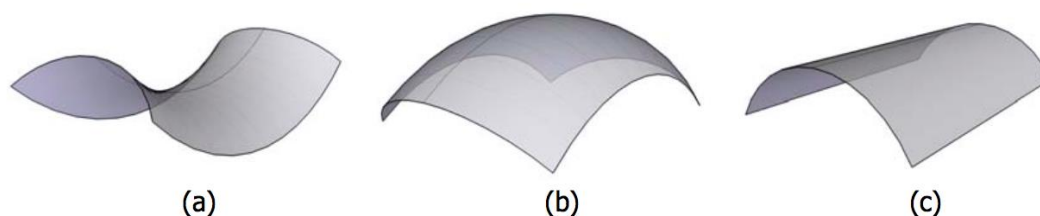


Fonte: Pallant House (2016) e Instituto da Madeira (2013).

3.3 Formas

Toussaint (2007) explica que a diversidade de superfícies de casca é muito grande. Qualquer superfície que é curvada em uma ou mais direções pode ser visto como uma superfície de casca. Uma maneira de definir superfícies de casca é de curvatura Gaussiana, três tipos diferentes de curvatura são definidos na Figura 4.

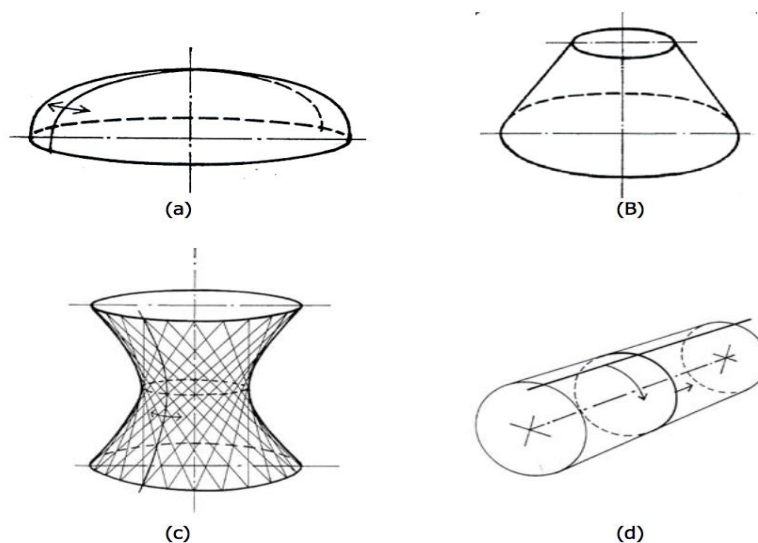
Figura 4 – Superfície Gaussiana negativa (a), positiva (b) e curvatura zero Gaussiana (c).



Fonte: Toussaint, 2007.

A geração de superfície é a forma como a mesma é criada. Essas superfícies são geradas através da rotação de uma curva em torno do eixo de revolução. Esta curva é chamada de curva meridiano. Exemplos são o cone, a cúpula e o hiperboloide, mas também um cilindro é uma superfície de revolução (TOUSSAINT, 2007). A Figura 5 demonstra exemplos de geração de superfície.

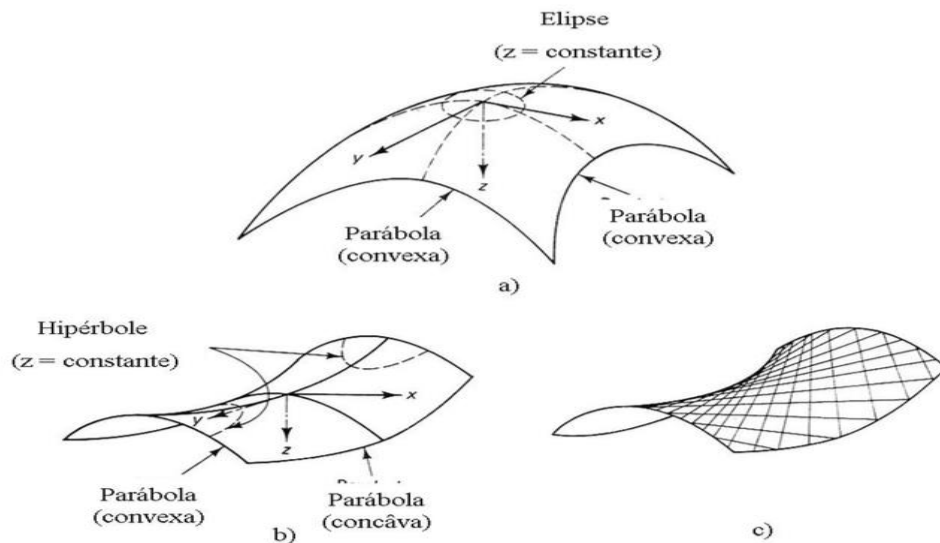
Figura 5 – Exemplos de geração de superfície esférica semi-esférica (a) semi-cônica (b) hiperboloide (c) e cilíndrica (d).



Fonte: Toussaint, 2007.

As superfícies de translação, como mostra a Figura 6, são criadas com uma curva plana movendo-se ao longo de outra curva plana mantendo-a paralela ao plano inicial, sendo que os planos que contém as duas curvas são perpendiculares entre si. Tem-se como exemplo o parabolóide elíptico que resulta da translação de uma parábola sobre outra parábola perpendicular a esta e com curvaturas de mesmo sinal, o parabolóide hiperbólico que resulta da translação de uma parábola sobre outra parábola perpendicular a esta, mas com curvaturas de sinal oposto e os cilindros circulares e não circulares que resultam da translação de uma linha reta ao longo de uma determinada curva perpendicular (circular, elíptica, entre outras) (SENA, 2008).

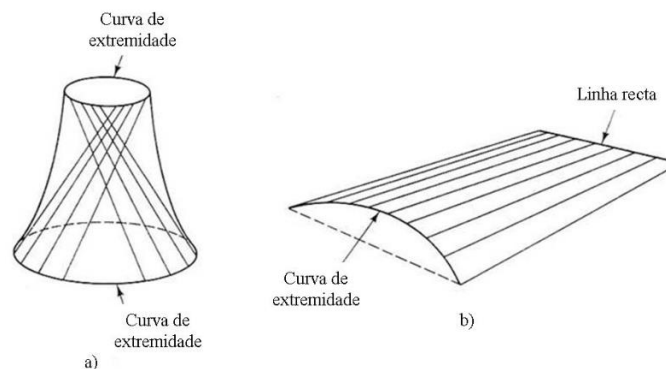
Figura 6 – Exemplos de superfícies de translação parabolóide elíptico (a) parabolóide hiperbólico (b) e parabolóide hiperbólico como superfície regrada (c).



Fonte: Sena, 2008 (adaptado de Ramaswamy, 1984).

As superfícies regradas são criadas a partir de duas curvas entre linhas retas que se movimentam, sendo que os planos que contém as retas não são necessariamente perpendiculares aos planos que contém as curvas. Pode-se dar como exemplo as conoides, representados na Figura 7, que resultam da translação de uma linha reta em que uma das extremidades é uma curva e a outra é uma linha reta, hiperboloide de revolução, cones, cilindros são superfícies de revolução podem também ser geradas através deste método (SENA, 2008).

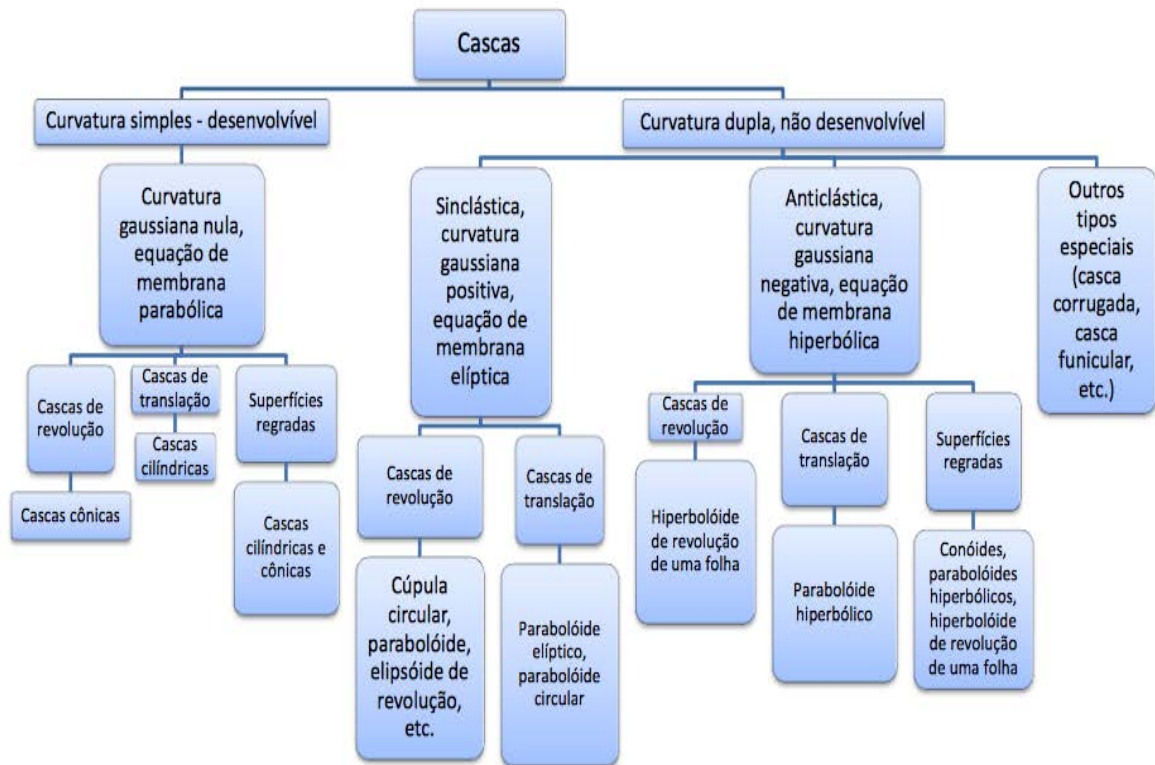
Figura 7 – Superfície regrada de hiperboloide de revolução (a) e conoide (b).



Fonte: Sena, 2008 (adaptado de Ramaswamy, 1984).

Após apresentação da geometria de algumas superfícies, Ramaswamy (1968) elaborou uma classificação para as cascas, de acordo com a Figura 8.

Figura 8 – Classificação das cascas por Design and construction of concrete shell roofs. (Ramaswamy, 1968).

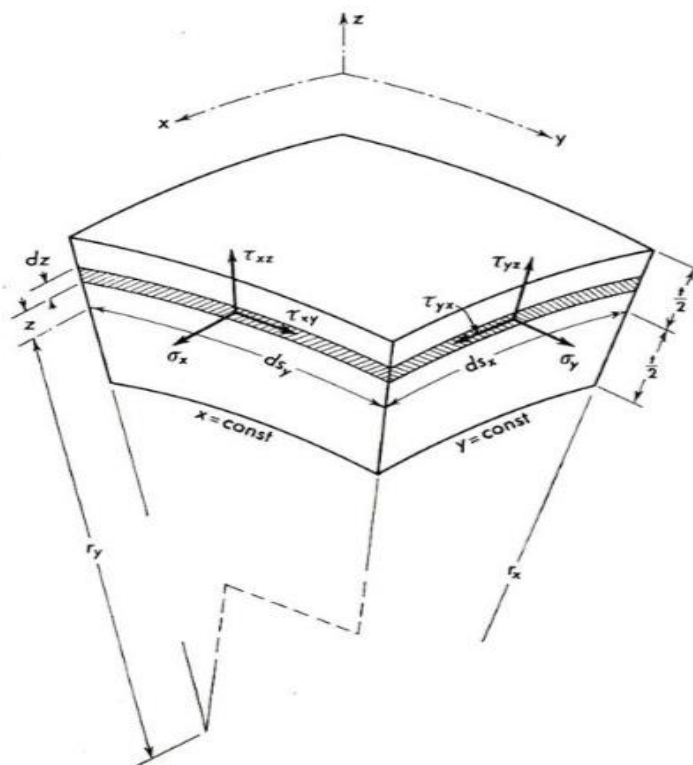


Fonte: Maffei, Gonçalves e Teixeira, 2016 (adaptado de Ramaswamy, 1968).

3.4 Teoria das cascas

O pressuposto básico da teoria da membrana é que a mesma carrega em uma casca fina os campos de tensão distribuídos, assim como exemplifica a Figura 9. Neste campo de esforço, somente há tensões normal e de cisalhamento que são desenvolvidas e distribuídas uniformemente ao longo da seção transversal. Tensões de flexão são insignificantes em comparação com as tensões no plano segundo Hoefakker & Blaauwendraad, 2005 (apud Toussaint, 2007, p.19).

Figura 9 – Campo de tensões num elemento de casca genérico.

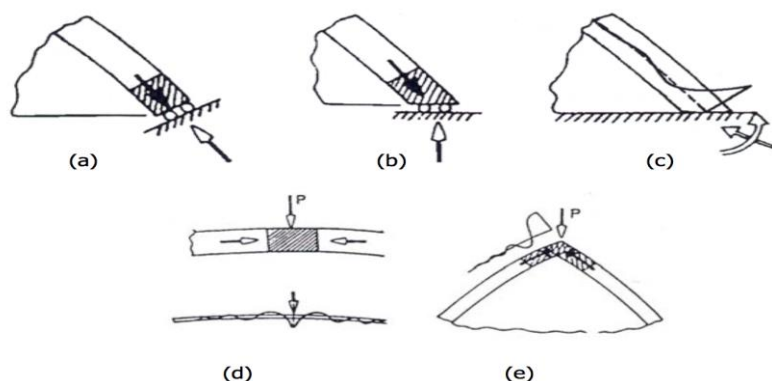


Fonte: Flügge; 1973.

Montoya et al. (1981) afirma também que as ações em uma casca genérica se resumem em esforços de membrana (normais e tangenciais) e esforços de corte/flexão (cortes, momentos torsores e momentos fletores). Entretanto, para que a teoria da membrana faça sentido, desprezando os esforços de flexão, havendo assim economia de materiais. Assim, o autor propôs condições para aplicação dessa teoria. A primeira delas é a casca deve ser fina, assim tem-se um modelo de resistência a esforços de momentos fletores e corte, devido sua flexibilidade. Outra condição estabelecida é que a curvatura seja contínua, para extinção de ações de flexão, seguido da condição de evitar a concentração de cargas, pois essa aplicação incorreta faz com que a membrana perca seu equilíbrio. Outra característica relativa às reações nas arestas da casca é que devem agir tangencialmente, ou seja, o sistema de fixação destas não deve agir cortando ou comprimindo a casca, que resultará no esforço de flexão. A última consideração leva os quais apoios que podem resultar em esforços de cisalhamento e flexão, serão exemplificados a seguir.

De acordo com Toussaint (2007) para alguns casos a casca não satisfaz os requisitos de deslocamento e desconsideração da flexão. Isso ocorre quando as condições de contorno e restrições de deformação não são compatíveis com as exigências de um campo de tensões de membrana, ação de uma carga concentrada ou até a geometria da casca. Para resistir às forças que perturbam o comportamento da membrana da casca, são necessários elementos estruturais adicionais, esqueletos e/ou vigas de borda são adicionados, resultando em uma estrutura em que a ação de membrana e comportamento à flexão é combinado para resistir à carga. A Figura 10 mostra alguns distúrbios de membranas.

Figura 10 – Distúrbios de membrana.



Fonte: Hoefakker & Blaauwendraad, 2005 (apud Toussaint, 2007, p.19).

Em madeira, o comportamento verdadeiro não é visto com muita frequência, grande número das estruturas de madeira possuem curvas duplas constituídas por uma estrutura de nervuras combinadas com uma ou mais camadas contínuas de madeira. Esta camada contínua fornece a interação entre o esqueleto da estrutura e a ação de membrana (TOUSSAINT, 2007).

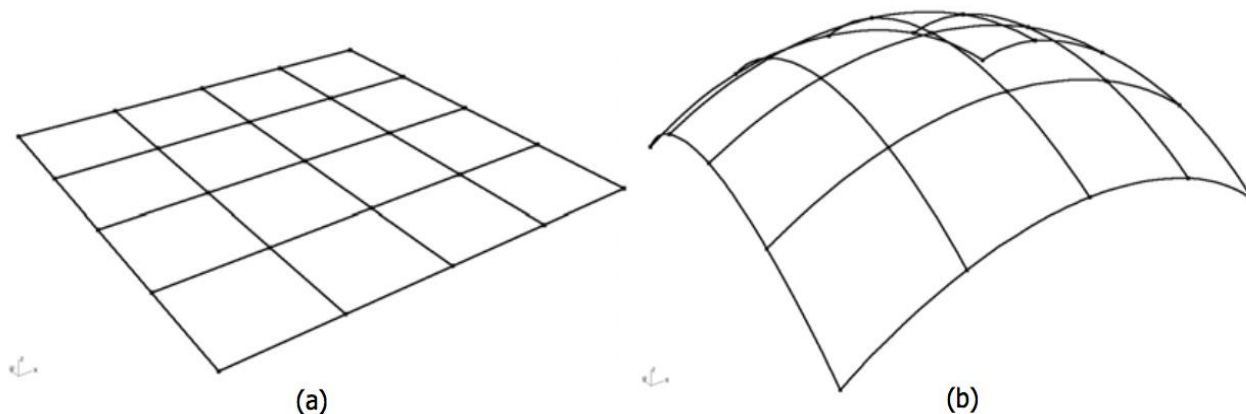
3.5 Princípios estruturais do *Gridshell*

Segundo Bouhaya (2010), a peculiaridade das estruturas em *Gridshell* é que elas podem ser implementadas facilmente e isso através de um processo de construção muito especial. Os elementos da estrutura plana são montados para formar uma grelha bidirecional para ser posteriormente deformada para atingir forma final, como mostra a Figura 11.

A grade para a construção da casca é inicialmente plana e mantida em conjunto por juntas fixadas que permitem movimentos paralelos entre ripas. Este é

um mecanismo com apenas um grau de liberdade, quando a estrutura é erguida para a sua forma duplamente curvada, as forças se transferem para as grades quadradas em paralelogramas semelhantes (PRINCETON, 2013).

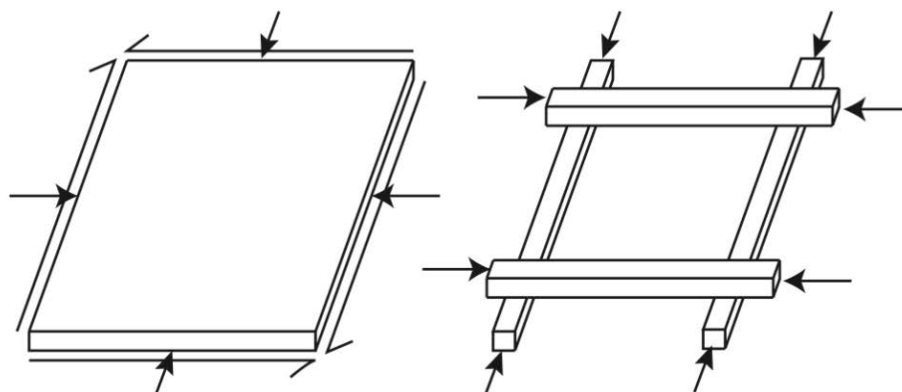
Figura 11 – a) Grade antes de curvada e b) Grade depois de erguida.



Fonte: Toussaint, 2007.

Toussaint (2007) explica que o comportamento da casca é reproduzido pelo sistema de membros contínuos. O resultado é um sistema de quatro ripas unidas nas intersecções, que só podem transmitir forças na direção das ripas e podem resistir a flexão para fora do plano. A tensão normal no elemento de revestimento contínuo é transferida para as arestas também, o que resulta em forças normais nas ripas. As tensões normais que estão presentes no elemento revestido são agora consideradas. A Figura 12 mostra o elemento de *Gridshell* contínuo e com ação de forças normais.

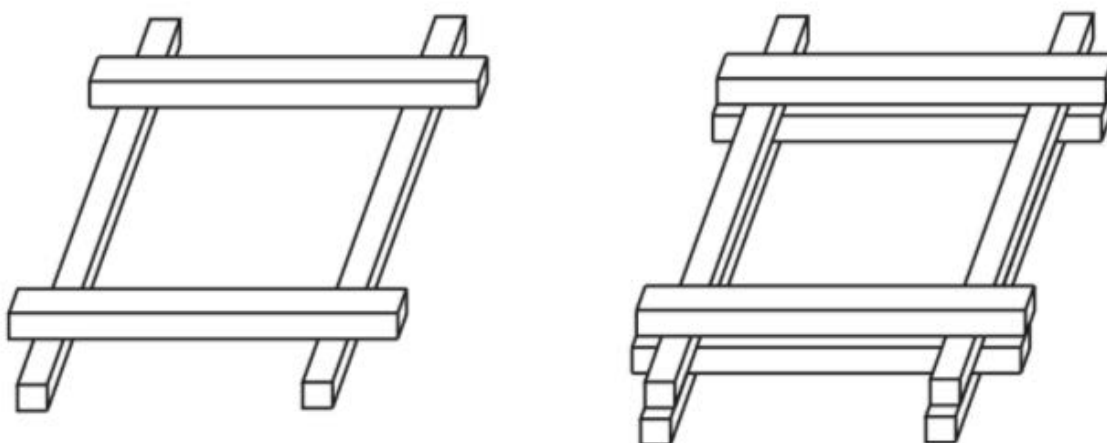
Figura 12 – Elemento de *Gridshell* contínuo e com a ação de forças normais respectivamente.



Fonte: Princeton, 2013.

Há um certo número de fatores que afetam a extensão e a forma das conchas de grade, os dois principais são a rigidez e o raio mínimo de curvatura das ripas de madeira. No primeiro caso, a grelha tem de ser suficientemente rígida para resistir à deformação da concha. As ripas também devem ser capazes de dobrar o suficiente para atingir o raio necessário, sem quebrar. Assim, quando esses fatores não são atingidos, utiliza-se de sistemas compostos (PRINCETON, 2013). A Figura 13 demonstra a duplicação da camada para o aumento da rigidez.

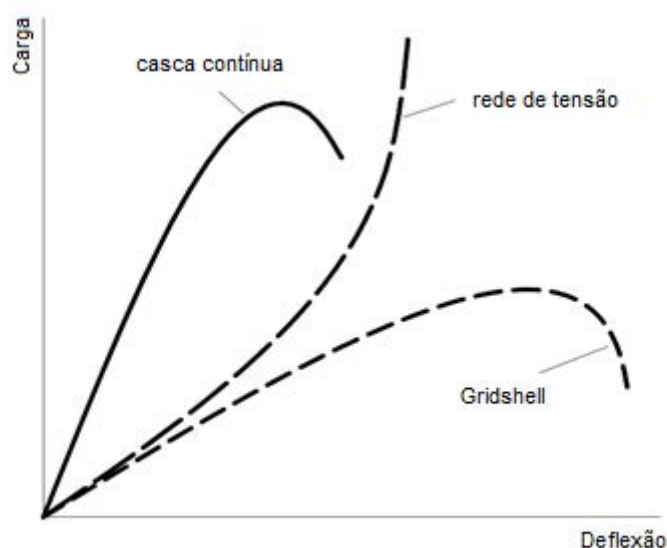
Figura 13 – Duplicação da camada para aumento da rigidez.



Fonte: Princeton, 2013.

De acordo com Burkhard (1978), as ripas de um *Gridshell* já são carregadas por uma elevada carga de compressão, capacidade menor do esforço é deixada para a estrutura resistir ao momento de tração, isto é, desviar o equilíbrio. Este comportamento pode ser visto como uma diminuição da rigidez estrutural é típica para estruturas de compressão. Em contrapartida, estruturas sob tração única endurecem quando as cargas são aumentadas. A figura 14 de uma casca contínua, mostra que as forças normais podem ser transmitidas através de toda a superfície em vez de apenas algumas ripas. O aumento da carga tem menos efeito na distribuição de tensões e, portanto, a capacidade de carga de ruptura é superior.

Figura 14 – Diagrama tensão x deformação.



Fonte: Burkhard, 1978.

3.6 Resistência e detalhes construtivos do sistema

A resistência de carga de um *Gridshell* é dependente da capacidade de resistir ao momento e a seção transversal da grelha. A capacidade de momento para fora do plano, pode ser grandemente melhorada através do aumento do momento de inércia. Isto pode ser estabelecido através do aumento da espessura dos membros estruturais, aplicando uma ou mais camadas adicionais de ripas em cada direção (Figura 15). A desvantagem da aplicação de uma camada dupla de ripas é a complexidade do processo de construção, no topo da tesoura das ripas, as ripas da camada exterior devem ser capazes de deslizar em relação às ripas da camada interior quando as ripas são dobradas em forma (PRINCETON, 2013).

As estruturas em *Gridshell* têm um grande número de nós e assim o detalhe desses nós é crucial para o sucesso da estrutura. Durante a formação da rede, as peças têm que ser capazes de girar em torno dos nós e as camadas paralelas devem ser capazes de deslizar relativamente um ao outro. Na condição final os nós também podem ser utilizados para transferir o esforço cortante horizontal entre os elementos paralelos nas camadas duplas para efetivamente formar um perfil composto. Para alcançar a forma desejada do *Gridshell*, mantem-se os

parafusos desapertados até que se atinja a forma (HARRIS R. et al, 2004). A Figura 15 exemplifica o detalhe do nó do *Gridshell* Mannheim (item 2.2) que tem 33.000 conjuntos, onde os parafusos passam através de quatro camadas de madeira, as duas camadas internas tinham furos, enquanto aqueles que estão fora tinha fendas. Estas ranhuras permitem que o movimento relativo entre as camadas e os parafusos e permitem a rotação no nó. Os testes indicaram que a tensão nos parafusos tende a diminuir ao longo do tempo, devido ao encolhimento da madeira, para evitar isto, foram utilizadas molas (BOUHAYA, 2010).

Figura 15 – Conexões do *Gridshell* Mannheim.



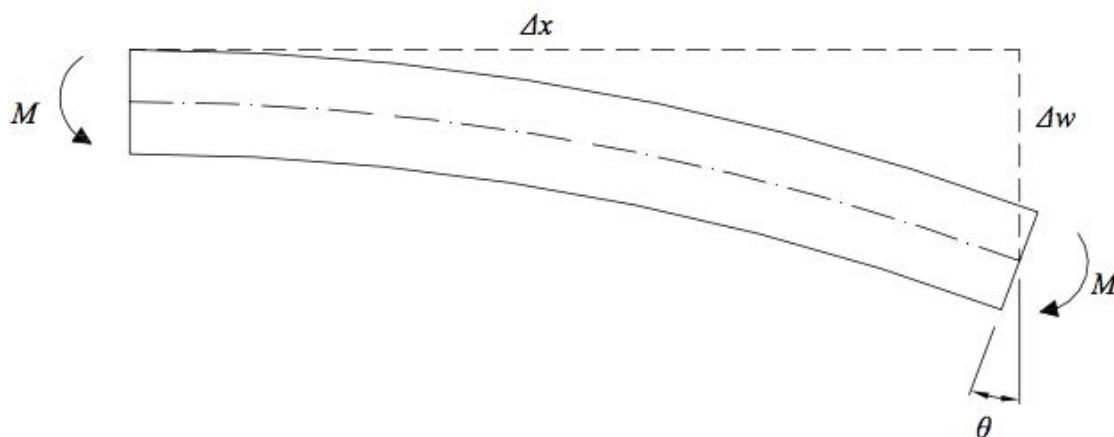
Fonte: Bouhaya, 2010.

3.7 Comportamento dos elementos da estrutura

A forma de um *Gridshell* é criada através da aplicação de uma grande deflexão para o sistema de ripas, elas são dobradas e torcidas para formar o tapete de ripas com forma desejada. A possibilidade de se dobrar e torcer faz com que seja possível criar esta forma, mas também coloca restrições. As ripas só podem dobrar a uma determinada curvatura, em que o nível de tensão máxima é aplicado. A curvatura máxima de um membro de madeira depende da força máxima e do módulo de elasticidade, uma força crescente leva a um raio de curvatura menor, para um pedaço de madeira mais resistente que pode ser dobrado antes da falha superiormente a uma parte mais fraca, 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. Assim como exemplifica a

Figura 16, um momento maior é necessário para dobrar uma peça de madeira forte com o mesmo raio de uma menos resistente (TOUSSAINT, 2007).

Figura 16 – Membro dobrado da estrutura Gridshell.



Fonte: Toussaint, 2007.

O esforço máximo de flexão de uma viga curva pode ser calculada, aproximadamente, com a teoria de flexão simples, que depende da relação entre a altura da secção transversal e o raio de curvatura. Este fator considera a redução da resistência devido à flexão dos laminados durante a produção (Blass et al, 1995). Isso também pode ser encontrado em Eurocode5 (1993), esta teoria aplica-se para madeira laminada colada e LVL. De acordo com Toussaint (2007) a teoria baseia-se para placas finas anisotrópicas, tendo em conta a influência das tensões perpendicularmente as fibras. Não se sabe se levar em consideração esta influência dará resultados corretos quando os membros que não são construídas a partir de camadas finas, mas estão fortemente curvadas. No entanto, com um *Gridshell* o efeito de uma distribuição da tensão não linear se encontra presente devido à forte curvatura em combinação de tensões de flexão.

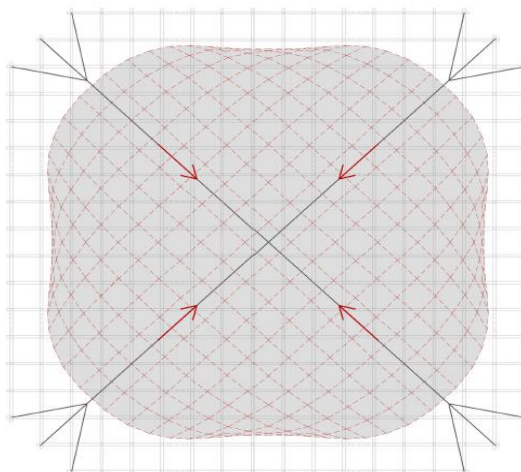
Para verificação da condição de falha de flexão, Eurocode5 (2003) se aplica um fator de redução para ter em conta as tensões de flexão nos laminados de madeira laminada colada curvada devido à produção. E também deve ser considerada a tensão máxima de torção que a norma europeia também fornece expressão.

Assim, Toussaint (2007) explica que quando um *Gridshell* é dobrado em sua forma, as ripas são submetidas ao momento de flexão em duas direções, de torção e forças de corte em duas direções. Esta deformação pode ser vista como

uma deformação estado limite final, uma vez que estas tensões estão presentes no processo de formação. Após a construção, o relaxamento da madeira tem lugar e parte das tensões de formação irá desaparecer. Estima-se que as tensões de formação irão diminuir para 0,5 do nível de tensão inicial, logo metade continuarão a estar presentes no material como um nível de tensão residual. Para verificar a combinação de estresse na fase de construção de condições de falha, um critério que combina todas as combinações de tensão é desejado, existem diretrizes para determinar as combinações de tensões anteriormente citadas, e que o Eurocode5 (2003) fornece expressão de verificação.

Para que a estrutura atinja a forma de cúpula é preciso que a mesma seja tracionada com chapas metálicas centrais e cabo. D'Angelo (2011) propôs que essa forma é obtida exercendo uma força externa em direção ao centro da estrutura, levando em consideração os pontos que serão fixados ao chão. A Figura 17 mostra como essas forças agirão na estrutura.

Figura 17 - Forças exercidas na estrutura para obter a forma de cúpula.



Fonte: D'Angelo, 2011.

Na prática, essa curvatura será realizada utilizando dois guinchos manuais de alavanca. As duas diagonais da estrutura são presas com cordas e então os quatro lados menores convergem em direção ao centro, levando gradualmente a estrutura em sua configuração tridimensional, assim como mostra a Figura 18.

Figura 18 - Modelo da estrutura tracionada.



Fonte: D'Angelo, 2011.

Ao atingir a forma final da curvatura, é necessário inserir contraventamentos em correspondência com os pontos adjacentes ao chão. Tais contraventamentos exercem a função de absorção dos impactos de tração e pré-tensões aplicadas durante o processo de comissionamento forma, tornando a estrutura o mais estável possível (D'ANGELO, 2011).

O *Gridshell* pode ser utilizado para fins decorativos, neste caso não recebe nenhum tipo de cobertura. Entretanto, para estruturas de maiores proporções é necessário que receba cobertura para até mesmo proteger a estrutura. Um tipo de adequada cobertura que pode ser aplicado são telhas de policarbonato.

3.8 Avaliação do comportamento da estrutura

O comportamento da estrutura de *Gridshell* pode ser avaliado através do uso de software que tem como base o método dos elementos finitos (ANSYS, SAP2000Nollinear, entre outros). Nestes softwares, a estrutura em questão é confeccionada por elementos de barra e posteriormente o software possibilita a colocação do carregamento atuante. Após o processamento da estrutura é possível obter os valores das tensões e deformações nos elementos de barra do sistema e

então utilizando-se a norma de madeiras ABNT NBR 7190 é possível a realização do cálculo dos elementos.

4 METODOLOGIA

Inicialmente foi realizada a revisão bibliográfica sobre o tema, tendo em vista se tratar de um tema novo no Brasil, ainda em desenvolvimento, e com escassa literatura. A revisão bibliográfica foi complementada com base na literatura nacional e internacional sobre o assunto.

4.1 Aquisição de material

O material constituinte para a construção do *Gridshell* foi doado em parte pela empresa Rewood localizada em Taboão da Serra – SP. As peças são compostas de madeira da espécie Lyptos (Híbridos de *Eucaliptus grandis* e *urophylla*).

Após recebimento do material (alguns módulos do sistema *Gridshell*) na UNESP, foram iniciados os trabalhos de identificação de todas as peças de madeira, componentes da estrutura de *Gridshell* (Figura 19). Esse procedimento foi realizado visando confeccionar a parte restante da estrutura, como por exemplo, demais módulos e todo o sistema de contraventamentos. Também nesta fase foram substituídos os elementos de madeira danificados e aqueles em falta na estrutura. Após a troca dos materiais danificados foram elaboradas todas as ligações metálicas entre os elementos de madeira.

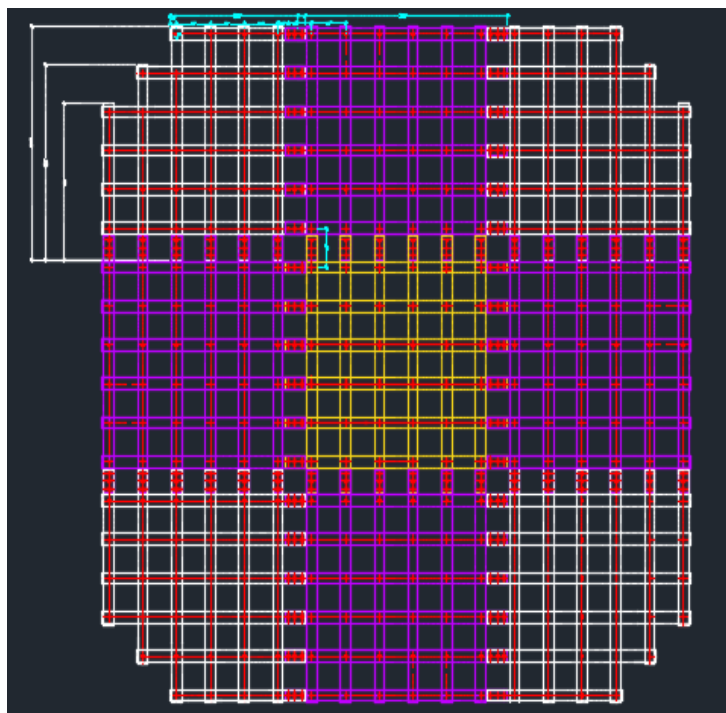
Figura 19 - Identificação dos módulos do *Gridshell* doados.



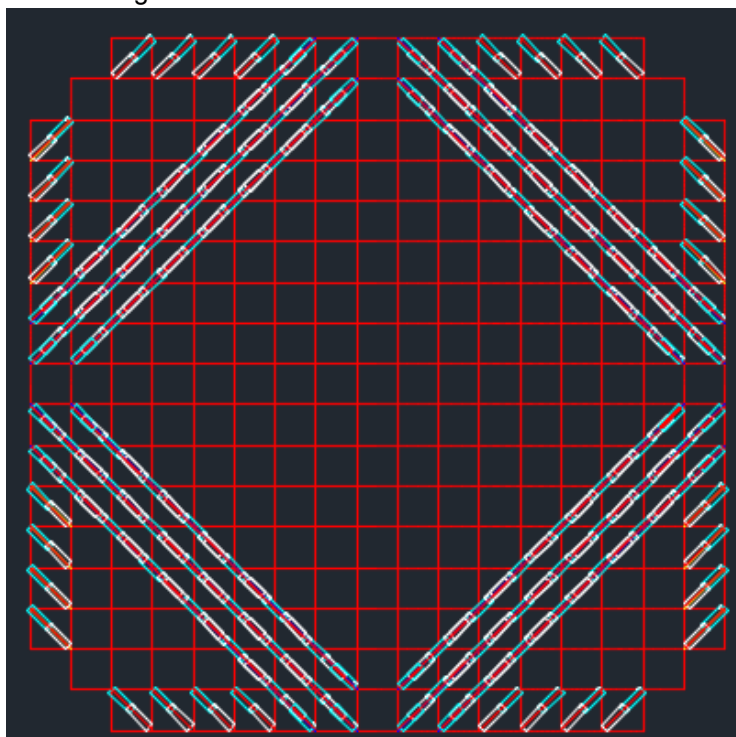
Fonte: Autoria própria.

As peças então foram numeradas e a partir dessa numeração foi construída uma planta baixa da malha dos elementos de madeira que foi utilizada na composição do *Gridshell*, através do software AutoCAD® AUTODESK. Os desenhos no AutoCAD® AUTODESK foram desenvolvidos para se obter uma melhor visualização das peças, parafusos e contraventamentos necessários e quantidade exata de material necessária para a complementação da construção do sistema. Na Figura 22 tem-se o desenho da estrutura de *Gridshell* e na Figura 23, a estrutura do *Gridshell* com os contraventamentos.

Figura 22 - Componentes da estrutura de *Gridshell*.



Fonte: Autoria própria.

Figura 23 - Contraventamentos do *Gridshell*.

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 1 estão apresentadas as dimensões das peças e dos demais que constituem o sistema construtivo *Gridshell*.

Tabela 1 - Especificações das dimensões das peças de *Gridshell*.

Especificação	Dimensões (mm)			Quantidades
Lyptos	15	45	2200	16
Lyptos	15	45	2700	16
Lyptos	15	45	3200	112
Lyptos	15	45	3300	72
Barra roscada	Diâmetro	70	100	744
Porca				1488
Arruela				1488

4.2 Caracterização física e mecânica

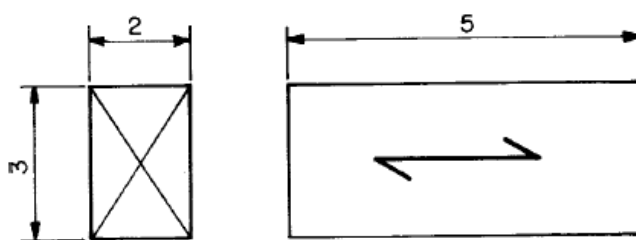
Da própria estrutura de *Gridshell* doada foram retiradas as amostras para o ensaio de caracterização física e mecânica da madeira como também das ligações parafusadas que compõem a estrutura de *Gridshell*.

Foram realizados os seguintes ensaios de caracterização: tração, flexão, compressão, cisalhamento, embutimento e ligação parafusada. Os procedimentos de ensaios seguiram as recomendações da norma brasileira de madeiras ABNT NBR 7190:1997.

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

Foram retirados 6 corpos de prova a partir das peças extraídas da estrutura de *Gridshell*. A metodologia propõe que os corpos sejam confeccionados conforme mostra a Figura 24, porém os corpos de prova foram confeccionados utilizando seção transversal de 1,5 cm x 2 cm, devido às limitações da espessura das peças disponíveis.

Figura 24 - Corpo de prova para determinação da umidade das peças do *Gridshell* segundo a ABNT NBR 7190:1997.



Fonte: ABNT NBR 7190:1997.

Os procedimentos para a determinação da umidade foram: determinação da massa inicial (m_i), colocação do corpo de prova na câmara de secagem com uma temperatura máxima de $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e medindo a cada 6 horas a massa do corpo de prova até que ocorra uma variação igual ou menor a 0,5% entre duas medições seguidas. A massa final pesada é então, a massa seca (m_s). O teor de umidade foi determinado pela Equação 2:

$$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (2)$$

Os corpos de prova utilizados para a determinação do teor de umidade quanto estão apresentados na Figura 25.

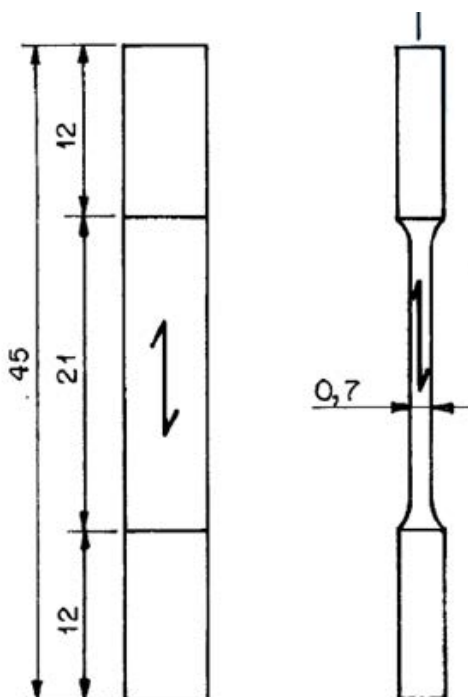
Figura 25 - Corpos de prova para determinação do teor de umidade.



Fonte: Fonte: Autoria própria.

A metodologia seguida para o ensaio de tração propõe que os corpos de prova fossem confeccionados nas dimensões mostradas na Figura 26. Porém, devido às limitações da espessura das peças disponíveis foi possível confeccionar corpos de prova utilizando seção transversal de 5 x 1,5 cm (Figura 27). O ensaio de tração está demonstrado na Figura 28.

Figura 26 - Dimensões do corpo de prova para tração.



Fonte: ABTN NBR 7190:1997.

Figura 27 - Corpo de prova adaptado para tração paralela às fibras de acordo com a norma ABNT NBR 7190:1997.



Fonte: Fonte: Autoria própria.

Figura 28 – Ensaio de tração paralela às fibras.



Fonte: Fonte: Autoria própria.

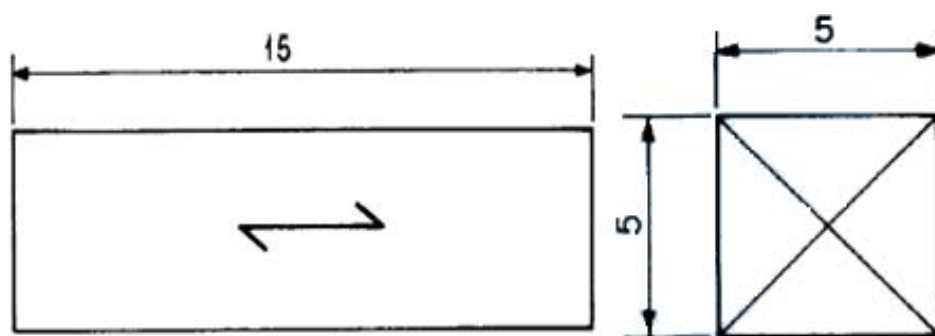
Para o ensaio de compressão paralela, os corpos de provas possuíam dimensões de 1,5 x 5 cm de seção transversal e 15 cm de comprimento, como mostra Figura 29. A norma estabelece corpos de prova com seção transversal de 5 x 5 cm exemplificado na Figura 30, porém devido a limitação das peças, as dimensões utilizadas foram de 1,5 x 5cm. Foram ensaiados 3 corpos de prova para a compressão paralela. O ensaio mecânico está demonstrado na Figura 31.

Figura 29 - Corpo de prova para o ensaio de compressão paralela as fibras segundo a norma ABNT NBR 7190:1997.



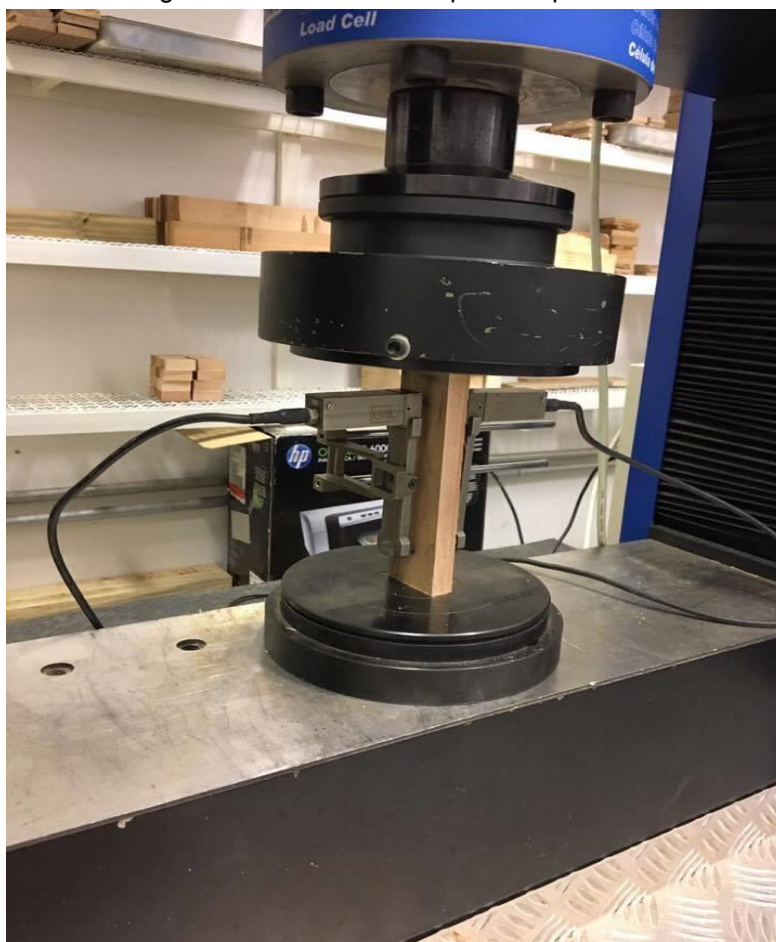
Fonte: Autoria própria.

Figura 30 - Dimensões do corpo de prova para compressão.



Fonte: ABNT NBR 7190:1997.

Figura 31 - Ensaio de compressão paralela.



Fonte: Fonte: Autoria própria.

Para o ensaio de flexão, o corpo de prova utilizado teve dimensões de 5 x 1,5 cm de seção transversal e comprimento de 40 cm, disposto na Figura 32. O ensaio mecânico da flexão é demonstrado na Figura 33

Figura 32 - Corpo de prova adaptado para o ensaio de flexão segundo a norma ABNT NBR 7190:1997.



Fonte: Fonte: Autoria própria.

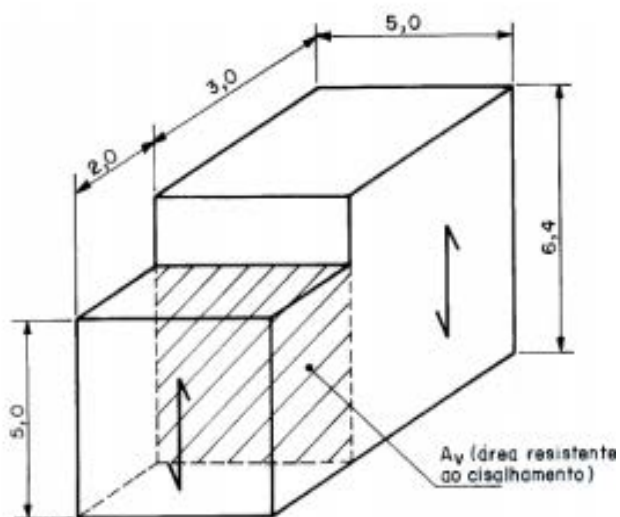
Figura 33 - Ensaio de flexão.



Fonte: Fonte: Autoria própria.

Para o ensaio de cisalhamento, as dimensões do corpo de prova foram de 6,5 cm no comprimento maior, 4,5 cm no comprimento menor, 4,5 de largura e 1,5 cm de espessura na seção transversal de aplicação da carga, de acordo com a Figura 34. O corpo de prova utilizado é demonstrado na Figura 35, e o ensaio mecânico na Figura 36.

Figura 34 - Corpo de prova para o ensaio de cisalhamento paralelo as fibras segundo a norma ABNT 7190:1997.



Fonte: Norma ABNT 7190:1997.

Figura 35 - Dimensões do corpo de prova utilizado para ensaio de cisalhamento.



Fonte: Autoria própria.

Figura 36 – Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.

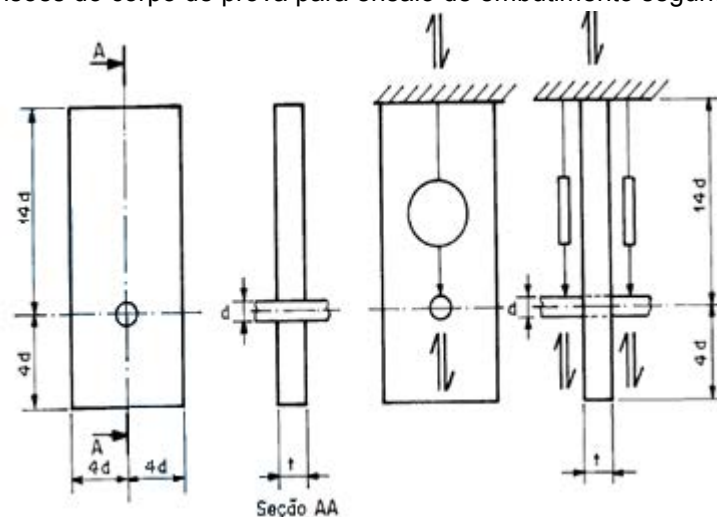


Fonte: Autoria própria.

No ensaio de embutimento, a norma propõe dimensões para o corpo de prova relacionadas na Figura 37. Dessa forma, as dimensões do corpo de prova foram de 1,5 x 4,5 cm de seção transversal e 10,95 cm de comprimento, como mostra a Figura 38. O ensaio de embutimento está apresentado na Figura 39.

Este ensaio foi realizado com pregos porque a tensão de escoamento desse material é de aproximadamente 600 MPa, o que garante o embutimento do pino na madeira sem flexão do pino (prego). Para os parafusos do *Gridshell* a tensão de escoamento é de aproximadamente 250 MPa e neste caso ter-se-ia também a flexão do conector metálico.

Figura 37 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de embutimento segundo ABNT 7190:1997.



Fonte: Norma ABNT 7190:1997.

Figura 38 - Corpo de prova utilizado para o ensaio de embutimento.



Fonte: Autoria própria.

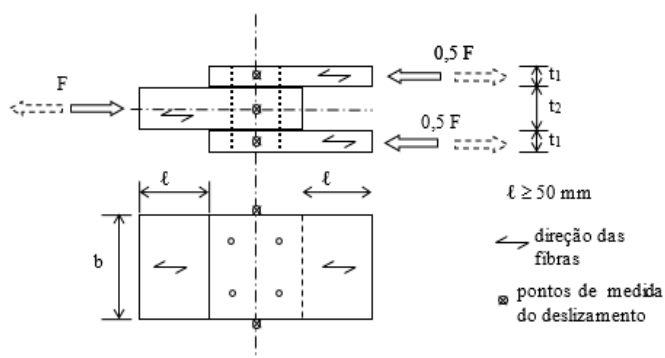
Figura 39 - Ensaio de embutimento.



Fonte: Autoria própria.

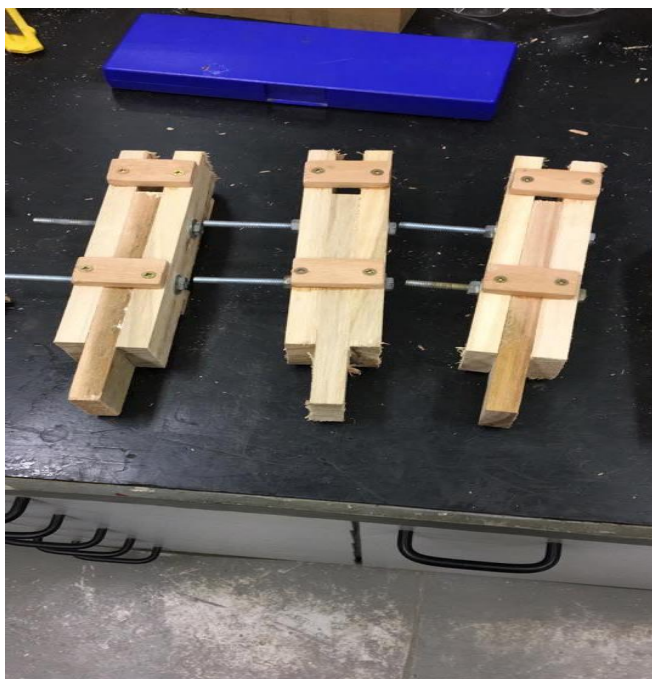
O ensaio de ligação do *Gridshell* foi feito com base no método de ensaios que está sendo proposto pelo projeto de revisão da ABNT NBR 7190/2013. As dimensões estão dispostas na Figura 40. Assim, foram elaborados 3 corpos de provas com dimensões de 20 x 1,5 cm. A distância entre centros dos parafusos é de 59,6 mm, o diâmetro do parafuso é de 7,7 mm e o comprimento entre a superfície e o centro do parafuso de menor e maior dimensões são respectivamente de 66,9 mm e 121,4 mm, demonstrado na Figura 41. O ensaio mecânico realizado, é mostrado na Figura 42.

Figura 40 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de ligação segundo ABNT NBR 7190:2013 – Projeto de revisão.



Fonte: norma ABNT NBR 7190:2013 – Projeto de revisão.

Figura 41 - Corpos de prova utilizados para o ensaio de ligação.



Fonte: Autoria própria.

Figura 42 - Ensaio de ligações sendo realizado.



Fonte: Autoria própria.

4.3 Confeção das peças faltantes do *Gridshell*

Foi recebida uma parte da estrutura doada pela Rewood. Os módulos faltantes assim como todo o sistema de contraventamento foi confeccionado no Laboratório de Propriedades Mecânicas da UNESP/Itapeva e posteriormente foi estimado o número total de parafusos utilizados e faltantes na composição da estrutura de cobertura. Nesse caso, foram adquiridos aproximadamente 900 parafusos com cabeça sextavada (1/4" x 100 mm) com uma porca e 2 arruelas.

4.4 Estimativa do peso da estrutura

O peso da estrutura foi estimado a partir das dimensões dos elementos de madeira e também da densidade da madeira utilizada. O peso também conferido através de uma balança de precisão disponível no laboratório, cada módulo foi pesado individualmente. Posteriormente, uma estimativa do peso foi feita levando em consideração a densidade da madeira suas dimensões e 3% do peso total referente as ligações metálicas. O peso de cada módulo foi de aproximadamente 45 kg incluindo os parafusos. Portanto, os 9 módulos da estrutura com todo o sistema de contraventamentos representam um peso aproximado de 500 kg. A Figura 43 mostra a pesagem dos módulos.

Figura 43 - Pesagem dos módulos de *Gridshell*.



Fonte: Autoria própria.

4.5 Tratamento das peças sob pressão

As peças do *Gridshell* foram compostas de madeiras Lyptos. O tratamento sob pressão foi realizado no laboratório de preservação da madeira na UNESP Campus de Itapeva utilizando preservativo CCA. A intenção do tratamento foi garantir que as partes da estrutura compostas por alburno fossem tratadas. A Figura 44 mostra as peças prontas a serem inseridas na autoclave para iniciar o tratamento.

Figura 44 - Tratamento preservativo das peças de madeira.



Fonte: Autoria própria.

4.6 Andamento geral do trabalho

A finalização da estrutura de *Gridshell* depende da pintura de todas as peças com Stein (osmocolor) da cor gold para que a coloração esverdeada do tratamento preservativo com CCA seja coberta. Feito a pintura, a próxima fase consistirá na tração das extremidades da cobertura com cordas e chapa metálica para travamento da mesma com contraventamentos. Os contraventamentos serão furados com furadeira na hora do travamento na posição desejada, tendo em vista ajustar a furação dos mesmos.

5 RESULTADOS

A Tabela 2 mostra os valores encontrados para os teores de umidades.

Tabela 2 - Teores de Umidade.

Teor de umidade			
	M_i(g)	M_s(g)	U%
CP1	10,51	9,24	14%
CP2	10,64	9,28	15%
CP3	10,28	8,97	15%
CP4	10,38	9,08	14%
CP5	13,12	11,53	14%
CP6	11,77	10,39	13%
Média			14%

Resultados obtidos tiveram um valor médio de 14% de umidade.

Na Tabela 3 tem-se os resultados do ensaio de tração.

Tabela 3 - Resultados do ensaio de tração.

Ensaio de tração			
	Área (mm²)	E_{c0} (MPa)	f_{t,0} (MPa)
CP1	315,5	31846,59	90,23
CP2	330,90	47790,85	83,22
CP3	313,41	49352,28	127,11
Média		42996,57	100,19
Desvio Padrão		7433,32	19,25

Os valores dispostos pela ABNT 7190:1997 para resistência à tração paralela ($f_{t,0}$) para as madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* são respectivamente 70,2 MPa e 85,1MPa. O valor médio experimental encontrado para a resistência à tração foi de 100,19 MPa, o que indica que o *Lyptus* apresenta boas propriedades mecânicas neste aspecto.

O valor da resistência à compressão normal às fibras foi obtido indiretamente pelo ensaio de compressão paralela e formulação proposta pela ABNT NBR 7190:1997 como mostra a relação (2).

$$f_{c90} = 0,25 f_{c0} \quad (2)$$

Tabela 4 - Resultados do ensaio de compressão paralelo as fibras.

Ensaio de compressão				
	Área (mm ²)	E _{c0} (Mpa)	f _{c,0} (MPa)	f _{c,90} (MPa)
CP1	686,88	49776,21	76,72	19,18
CP2	691,25	48489,46	66,53	16,6325
CP3	694,87	33486,91	63,92	15,98
Média		43917,53	69,06	17,26
Desvio Padrão		6953,74	5,11	1,28

Os valores dispostos pela ABNT 7190:1997 para o módulo de elasticidade a compressão paralela às fibras de *Eucalyptus grandis* e *Eucalpytus urophylla*, foi respectivamente de 12813 MPa e 13166 MPa. O valor médio experimental encontrado para a o módulo de elasticidade foi de 43917,53 MPa.

Tabela 5 - Resultados do ensaio de cisalhamento.

Ensaio de cisalhamento			
	Área (mm ²)	F _{v0,max} (kN)	f _{v0} (MPa)
CP1	6,8	8,11	11,92
CP2	6,87	5,58	8,12
CP3	6,84	7,9	11,55
Média		7,20	10,53
Desvio Padrão		1,08	1,71

Tabela 6 - Resultados do ensaio de embutimento.

Ensaio de embutimento			
	Área (mm ²)	Força Máxima (N)	f _{e0} (MPa)
CP1	86,4	5200,3	35,1
CP2	86,4	5767,8	38,9
CP3	86,4	4777,3	26,8
CP4	86,4	6758,30	38,80
Média		5625,93	34,90
Desvio Padrão		660,33	5,68

Tabela 7 - Resultados do ensaio de flexão.

Ensaio de flexão			
	Área (mm ²)	Força Máxima (N)	Tensão de ruptura (MPa)
CP1	21,5	2089,83	97,2
CP2	23,03	2837,60	123,22
CP3	22,78	3069,51	134,77
CP4	23,45	3043,14	129,76
Média		2760,02	121,94
Devio Padrão		97,21	4,73

Tabela 8 - Resultados do ensaio de cisalhamento da ligação.

Ensaio de ligação		
	Área (mm ²)	f _{max} (MPa)
CP1	315.95	14,47
CP2	330.90	16,96
CP3	313.41	33,14
Média		21,52
Devio Padrão		8,28

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir dos ensaios de compressão paralela verificou-se que a madeira utilizada na confecção do *Gridshell* tem classe de resistência C40 ($f_{c0,k} = 0,7f_{c0,m}$). Os valores apresentados na tabela 6 são referentes a resistência de um único parafuso, tendo em vista que foram utilizados um total de dois parafusos no corpo de prova de cisalhamento direto (*Direct shear*).

A norma de madeiras prevê que a resistência ao embutimento do pino na madeira é aproximadamente igual a resistência à compressão paralela às fibras. Neste caso foi observado experimentalmente que a resistência localizada ao embutimento da madeira na ligação foi bem menor que o valor obtido para a resistência a compressão paralela, comprovando assim a concentração de tensões nas regiões das ligações fazendo com que as mesmas atinjam o estado limite último antes que o restante da estrutura que trabalha em regime linear. Para o restante da estrutura a força atuante no elemento de cada é proporcionalmente distribuída.

7 CONCLUSÃO

Esta estrutura servirá de cartão de visita para maior divulgação das estruturas de madeira na região de Itapeva como também no Brasil, aumentando assim as possibilidades de aplicação da madeira em estruturas de coberturas;

Este trabalho também auxiliará na divulgação de informações sobre a confecção e análise dos materiais e ligações utilizados, tendo em vista a escassez de trabalhos dessa natureza na literatura nacional;

A estrutura em questão é uma estrutura leve que certamente economiza no sistema de fundação;

Os detalhes aqui apresentados servirão para trabalhos futuros auxiliando na montagem final do sistema a ser instalado nas dependências da UNESP.

A utilização de madeira do tipo *Lyptus* necessita de sistema de proteção contra a demanda biológica e também contra as ações do tempo e nesse sentido as principais recomendações estão aqui propostas;

A madeira utilizada na confecção do sistema tem boa resistência e se enquadra na classe C40.

8 RECOMENDAÇÕES PARA ETAPAS/ATIVIDADES FUTURAS

Realizar pintura com Stein (osmocolor) de todos os elementos de madeira buscando preencher principalmente os furos das ligações;

Utilizar tinta nas cores gold ou embuia visando eliminar a coloração esverdeada do tratamento com CCA e ao mesmo tempo protegendo a madeira contra as ações do ambiente e, principalmente, dando uma colocação próxima da coloração natural da madeira;

Não realizar pintura com os parafusos nos locais dos furos. A pintura deve ser realizada de modo a eliminar o contato da tinta sobre a rosca dos parafusos;

Utilizar conexões (parafusos) galvanizadas;

No posicionamento da estrutura de cobertura por tração utilizar uma chapa central metálica e cordas ligadas nas quatro extremidades com a chapa metálica central;

Estudar um sistema adequado de telha para a cobertura confeccionada. Por exemplo, policarbonato transparente;

REFERÊNCIAS

ARCHDAILY. **Pavilhão Alemão Expo 1967**. 2015. Disponível em: <<http://www.archdaily.com.br/br/763576/video-german-pavilion-at-expo-1967-frei-otto-2015-pritzker-prize-laureate>>. Acesso em: 17 abr. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: projeto de revisão estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

BECKH, Matthias; BARTHEL, Rainer. The first doubly curved gridshell structure-shukhovs buildings for the plate rolling workshop in vyksa. In: PROCEEDINGS OF THE THIRD INTERNATIONAL CONGRESS ON CONSTRUCTION HISTORY. **Anais...** Cottbus, Alemanha, 2009. p. 159-166. Disponível em: <http://www.bma.arch.unige.it/pdf/construction_history_2009/vol1/beckh-matthias_layouted.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2016.

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

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

Burkhardt, B. et al. Multihalle Mannheim. **Institut für leichte Flächentragwerke, Stuttgart**, 1978.

D'ANGELO, P. **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, 2011.

EUROPEAN PRESTANDARD. **EUROCODE 5**: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings. Brussel: European Committee for Standardization, 1993, 110p. (ENV 1995-1-1)

FLÜGGE, Wilhelm. **Stresses in shells**. Berlin: Springer, 1973.

HARRIS, Richard et al. The use of timber gridshells for long span structures. In: PROCEEDINGS OF THE 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING WCTE 2004. **Anais...** Lahti, Finland, 2004. p. 1001-1006.

Hoefakker, J.H. & Blaauwendraad, J. Theory of Shells, Course CT5143. Delft: Delft University of Technology, 2005. In: TOUSSAINT, M. H. **A design tool for timber gridshells: The development of a grid generation tool.** 2007. 223f. Tese (Mestrado) - Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, 2007.

INSTITUTO DA MADEIRA. **Pavilhão de entrada do Savill Garden Windsor Great Park.** 2013. Disponível em: <<http://www.institutodamadeira.com.br/2013/09/pavilhao-de-entrada-do-savill-garden.html>>. Acesso em: 11 maio 2016.

KUNZ, M.; PRAUCHNER, M. B. 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.

MONTOYA, P. J.; MESEGUER, A. G.; CABRE, F. M. **Hormigón Armado.** Barcelona: Gustavo Gili, 1981.

PALLANT HOUSE GALLERY. **Weald & downland open air museum.** Disponível em: <<http://pallant.org.uk/visiting/chichester-arts/chichester-arts/architecture/weald-downland-open-air-museum>>. Acesso em: 11 maio 2016.

PFLUGER, A. **Estatica elemental de Las Cascaras.** Buenos Aires: EUDEBA, 1965.

EVOLUTION OF GERMAN SHELLS EFFICIENCY IN FORM. **MANNHEIM MULTIHALLE.** Princeton University Department Of Civil And Environmental Engineering. Disponível em: <<http://shells.princeton.edu/Mann1.html>>. Acesso em: 16 abr. 2016.

RAMASWAMY, G. S. Design and Construction of Concrete Shell Roofs. Revised Edition, Malabar, Florida: Robert E. Krieger, 1984. In SENA C. F. **Coberturas em betão armado e pré-esforçado solução estrutural tipo casca.** Tese (Mestrado) - Universidade Técnica de Lisboa, 2008.

RAMASWAMY, G. S. **Design and construction of concrete shell roofs.** New York, McGraw-Hill, 1968. In: MAFFEI, C. E. M.; GONÇALVES, H. H. S.; TEIXEIRA, P. W.

G. N. **Introdução à Teoria das Cascas – I parte**. Notas de aula. Disponível em: [http://disciplinas.stoa.usp.br/pluginfile.php/109331/mod_resource/content/1/Introdução à Teoria das Cascas - I Parte.pdf](http://disciplinas.stoa.usp.br/pluginfile.php/109331/mod_resource/content/1/Introdução%20à%20Teoria%20das%20Cascas%20-%20I%20Parte.pdf)>. Acesso em: 12 abr. 2016.

SENA C. F. **Coberturas em betão armado e pré-esforçado solução estrutural tipo casca**. Tese (Mestrado) - Universidade Técnica de Lisboa, 2008.

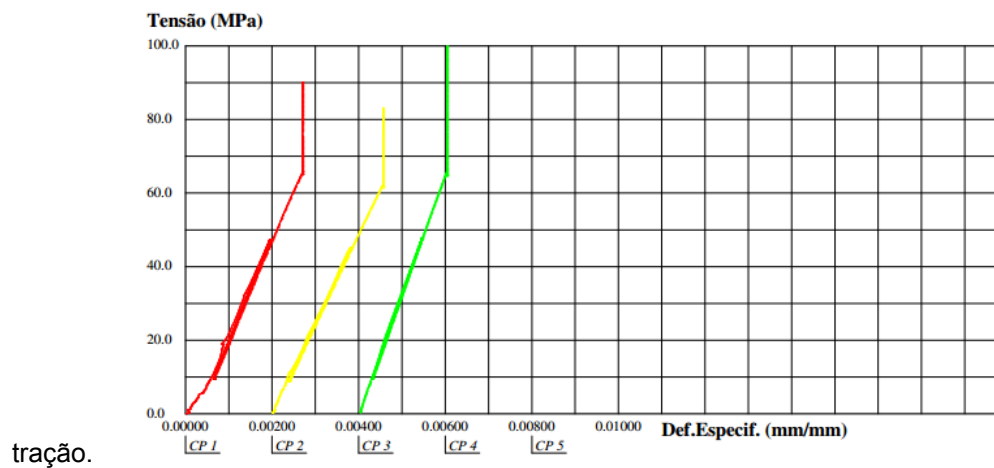
SHIGERU BAN ARCHITECTS. **Haesley Nine Bridges Golf Club House** - Korea, 2010. Disponível em: < http://www.shigerubanarchitects.com/works/2010_haesley-nine-bridges/index.html >. Acesso em: 9 abr. 2016.

TOUSSAINT, M. H. **A design tool for timber gridshells**: The development of a grid generation tool. 2007. 223f. Tese (Mestrado) - Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, 2007.

APÊNDICE A – Gráficos dos Ensaio

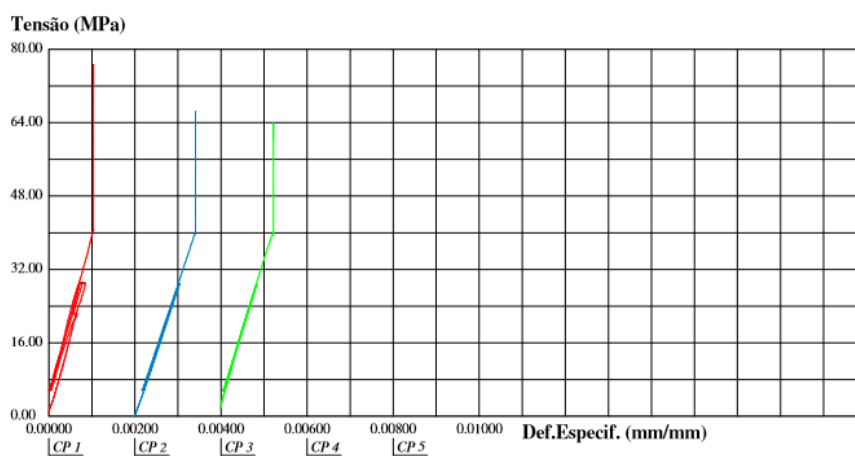
Neste item são apresentados os gráficos dos ensaios de caracterização realizados para o *Gridshell* gerados pela Máquina de Ensaio EMIC.

Figura 45 – Ensaio de



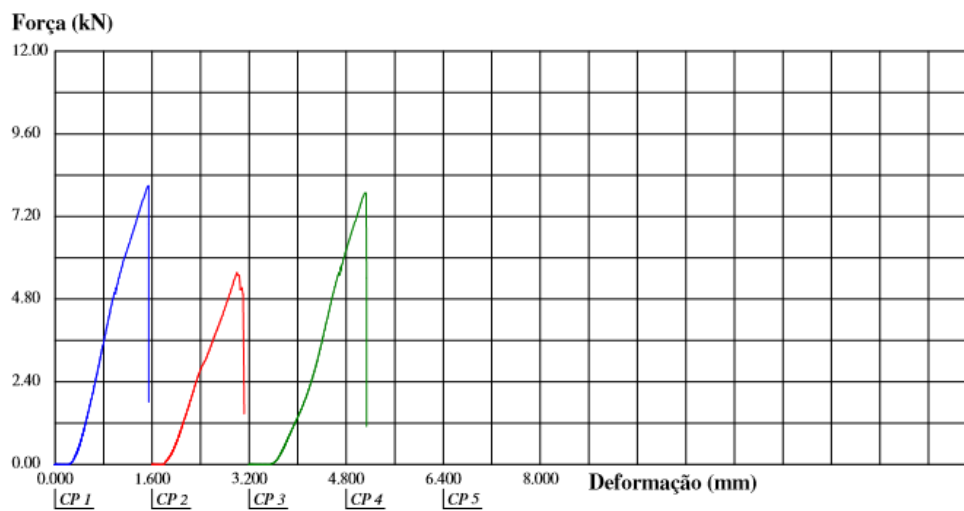
Fonte: Autoria própria.

Figura 46 – Ensaio de compressão.



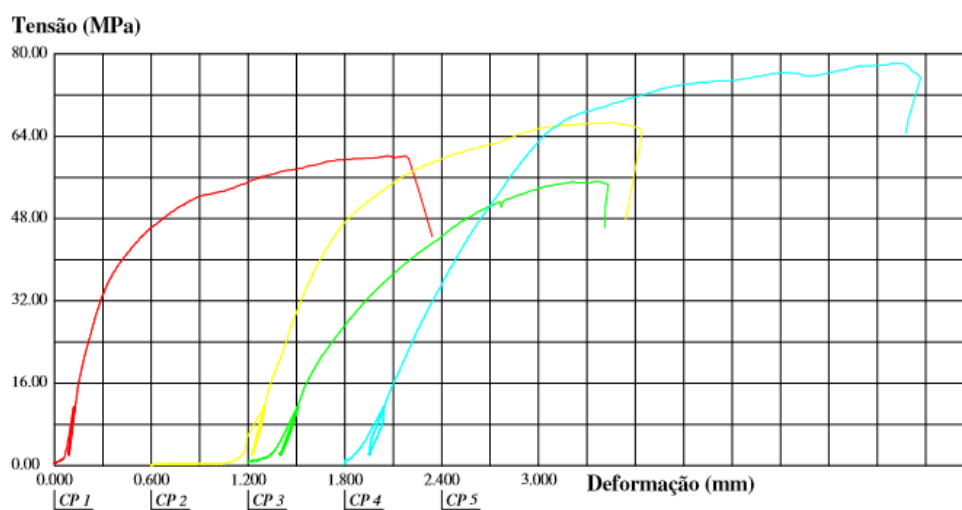
Fonte: Autoria própria.

Figura 47 – Ensaio de cisalhamento.



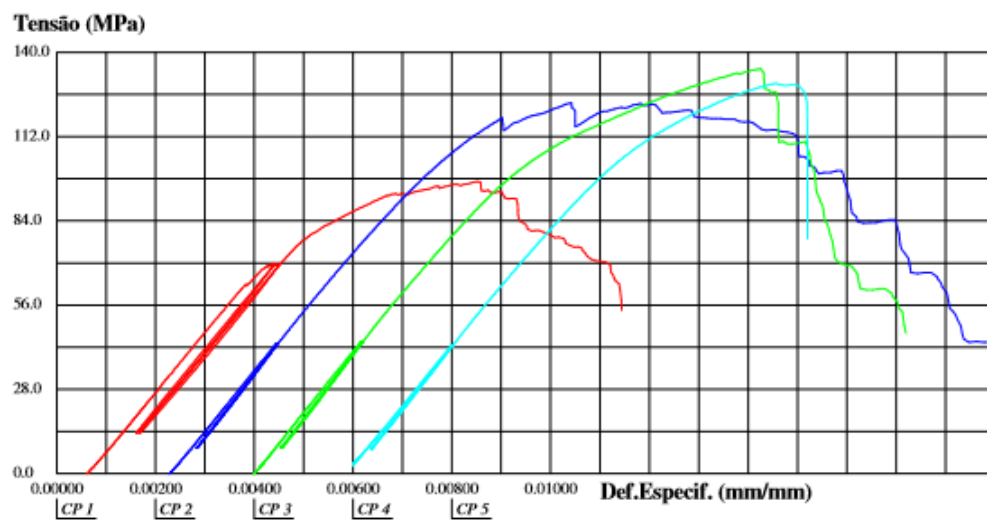
Fonte: Autoria própria.

Figura 48 – Ensaio de embutimento.



Fonte: Autoria própria.

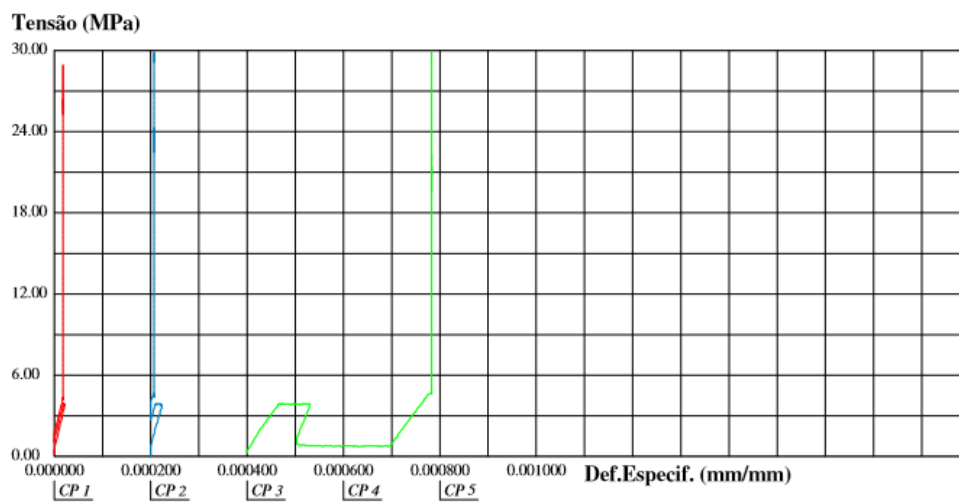
Figura 49 – Ensaio de



flexão.

Fonte: Autoria própria.

Figura 50 – Ensaio da ligação.



Fonte: Autoria própria.