

**ELISA BOMTEMPO MATOS**

**DESENVOLVIMENTO DE ESTRUTURA GRIDSELL EM PROCESSO  
GENERATIVO BASEADO NO DESEMPENHO ESTRUTURAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Andressa C. Pena Martínez

**VIÇOSA – MINAS GERAIS  
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

M433d  
2021  
Matos, Elisa Bomtempo, 1994-  
Desenvolvimento de estrutura *gridshell* em processo  
generativo baseado no desempenho estrutural / Elisa Bomtempo  
Matos. – Brasileira, MG, 2021.  
95 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Andressa Carmo Pena Martínez.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Inclui bibliografia.

1. Geometria na arquitetura. 2. Métodos de simulação.  
3. Modelos matemáticos. 4. Karamba 3D (Software).  
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Arquitetura  
e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e  
Urbanismo. II. Título.

CDD 22. ed. 516.2

Bibliotecário(a) responsável: Renata de Fatima Alves CRB6/2578

**ELISA BOMTEMPO MATOS**

**DESENVOLVIMENTO DE ESTRUTURA GRIDSHELL EM PROCESSO  
GENERATIVO BASEADO NO DESEMPENHO ESTRUTURAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 12 de julho de 2021.

Assentimento:

*Elisa Bomtempo Matos*

---

Elisa Bomtempo Matos  
Autora

*Andressa C. P. Martinez*

---

Andressa Carmo Pena Martínez  
Orientadora

*Para minha Família Cláudio, Silvana,  
Emanuel, Érica, Laica, Dora, Mila e  
Zaica.  
Em memória de Luna.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, por me conceder saúde e sabedoria para seguir em frente.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Arquitetura e Urbanismo, ao qual o Programa de Pós- Graduação (PPG.au) pertence.

Agradeço à minha orientadora, Professora Andressa Martínez, pela orientação, apoio, confiança para realizar esse trabalho, suporte acadêmico e psicológico e por ter dividido seus conhecimentos comigo.

Agradeço a todos os professores e funcionários do Departamento de Arquitetura (DAU), por fazerem parte dessa experiência.

Agradeço aos meus colegas e professores do grupo de pesquisa Nó.Lab, pelas trocas de experiências e por me acompanharem em toda a trajetória.

À minha família, a qual dedico essa dissertação, pelo apoio e incentivo em todos os momentos da minha vida. Por acreditarem em mim e não medirem esforços para me ajudarem a concretizar os meus sonhos.

Agradeço aos meus amigos queridos Matheus, Caio, Débora e Mariana, pelos momentos de alegria e por me oferecerem apoio e consolo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## RESUMO

MATOS, Elisa Bomtempo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2021. **Desenvolvimento de estrutura *gridshell* em processo generativo baseado no desempenho estrutural.** Orientadora: Andressa Carmo Pena Martínez.

*Gridshell* é uma estrutura de forma livre que pode ser considerada uma casca discretizada em elementos lineares que formam uma grelha. Esse tipo de estrutura é conhecida por sua eficiência estrutural, pois possibilita vencer grandes vãos e proporcionar flexibilidade em espaços internos. Essa se justifica pela variedade de estudos abordando *gridshell* com malhas regulares, compostas por quadrados, triângulos ou hexágonos, mas poucos estudos abordando malhas com combinações de polígonos. Por esse motivo, esta dissertação tem como objetivo investigar as etapas para obtenção de padrões da malha por um processo de projeto generativo usando gramática da forma. Partimos do pressuposto que a variabilidade de geometrias geradas para as malhas possui efeito direto no melhoramento do desempenho estrutural do *gridshell*. A pesquisa é dividida em revisão de literatura, teste de metodologia, processos de modelagem digital de geometrias, definição de parâmetros formais para a gramática da forma e simulações computacionais. Introduzimos a dissertação com o levantamento bibliográfico e com teste de metodologia, formulando um algoritmo visual em *Grasshopper*. Nesse teste, desenvolvemos simulações computacionais para métodos de modelagem de *gridshell* associado ao desempenho estrutural a partir do *plugin Karamba3D*. Com o algoritmo testado, prosseguimos com a definição de gramática da forma para malhas e execução de simulações computacionais de desempenho estrutural. Como resultado principal, obtivemos um processo de projeto de *gridshell* otimizado estruturalmente, arranjados por composição de malhas que derivaram de regras simples.

Palavras-chave: Gramática da Forma. Karamba3D. *Lattice*.

## ABSTRACT

MATOS, Elisa Bomtempo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2021. **A structural performance-based generative process for designing a gridshell.** Advisor: Andressa Carmo Pena Martínez.

Gridshell is a free-form structure characterized as a shell discretized into linear elements to form a grid. These structures are known for their structural efficiency, which allows them to overcome large spans and provide gains in interior space, flexibility and functionality. This research was motivated by the wide range of studies addressing gridshells with regular meshes composed of squares, triangles or hexagons, but few studies dealing with meshes with polygonal combinations. Therefore, this dissertation aims to investigate the procedures for obtaining mesh patterns using Shape Grammar as a generative design process, starting from the assumption that the geometric variability of the meshes has a direct influence on the gridshell structural performance. We divided the research into a literature review, a methodology exploration, digital modeling processes, formal parameters for shape grammar definition, and computational simulations. We introduced the study with a methodology testing, formulating a visual algorithm in Grasshopper and running simulations for grid modeling associated with structural performance in Karamba3D. With the tested algorithm, we defined the shape grammar for the meshes and run structural performance simulations. As a main result, we defined a design process for structurally optimized gridshells, arranged by the composition of meshes derived from simple rules.

Keywords: Karamba3D. Shape grammar. *Lattice*

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO 1

Figura 1 – Composição de um <i>gridshell</i> : faces, segmentos e nós. ....	13
Figura 2 – Geometria da malha gerada pelo Kangaroo Solver. ....	18
Figura 3 – (a) Gráfico de convergência da primeira geração e (b) a décima no Octopus. ....	21
Figura 4 – Curva de otimização - Curva de Pareto. ....	21
Figura 5 – Regra aplicada em uma malha rotulada. ....	22

### CAPÍTULO 2

Figura 1– Modelo de curvatura obtida por técnica da catenária. ....	29
Figura 2 – German Building Exhibition. ....	30
Figura 3 – Cobertura do Multihalle <i>and Restaurant</i> . ....	30
Figura 4 – Modelo físico da geração da forma do Multihalle <i>and Restaurant</i> . ....	31
Figura 5 – Vista da cobertura e interior do <i>gridshell</i> de Weald and Downland. ....	32
Figura 6 – Malha com dupla camada (a) e vista lateral (b). ....	34
Figura 7 – Exemplos de <i>gridshell</i> de membros contínuos. ....	34
Figura 8 – Exemplos de <i>gridshell</i> de membros discretos. ....	35
Figura 9 – Exemplo de construção descendente. ....	41
Figura 10 – Exemplo de contraventamento. ....	42
Figura 11 – Travamento para membros discretos em Pods Sports Complex. ....	42
Figura 12 – Malha antes (a) e depois da rotação (b). ....	43
Figura 13 – Travamento com orifício alongado. ....	43
Figura 14 – Travamento com placa de aço e parafuso. ....	44
Figura 15 – Travamento com contraventamento e suporte para vidro. ....	44

### CAPÍTULO 3

Figura 1 – Padrões com composição de triângulos e quadrados. ....	56
Figura 2 – Algoritmo visual (GHX) desenvolvido para modelagem ascendente. ....	56
Figura 3 – Componentes de análise e visualização do Karamba3D. ....	57
Figura 4 – O algoritmo visual (GHX) desenvolvido para casca de suporte para <i>gridshell</i> . ....	57

Figura 5 – Script desenvolvido para projeção da malha sobre o <i>mesh</i> . .....	57
---	----

#### CAPÍTULO 4

Figura 1 – Operações booleanas (a) adição; (b) diferença; (c) interseção.....	66
Figura 2 – Operações euclidianas. (a) translação; (b) rotação; (c) reflexão; (d) escala.....	66
Figura 3 – Operações euclidianas aplicadas em uma geometria inicial. ....	67
Figura 4 – Variabilidade gerada por gramática da forma. ....	67
Figura 5 – Formulação do <i>grid</i> rotulado como base para a obtenção de <i>Lattices</i> . ..	68
Figura 6 – Método de modelagem descendente. ....	70
Figura 7 – (a) Convergência dos parâmetros da primeira geração e (b) na décima geração .....	70
Figura 8 – <i>Lattices</i> para pré-processamento. ....	73
Figura 9 – Transformação do <i>grid</i> inicial para aplicação das malhas.....	73
Figura 10 – Malhas adaptadas de Grasl e Economou (2018). ....	74
Figura 11 – <i>Grid</i> rotulado com 64 módulos. ....	75
Figura 12 – Malhas propostas para segunda etapa de simulação. ....	76
Figura 13 – Simplificação da regra A e regra B.....	77
Figura 14 – Simplificação da regra D e regra D1. ....	80
Figura 15 – Simplificação da regra D e regras D2 e D3. ....	81
Figura 16 – Simplificação da regra E e regra resultante E1. ....	82
Figura 17 – Simplificação da regra F e regras F1 e F2. ....	84
Figura 18 – Simplificação da regra G1 e H1. ....	86

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO 2

Tabela 1 – Tipologia de estrutura e esforço predominante. ....	33
Tabela 2 – Classificação do <i>gridshell</i> pela forma. ....	37
Tabela 3 – Classificação por composição da malha do <i>gridshell</i> . ....	38
Tabela 4 – Classificação por material da malha do <i>gridshell</i> .....	39
Tabela 5 – Métodos de construção ascendente.....	40
Tabela 6 – Exemplos de travamentos. ....	45

### CAPÍTULO 3

Tabela 1– padrões de malha desenvolvidas pelo componente Parakeet e padrões regulares pelo Rhinoceros.....	55
Tabela 2 – Tabela com composição de malha em segmentos padronizados regulares e módulos centralizados, irregulares. ....	56
Tabela 3 – Script desenvolvido para projeção da malha sobre o <i>mesh</i> . ....	58
Tabela 4 – Comparação entre malhas de segmentos padronizados e módulos centralizados com mesma composição geométrica de quadrados e triângulos.....	58
Tabela 5 – Casca resultante do processo de otimização. ....	59
Tabela 6 – Comparação entre métodos de modelagem em malha triangular com segmentos padronizados .....	59
Tabela 7– Comparação entre padrões diferentes padrões com Método de Modelagem Descendente. ....	59
Tabela 8 – Comparação entre valores de Utilização em malhas compostas por quadrados e triângulos. ....	59

### CAPÍTULO 4

Tabela 1 – Casca obtida por otimização. Legenda: (U) Utilização. ....	71
Tabela 2 – Simulação estrutural das malhas A, B, C, D e E. ....	76
Tabela 3 – Simulação estrutural das malhas C, C1 e C2.....	78
Tabela 4 – Simulação estrutural das malhas D e D1. ....	80
Tabela 5 – Simulação estrutural das malhas D2 e D3. ....	81
Tabela 6 – Simulação estrutural das malhas E e E1.....	82

Tabela 7 – Simulação estrutural das malhas F. ....	83
Tabela 8 – Simulação estrutural das malhas F, F1 e F2. ....	84
Tabela 9 – Simulação estrutural das malhas G e H. ....	85
Tabela 10 – Simulação estrutural das malhas G e G1. ....	86
Tabela 11 – Simulação estrutural da malha G2. ....	88

## SUMÁRIO

<b>1. CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	<b>13</b>
1.1 Introdução .....	13
1.2 Justificativa.....	14
1.3 Objetivo .....	15
1.3.1 Objetivo geral.....	15
1.3.2 Objetivos específicos.....	15
1.4 Estrutura da dissertação .....	16
1.5 Resumo das abordagens metodológicas .....	17
1.5.1 Métodos adotados no capítulo 2.....	17
1.5.2 Métodos adotados no capítulo 3.....	17
1.5.3 Métodos adotados no capítulo 4.....	22
<b>2. CAPÍTULO 2 – ASPECTOS TEÓRICOS E CONSTRUTIVOS DO GRIDSELL</b> .....	<b>26</b>
2.1 Introdução .....	27
2.2 Procedimentos metodológicos .....	27
2.3 Revisão de literatura .....	28
2.3.1 História do gridshell .....	28
2.4 Comportamento estrutural do <i>gridshell</i> .....	33
2.5 Classificação do <i>gridshell</i> .....	34
2.5.1 Constituição dos segmentos.....	34
2.5.2 Geometria da superfície, composição da malha e do material .....	36
2.6 Métodos construtivos .....	40
2.7 Detalhe construtivo: tipos de nós .....	42
2.8 Pesquisas que abordam a composição de malha para <i>gridshell</i> .....	46
2.9 Conclusão .....	48
AGRADECIMENTOS .....	49
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>50</b>
<b>3. CAPÍTULO 2 - GRIDSELL STRUCTURAL EVALUATION CRITERIA BASED ON UPWARD AND DOWNWARD MODELING METHODS IN KARAMBA3D</b> .....	<b>53</b>
ABSTRACT.....	53
3.1 Introdução .....	53
3.2 <i>Plugin</i> de análise estrutural: Karamba3D .....	54
3.3 Métodos construtivos de <i>gridshells</i> de elementos em linhas curvas .....	54
3.4 Propriedades geométricas das malhas .....	54

3.5	Fase de pré-processamento .....	55
3.6	Primeira etapa: método de modelagem ascendente .....	56
3.7	Segunda etapa: método modelagem descendente.....	57
3.8	Resultados .....	58
3.8.1	Desempenho da primeira fase de simulação: método de modelagem ascendente .....	58
3.8.2	Desempenho da segunda fase de simulação: método de modelagem descendente .....	58
3.9	Conclusão .....	59
	AGRADECIMENTOS .....	60
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>60</b>

#### **4. CAPÍTULO 4 – UMA ABORDAGEM GENERATIVA COMO FERRAMENTA PARA OBTENÇÃO DE ESTRUTURAS *GRIDSHELLS* .....**

4.1	Introdução .....	62
4.2	Composições geométricas e equilíbrio estrutural.....	63
4.3	Conceituação da gramática da forma.....	65
4.4	Teoria do <i>Lattice</i> .....	68
4.5	Procedimentos Metodológicos .....	69
4.5.1	Pré-processamento de malhas <i>lattices</i> .....	72
4.5.2	Segunda Etapa – elaboração de regras de gramática da forma para malhas <i>lattices</i> .....	75
4.6	Resultados .....	76
4.6.1	Etapa de pré-processamento de malhas <i>lattices</i> .....	76
4.6.2	Resultado da Segunda Etapa – formulação de gramática da forma para malhas <i>lattices</i> .....	83
4.7	Conclusão .....	89
	AGRADECIMENTOS .....	90
	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>91</b>

#### **5. CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS .....**

5.1	Contribuição da pesquisa.....	94
5.2	Limitações do trabalho .....	95
5.3	Sugestões para trabalhos futuros .....	95

## 1. CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL

### 1.1 Introdução

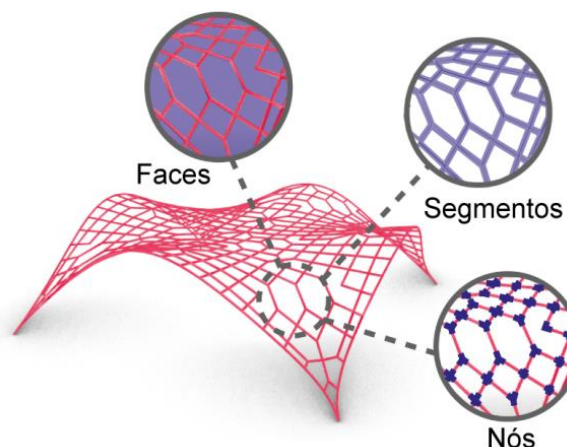
A arquitetura temporária é geralmente empregada como forma de agregar usos a espaços e contemplá-los com diferentes possibilidades de apropriação, resultando em lugares mais dinâmicos na paisagem urbana. Como o espaço público demanda constantes adequações funcionais e estéticas para comportar atividades cotidianas e eventuais, a arquitetura temporária “objetiva melhorar o desempenho de um lugar temporariamente” (ZEVI, 1997).

Para Gehl (2014) e Guatelli (2012), as arquiteturas temporárias agem como catalizadores das ações dos usuários. Para esses autores, são infraestruturas destinadas a eventos que podem transformar o uso convencional do espaço. Assim, essas apropriações temporárias são capazes de dissolver o significado de um lugar provisoriamente para gerar uma identidade nova ao espaço urbano (GUATELLI, 2012).

Paz (2008) considera que a arquitetura temporária é definida na durabilidade real da obra, sendo flexível, desmontável e/ou portátil. Portanto, para essa pesquisa, arquitetura temporária/ efêmera será considerada uma cobertura para abrigar atividades urbanas de duração determinada e que demandam adequações no espaço onde ocorre, tal como cobertura para abrigar eventos.

Dessa forma, a arquitetura efêmera é discutida nessa pesquisa pelo seu caráter transitório, que permite experimentações e inovações em tecnologia dos materiais e em sistemas construtivos. Entre as estruturas modulares com potencial para arquitetura temporária, historicamente conhecida por suas experimentações em materiais e métodos construtivos (PAZ, 2008), o trabalho terá como objetivo a criação de um processo de projeto tendo em vista o uso do *gridshell*. Essa estrutura reticular tridimensional é formada por uma coleção de segmentos de barras, nós e faces, que permitem a construção de formas complexas (Figura 1) (KUNZ; PRAUCHNER, 2015; PELLIS; POTTMANN, 2020).

Figura 1 – Composição de um *gridshell*: faces, segmentos e nós.



Fonte: os autores.

## 1.2 Justificativa

O *gridshell* associa eficiência estrutural e liberdade formal, possibilitando vencer grandes vãos (ADRIAENSSENS et al., 2014). Dessa maneira, justifica-se a utilização dessas estruturas para construções temporárias, já que proporcionam ganhos de espaço interno em flexibilidade e funcionalidade. Apesar de o *gridshell* ser utilizado como arquitetura efêmera nesta pesquisa, essa tipologia também pode ser empregada em arquiteturas de maior permanência, uma vez que o tempo estendido permite que a comunidade o assimile e esteja apta a experimentar um novo equipamento urbano (CARVALHO, 2015).

Além disso, por ser modulável, pode abranger diferentes tamanhos de estruturas, para organizar convenções, exposições, feiras, entre outros formatos de eventos para um número variado de pessoas (CHILTON; TANG, 2017).

Dessa forma, essa pesquisa justifica-se pela variedade de estudos abordando *gridshell* com malha compostas por quadrados, triângulos ou hexágonos, mas poucos estudos abordando malhas com padrões compositivos diversos. Segundo Rieffel, Valero-Cuevas e Limson (2009), o motivo da escassez de estudos com malhas com combinações de padrões se dá pela carência de métodos capazes de encontrar as composições geométricas adequadas para as malhas dessas estruturas.

Dessa maneira, buscamos estudar uma lacuna na produção acadêmica sobre *gridshell*: o processo para obtenção de padrões da malha por projeto generativo com gramática da forma, partindo do pressuposto de que a variabilidade

de geometrias geradas possui efeito direto no melhoramento da eficiência estrutural da malha.

A gramática da forma é um processo generativo de projeto baseado em regras para a produção de padrões bidimensionais ou tridimensionais. Dessa maneira, buscamos estudar o processo de desenvolvimento de padrões de malha objetivando produzir uma estrutura eficiente. Nessa pesquisa, entendemos eficiência estrutural como alterações que objetivam reduzir o consumo de material e ainda assim obter uma estrutura segura.

Apesar dos vários estudos de *gridshell* em software paramétrico e de processos generativos de gramáticas da forma, não foram encontradas pesquisas que combinem os dois processos para a formulação de malhas submetidas à simulação estrutural.

Adicionalmente, desde o início do século XXI houve rápido avanço em processamento computacional e fabricação digital, ampliando a produção das peças com uma gama maior de materiais disponíveis. Neste sentido, as malhas podem ser compostas por geometrias diversas, customizadas, e ainda assim ser fabricadas rapidamente em diferentes materiais (CHILTON; TANG, 2017).

Dessa forma, buscamos pesquisar o processo de projeto generativo de arquitetura temporária, partindo do pressuposto da customização em massa para uma cobertura efêmera. Nesse sentido, essa pesquisa colabora com estudos relacionados à modelagem paramétrica, gramática da forma e simulação estrutural no campo da Arquitetura e Urbanismo e da Engenharia Civil.

### **1.3 Objetivo**

#### 1.3.1 Objetivo geral

Investigar o processo generativo das malhas de estruturas *gridshell* a partir da gramática da forma com foco no desempenho estrutural.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

- (a) Explorar o processo de modelagem paramétrica e simulação de desempenho estrutural de estruturas *gridshell* com variedade de malhas;

- (b) Definir parâmetros formais para gramática da forma a partir do melhoramento das malhas;
- (c) Desenvolver simulações estruturais baseadas nas geometrias das malhas e sua deformação.

#### 1.4 Estrutura da dissertação

A dissertação está dividida em cinco capítulos: uma introdução geral, três capítulos de discussão e desenvolvimento da pesquisa, escritos em forma de artigo, e um capítulo de conclusões gerais. Essa dissertação segue um dos formatos sugeridos pela Pró Reitoria de Pós Graduação da Universidade Federal de Viçosa.

O capítulo 1 apresenta a introdução geral, justificativa da pesquisa, objetivos gerais e específicos e estrutura da dissertação. Nesse capítulo, expandimos a apresentação da metodologia contida no capítulo 3 (apresentada no tópico 1.5.2) devido às restrições ligadas à publicação, que impunha número máximo de páginas.

O capítulo 2 caracteriza a estrutura *gridshell* no que se refere aos detalhes construtivos, métodos construtivos, tipo de juntas (ligação entre segmentos), comportamento estrutural do *gridshell* e pesquisas que abordam a composição da malha.

O capítulo 3 objetiva responder o primeiro objetivo específico (a) de explorar o processo de criação e simulação de desempenho estrutural de estruturas *gridshell* com variedade de malhas. O foco está no teste de metodologia aplicada na análise do processo construtivo do *gridshell* no *software* Karamba3D<sup>1</sup> versão 1.2.2, para *Grasshopper*. Este capítulo foi publicado como artigo na XXIV Conferência Internacional da Sociedade Ibero-Americana de Gráfica Digital em 2020.

No capítulo 4 foram investigados os objetivos específicos (b) e (c). Nele foi analisada a formulação de regras de gramática da forma para malhas de *gridshell* e a simulação de desempenho estrutural.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões dos capítulos 2, 3 e 4, bem como as limitações e contribuições do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

---

<sup>1</sup> Site para *download*: <https://www.karamba3d.com/>

## 1.5 Resumo das abordagens metodológicas

### 1.5.1 Métodos adotados no capítulo 2.

O capítulo 2 apresenta uma metodologia para a revisão bibliográfica desenvolvida a partir de artigos científicos, teses, dissertações e livros nas bases de dados do *Cumincad*, *Scopus*, *Google Acadêmico*, *Science Direct* e Periódicos Capes entre 2010 e 2021.

Entre 260 documentos encontrados nessas bases de dados, foram selecionados 20 trabalhos que discutiam assuntos relacionados aos aspectos teóricos e construtivos do *gridshell*, como: comportamento estrutural, classificação do *gridshell*, métodos construtivos, tipos de nós e composição de malhas.

Com relação ao comportamento estrutural, foram identificadas pesquisas que abordam o comportamento de estruturas espaciais objetivando compreender os esforços predominantes e sua atuação em *gridshells* compostos por uma malha ou duas.

Para classificação dessas estruturas, foram pesquisados trabalhos que apontam os níveis de complexidade e recomendações sobre o processo de projeto de *gridshells*, além de demonstrar o processo de amadurecimento dessa estrutura ao decorrer do tempo.

Em métodos construtivos, foram identificadas pesquisas que abordam os métodos de construção e elevação dessas estruturas e sua influência nos tipos de nós para fixação dos segmentos.

Por fim, identificou-se pesquisas que abordam a composição das malhas como forma de otimização da eficiência estrutural dos *gridshells* a fim de entender os métodos comumente empregados.

### 1.5.2 Métodos adotados no capítulo 3

O capítulo 3 apresenta a metodologia para a utilização do *plugin Karamba3D* versão 1.2.2 (PREISINGER, 2013). Esse *plugin* é uma ferramenta paramétrica de simulação estrutural por meio de análise de elementos finitos (FEA) totalmente integrado ao *Grasshopper* e ao *Rhinoceros* (PREISINGER, 2013).

O *Karamba3D* avalia o desempenho de treliças espaciais e cascas com base na carga aplicada e propriedades dos materiais, simulando como as forças se distribuem pela estrutura. Além disso, fornece uma interface que demonstra o resultado por meio de um gráfico de cores na própria estrutura (ELIASSEN; HUSEBY, 2018).

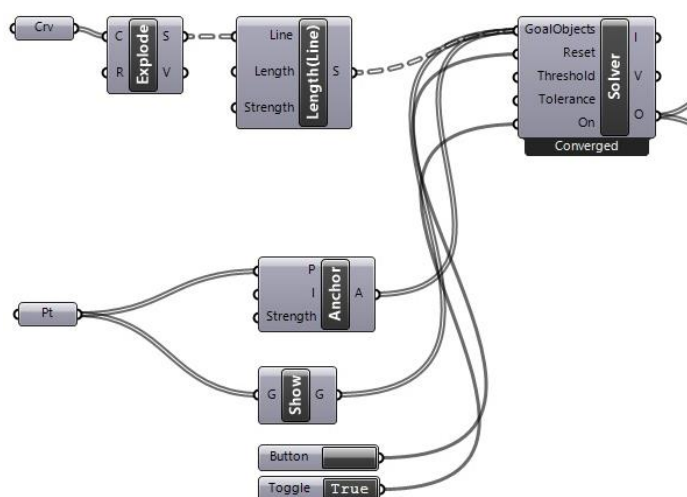
O fluxo de informação no *Karamba3D* é organizado pela definição dos seguintes dados: geometria, elementos de vigas, suportes, tipo de nó, material, e atribuição de cargas. Após a inserção dos dados de entrada, um componente do *plugin* coleta as informações e realiza a análise estrutural.

O *Karamba3D* lê os segmentos da malha e define os elementos de barras associados ao componente, selecionando o tipo de nó ou junta em suas extremidades. Consideramos juntas as ligações entre as extremidades dos segmentos (nós rígidos).

Selecionamos o material Aço 235 em formato tubular/circular entre as opções com propriedades já embutidas no *Karamba3D*. Definimos a geometria da seção transversal como 13,95cm de diâmetro. As espessuras da chapa variam entre 0,5cm e 1,5cm. O *gridshell* possui base quadrada de 25m por 25m.

A especificação dos suportes ocorre por seleção manual de uma serie de pontos localizados no plano XY e nos encontros entre os segmentos das malhas. Os pontos são inseridos no *Karamba3D*, que caracteriza a condição de suporte. Dessa forma, optamos por suportes rígidos, introduzidos no componente “Pt” e associados ao componente “Anchor” como pontos de âncora (Figura 2).

Figura 2 – Geometria da malha gerada pelo Kangaroo Solver.



Fonte: Os autores.

A gravidade e cargas imperfeitas, ou excêntricas, foram aplicadas uniformemente em toda a estrutura. Segundo Preisinger (2013), não existe viga perfeitamente vertical. Assim, as forças imperfeitas devem ser aplicadas em vigas que se desviam. As cargas foram projetadas uniformemente em toda a superfície com valores sugeridos no manual do *Karamba3D*, atuando no eixo Z negativo, correspondentes as forças gravitacionais. Todas essas informações são coletadas em um componente que executa as análises e projeta um gráfico de cores na estrutura que facilita a visualização.

Nas análises das simulações, foram considerados os valores de *Utilization*, que informam em porcentagem a capacidade máxima de estresse do material em relação à carga aplicada. Portanto, nessa pesquisa consideramos valores de *Utilization* de tração e compressão como índices que quantificam a capacidade de carga média do *gridshell*, bem como a massa da estrutura.

Valores de *Utilization* consideram as propriedades do material. Por isso, o material foi escolhido dentre uma lista de materiais já configuradas pelos desenvolvedores do *plugin*. Estruturas com valores de utilização próximos de 100% foram considerados eficientes, uma vez utilizam a capacidade de carga nominal máxima do elemento. Destaca-se que o *Karamba3D* trabalha com a resistência de limite último e fornece níveis de segurança de 40%, portanto um *Utilization* acima de 100% não leva ao colapso da estrutura.

As simulações foram desenvolvidas considerando a composição geométrica da malha, número de suportes e método construtivo. Os padrões das malhas foram simulados para compreender as melhores composições para o desempenho estrutural, ao mesmo tempo, propomos uma discussão paralela entre os métodos de construção ascendente e descendente.

A metodologia se divide em três etapas: pré-processamento, método de modelagem ascendente e método de modelagem descendente. A fase de pré-processamento teve o objetivo de analisar parâmetros de composição geométrica, densidade e dimensão dos segmentos e sua relação com o desempenho estrutural. Portanto, produzimos um código simplificado e analisamos dez malhas produzidas no *plugin Parakeet*<sup>2</sup> versão 0.8.2 para *Grasshopper*, que possui uma coleção de

---

<sup>2</sup> Site para *download*: <https://www.food4rhino.com/en/app/parakeet>

componentes de produção geométrica, e três malhas regulares modeladas no *Rhinoceros*<sup>6</sup>. Na figura 2, apresentada acima, as malhas são introduzidas no componente “*Crv*” do algoritmo para *Grasshopper* que lê os segmentos das malhas como curvas. Essas curvas representam o eixo dos segmentos, posteriormente introduzidos no *Karamba3D* como vigas.

A fase de pré-processamento ocorreu usando o método de modelagem ascendente, que se caracteriza por uma malha montada num plano e elevada a posição final. Nessa fase, treze malhas foram modeladas usando um algoritmo mais elaborado para *Grasshopper*. Para isso, usamos o componente *Kangaroo Physics*<sup>3</sup> versão 2.42 para gerar a forma por relaxamento dinâmico, representado pelo componente “*Solver*” (PIKER, 2013). Essa técnica traça o movimento da estrutura sob o carregamento aplicado e pode ser utilizada como método de geração da forma do *gridshell* (ADRIAENSSENS et al., 2014).

Após os testes usando a modelagem ascendente, simulamos as treze composições da etapa anterior usando o método de modelagem descendente, no qual a estrutura é modelada em uma casca com forma correspondente.

Nessa etapa, otimizamos as cascas utilizando o *plugin Octopus*<sup>4</sup> versão 0.4. O *Octopus* permite a busca por vários objetivos simultaneamente e aumenta a chance de soluções otimizadas, uma vez que seus algoritmos exploram o maior número de soluções possíveis, conforme os parâmetros selecionados (FONSECA et al., 2017). Nessa pesquisa, buscamos por uma estrutura com a melhor eficiência estrutural, que nesse recorte compreende menor gasto de material possível, máxima altura, menor peso e deformação.

O *Octopus*, “[...] possibilita também determinar o tamanho da população que será criada a cada geração, e como critério de parada o usuário pode estabelecer um número máximo de gerações” (FONSECA et al., 2017 p.270).

Dessa forma, selecionamos 30 gerações com uma população de 50 indivíduos de forma a viabilizar a otimização em termos de tempo computacional e capacidade do computador. Na simulação, a convergência de soluções também foi utilizada como critério para a parada, observando o gráfico fornecido pelo *plugin* (Figura 3). Cada linha é referente a um parâmetro, dessa forma, quanto mais próxima às linhas, mais próximo a simulação está da convergência, em que o

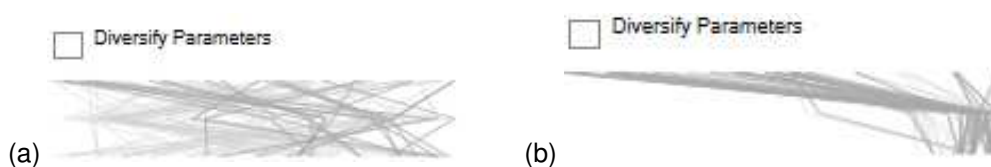
---

<sup>3</sup> Site para *download*: <https://www.food4rhino.com/en/app/kangaroo-physics>

<sup>4</sup> Site para *download*: <https://www.food4rhino.com/en/app/octopus>

*plugin* chega às melhores soluções (FONSECA et al., 2017). A convergência do modelo ocorreu na geração 10. Na figura 3 foi representada a primeira geração (a) e a décima (b).

Figura 3 – (a) Gráfico de convergência da primeira geração e (b) a décima no Octopus.

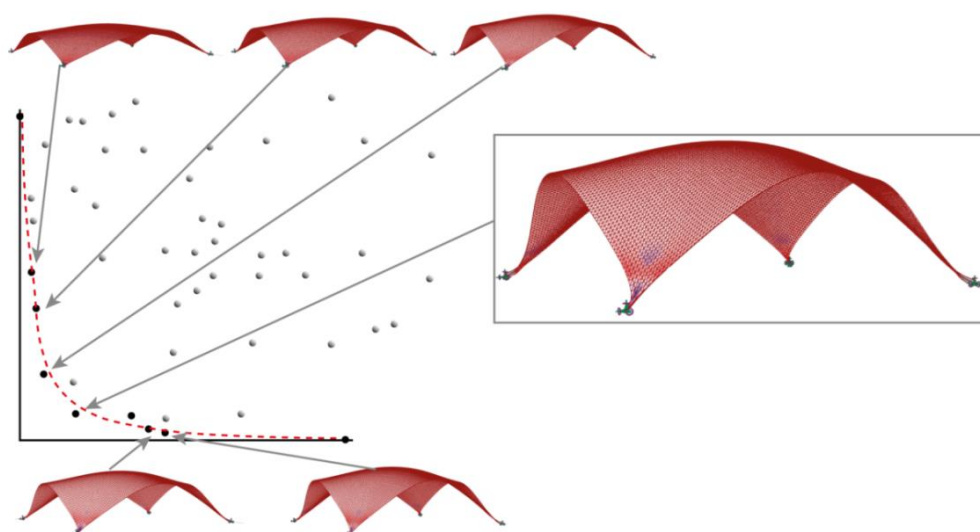


Fonte: os autores.

Os resultados da otimização são podem ser exportados do *Octopus* e em forma gráfica, formam uma Curva de Pareto. Os resultados que formam a curva são considerados soluções viáveis. Dessa forma, entre todas as estruturas, selecionamos apenas modelos que se encontrassem no joelho da curva.

A casca foi selecionada com base nos valores de *Utilization*, dessa forma, a casca possui dez metros de altura, utilização de compressão de -95,5% e utilização de tração 55,7%, com massa 82998,8 Kg, de acordo com a análise realizada no *Karamba3D* (Figura 4). Essa casca foi transformada em um *gridshell* correspondente aplicando as malhas utilizadas nas etapas anteriores.

Figura 4 – Curva de otimização - Curva de Pareto.



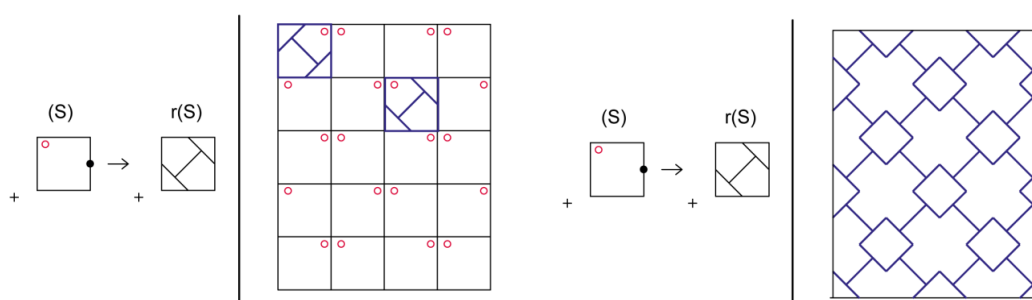
Fonte: os autores.

### 1.5.3 Métodos adotados no capítulo 4

O método estudado no Capítulo 4 está associado aos Objetivos Específicos B e C. Nessa etapa é apresentado o processo generativo de gramática de redes quadriculadas (*Checkerboard lattice grammar*), ou *lattices*.

A gramática da forma para *lattices* diferencia-se de uma gramática da forma padrão, pois as regras são aplicadas em um *grid* rotulado, que funciona como um plano de distribuição que demonstra a orientação no qual a regra deve ser aplicada. Como exemplo, na figura 5, a regra (S) tem um rótulo em vermelho indicando a posição da regra na malha, portanto, quando a regra (S) for substituída pela regra  $r(S)$ , esta será posicionada conforme a indicação do rótulo. Dessa forma, a figura 5 demonstra a malha em que as regras são aplicadas e a malha resultante da aplicação da regra  $r(S)$  em todos os módulos rotulados.

Figura 5 – Regra aplicada em uma malha rotulada.



Fonte: os autores.

Em todas as simulações, as estruturas foram modeladas em método descendente utilizando a suíte de modelagem *Rhinoceros3D + Grasshopper* e o *plugin Karamba3D*. Como discutido anteriormente, a modelagem por método descendente é caracterizado por uma casca no qual a *gridshell* se apoia.

Consideramos uma casca de concreto de base quadrada de 24x24m, que passou por um novo processo de otimização no *Octopus*. Como objetivo da otimização, buscamos maior eficiência estrutural, atingindo maior altura e menor massa e deformação.

Nesse capítulo são propostas duas etapas metodológicas, partindo das hipóteses de que a gramática da forma pode ampliar a variabilidade compositiva das malhas e possivelmente resultar na melhora da eficiência estrutural do *gridshell*.

Na primeira etapa foram desenvolvidos testes com malhas *lattices* já publicados na literatura (GRASL. ECONOMOU, 2018; ECONOMOU. HONG, 2018). Ela atua como uma fase de pré-processamento na qual analisamos as cinco malhas *lattices* geradas a partir do método definido por Grasl e Economou (2018) a fim de entender as combinações de regras que resultam em estruturas *gridshell* com melhor eficiência estrutural.

Na segunda etapa são elaboradas novas malhas baseadas nos parâmetros observados na primeira fase. Essas novas malhas são submetidas à simulação no Karamba3D com o objetivo de verificar as características geométricas favoráveis ao desempenho estrutural.

## REFERÊNCIAS

ADRIAENSSENS, S.; BLOCK, P.; VEENENDAAL, D.; WILLIAMS, C. **Shell structures for architecture. Form finding and optimization.** 1 ed. Oxon: Routledge, 2014, 338p.  
ISBN: 978-0-415-84060-6

CARVALHO, D. **Gidshells em madeira: morfologia, aplicabilidade, comportamento estrutural e projeto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e tecnologia, Universidade de Coimbra. Coimbra, 2015.

CHILTON, J.; TANG, G. **Timber Gridshells; Architecture, structure and craft.** 1. ed  
London: Routledge, 2017, 404 p.  
ISBN 9781138775305

DIMCI, M. **Structural Optimization of Grid Shells based on Genetic Algorithms Stuttgart.** Dissertação (Doutorado em Arquitetura) – Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen, Universität Stuttgart. Stuttgart, 2011.

ECONOMOU, A.; HONG, K. Ice-ray Tilings. **Shape Computational Lab.** Disponível em: [https://shape.design.gatech.edu/Research/Projects/2018\\_Tilings/index.html](https://shape.design.gatech.edu/Research/Projects/2018_Tilings/index.html) . Acesso em: 26 jan. 2021.

ELIASSEN, M.; HUSEBY, A. **The Digital Workflow of Parametric Structural Design Developing Grid Shells in a Nordic Climate.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Faculty of Engineering Science and Technology, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2018.

FONSECA, L.; NUNES, V.; SANTANA, L.; CARLO, J.; JÚNIOR, K. Otimização multiobjetivo das dimensões dos ambientes de uma residência unifamiliar baseada em simulação energética e estrutural. **Ambiente Construído.** v. 17, n.1, p 267-288, jan./mar. 2017.

DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000100135>

GEHL, J. **Cidades para pessoas.** 2 ed. São Paulo: Perspectiva, 2014, 280 p.  
ISBN: 9788527309806

GRASL, T.; ECONOMOU, A. From shapes to topologies and back: an introduction to a general parametric shape grammar interpreter. **Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing,** v. 32, p. 208–224, 2018.

DOI: 10.1017/S0890060417000506

GUATELLI, I. **Arquitetura dos Entre Lugares: Sobre A Importância Do Trabalho Conceitual.** 1 ed. São Paulo: Editora Senac, 2012, 200 p.

ISBN-10: 8539601982

ISBN-13: 978-8539601981

ISBN 9781138775305

KUNZ, M.; PRAUCHNER, M. B. Uso do Sistema Estrutural Gridshell na Criação de Formas Complexas em Estruturas de Madeira. **Revista de Arquitetura IMED,** v. 4, n. 1, p. 19–25, 30 jun. 2015.

DOI: 10.1590/s1678-86212020000100374

PAZ, D. Arquitetura temporária ou transitória. Esboços de uma caracterização. **Vitruvius**, São Paulo, n. 102.06, nov. 2008. Arqtextos. Disponível em: <https://vitruvius.com.br/revistas/read/arqtextos/09.102/97>. Acesso em: 15 jul. 2019.

PELLIS, D.; POTTMANN, H. Geometry and Statics of Optimal Freeform Gridshells. In: Proceedings of Baustatik, 2020, Universität Stuttgart, Stuttgart. **Anais eletrônicos ...** Stuttgart: 2020. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/340953781\\_Geometry\\_and\\_Statics\\_of\\_Optimal\\_Freeform\\_Gridshells](https://www.researchgate.net/publication/340953781_Geometry_and_Statics_of_Optimal_Freeform_Gridshells). Acesso em: 10 dez. 2020.

PIKER, D. Kangaroo: Form Finding with Computational Physics. **Architectural Design**, v.83, n. 2, p.136-137, 12 mar. 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.1002/ad.1569>

PREISINGER, C. Linking Structure and Parametric Geometry. **Architectural Design**, v. 83, n. 2, p.110–113, mar. 2013.  
DOI: 10.1002/ad.1564

RIEFFEL, J.; MALERO-CUEVAS, F.; LIMSON, H. Automated discovery and optimization of large irregular tensegrity structures. **Computers and Structures**, v. 87, n.5, p 368-379, 1 mar. 2009.  
DOI: 10.1016/j.compstruc.2008.11.010

STINY, G. Ice-Ray: A Note on the Generation of Chinese Lattice Designs. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v.4, n.1, p. 89–98, 1977.  
ISBN:-

ZEVI, B. **A linguagem moderna da arquitetura: guia ao código anti-clássico**. 1. Ed. Lisboa: Publicações Dom Quixote, 1997, 175p.  
ISBN:-

## 2. CAPÍTULO 2 – ASPECTOS TEÓRICOS E CONSTRUTIVOS DO GRIDSHELL

### RESUMO

Os *gridshells* são estruturas que são geradas pela deformação de uma malha de elementos lineares até formar a curvatura da estrutura. Essas estruturas são consideradas estruturalmente eficientes, com quantidade de material reduzida, principalmente se comparadas a estruturas de cascas contínuas (CARVALHO, 2015). Essas estruturas permitem grande variabilidade arquitetônica, por isso o projetista precisa entender o comportamento estrutural e métodos construtivos dos *gridshells*. Dessa forma, este artigo tem como objetivo realizar um levantamento bibliográfico dos principais conceitos, apresentando a história dos *gridshells*, casos práticos, comportamento estrutural, classificação, métodos construtivos, tipos de juntas e malhas. A revisão bibliográfica foi realizada a partir das bases de dados do *Cumincad*, *Scopus*, *Google Acadêmico*, *Science Direct* e Periódicos Capes, no qual foram selecionados 260 pesquisas ao qual foram reduzidas a 23 após a retirada de trabalhos repetidos ou que não preenchessem os critérios elaborados. Com a seleção de estudos, verificamos potenciais soluções construtivas considerando o escopo deste trabalho em que visa à variabilidade dos segmentos das malhas. Dessa forma, vislumbra o processo de projeto de *gridshells* de membros discretos e nós rígidos.

Palavras-chave: Processos construtivos; comportamento estrutural; geometria de malha.

## 2.1 Introdução

*Gridshell* é uma tipologia de estrutura com comportamento estrutural que se assemelha a cascas, cúpulas e geodésicas. A vantagem da utilização do *gridshell* está no controle dos segmentos constituintes da malha, na facilidade da fabricação das peças que podem ser padronizadas ou não, na leveza da estrutura, na alta resistência a cargas e principalmente na possibilidade de vencer grandes vãos apenas com os apoios nas extremidades (CARVALHO, 2015).

No contexto dessa pesquisa, em que se busca a eficiência estrutural, é importante entender questões relacionadas aos aspectos teóricos e construtivos do *gridshell*. Portanto, este capítulo tem como objetivo desenvolver o levantamento bibliográfico sobre métodos construtivos de *gridshells*, além do estado da arte em composições de malhas e gramática da forma.

## 2.2 Procedimentos metodológicos

A revisão de literatura foi elaborada a partir de pesquisas nas bases de dados do Cumincad, Scopus, *Google Acadêmico*, Science Direct e Periódicos Capes no período entre 2010 e 2021. As palavras-chaves utilizadas foram “*gridshells*”, “*structural behavior*”, “*constructive methods*”, “*form-finding*”, “*mesh geometry*” e “*mesh pattern*” aplicados juntos e separadamente usando operações booleanas.

Somando os resultados encontrados em todas as bases de dados, foram 260 artigos, livros, dissertações de mestrado e teses de doutorado. Após a leitura dos títulos e dos resumos, recusamos os documentos que não suprissem os critérios selecionados nessa revisão, ou seja, trabalhos que não abordavam a composição de malha, métodos construtivos ou classificação, bem como os estudos repetidos. Dessa forma selecionamos 23 trabalhos que abordam os aspectos teóricos e construtivos do *gridshell* para leitura na íntegra.

Dividimos as seções de revisão conforme os assuntos relacionados à história do *gridshell*, comportamento estrutural, classificação do *gridshell*, métodos construtivos, tipos de nós e composição de malhas.

## 2.3 Revisão de literatura

### 2.3.1 História do gridshell

Inicialmente os *gridshells* foram utilizados como abrigo portátil para os povos do deserto da Mongólia, construídas com treliças de bambu, que formavam uma parede de perímetro circular e eram cobertas com peles de animais ou tecido (CHILTON; TANG, 2017).

Para Bechthold (2008 apud NAICU, 2012), *shells* modernas como conhecemos, derivaram da construção de cúpulas e abóbodas. Em sua primeira geração, essas estruturas eram construídas para vencer grandes vãos de maneira econômica, principalmente em fábricas e hangares.

Na segunda fase, a estrutura ressurgiu de forma sofisticada, em um período de grande desenvolvimento tecnológico em métodos construtivos e em melhoramento de materiais, tornando-se uma forma estruturalmente expressiva de arquitetura (BECHTHOLD, 2008 apud NAICU, 2012).

#### 2.3.1.1 Primeira geração

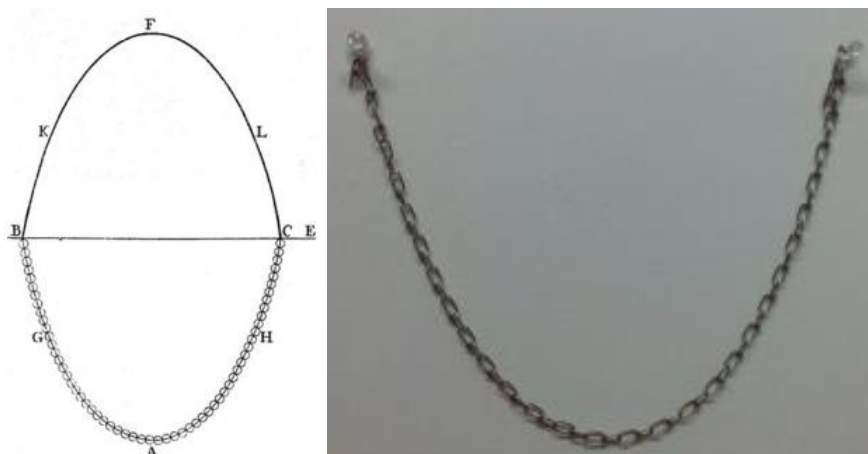
Entre 1912 e 1939 o *gridshell* foram caracterizado pelas descobertas de Vladimir Shukov (1853-1939) e do arquiteto alemão Frei Otto (1925–2015), que empregava métodos construtivos de catenária, semelhantes ao de Antoni Gaudí (CARVALHO, 2015).

Uma curva catenária ou funicular é gerada quando um elemento linear flexível, resistente apenas às forças de tração axial, como corda ou corrente, é suspenso entre dois pontos de apoio e carregado apenas por seu peso próprio” (CHILTON. TANG, 2017 p. 26, tradução dos autores<sup>5</sup>)

Esse método consistia em produzir em tamanho reduzido um sistema para determinar a geometria espacial de uma estrutura sem fórmulas matemáticas. Valendo-se de uma rede presa em suas extremidades e pesos distribuídos em intervalos distintos, podiam-se definir as formas de arcos parabólicos (Figura 1). Os pesos reproduziam o carregamento da estrutura e a corda, material flexível, o caminho do carregamento (CARVALHO, 2015).

<sup>5</sup> “A CATENARY OR funicular curve is generated when a flexible linear element, resistant only to axial tensile forces, such as a rope or chain, is suspended between two support points and loaded only by its self-weight” (CHILTON. TANG, 2017 p. 26).

Figura 1– Modelo de curvatura obtida por técnica da catenária.



Fonte: Chilton e Tang (2017).

Contudo, a maior descoberta de Otto, foi perceber que a rede suspensa poderia ser construída em um plano utilizando uma malha treliçada semirrígida e depois elevada à posição final (CHILTON. TANG, 2017), dando origem a estruturas *gridshell*. Como exemplo de edificação na primeira geração, pode ser citado o *German Building Exhibition* e o *Multihalle and Restaurant*.

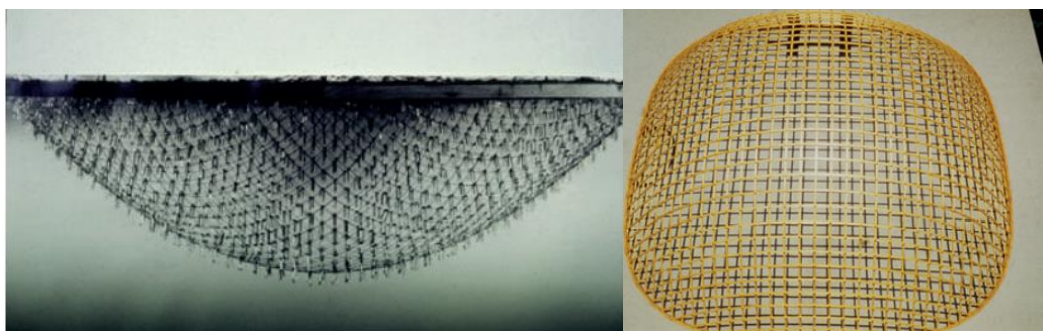
- German Building Exhibition, Essen, Alemanha, 1962.

O German Building Exhibition foi a primeira estrutura em *gridshell* experimentada em escala real por Frei Otto e Bernd Friedrich Romberg, utilizando a técnica da catenária em estruturas de madeira (figura 2). O German Building Exhibition é uma estrutura com uma única camada de malha, com lados de 15x15m e bordas arredondas e curvatura de altura de 16,82m em seu ponto mais alto (CHILTON; TANG, 2017).

Essa estrutura foi construída com ripas de madeira laminada numa superfície plana, posteriormente erguida à posição final por guindastes, com nós travados por parafusos e bordas fixadas no solo por um sistema de ancoragem. O acesso ao interior do *gridshell* foi criado após a elevação da estrutura, cortando as madeiras e criando reforços nos segmentos adjacentes à abertura (CHILTON; TANG, 2017).

A criação desse *gridshell* foi essencial para a construção do *Multihalle and Restaurant* em 1975, uma vez que essa estrutura trouxe um melhor entendimento do comportamento estrutural do *gridshell* (CHILTON; TANG, 2017).

Figura 2 – German Building Exhibition.



Fonte: Chilton e Tang (2017).

- *Multihalle and Restaurant*, Mannheim, Alemanha, 1975

O Multihalle foi construído para ser um salão multifuncional para um evento de horticultura patrocinado pelo governo alemão (Figura 3). A estrutura foi projetada por Frei Otto e Ewald Bubner em parceria com Carlfried Mutschler *and Partner* e os engenheiros do Ove Arup & *Partners*. O projeto consistia em duas cúpulas de madeira interligadas por uma passarela, sendo que essas cúpulas eram compostas por duas malhas treliçadas sobrepostas. O *gridshell* foi construído em madeira para ser flexível a ponto de curvar e formar uma concha, mas rígida o suficiente para resistir à flambagem (CHILTON; TANG, 2017).

Figura 3 – Cobertura do Multihalle *and Restaurant*.



Fonte: Chilton e Tang (2017).

O salão multifuncional tem 60m de comprimento com altura de 20m em seu ponto mais alto, sendo ainda hoje a maior estrutura *gridshell* de madeira. Em 1975, ano de sua conclusão, foi considerada a estrutura mais cara do século XX, e foi

responsável por popularizar estruturas de madeira como tipologia para arquitetura de grandes vãos (CHILTON; TANG, 2017).

O processo de projeto partiu de modelos de correntes suspensas da catenária como forma de derivação de geometria da estrutura (figura 4). Além disso, também foi utilizada uma técnica de localização para encontrar os nós exatos em que a malha deveria ser ligada a andaimes para içá-las (CHILTON; TANG, 2017).

Figura 4 – Modelo físico da geração da forma do *Multihalle and Restaurant*.



Fonte: Chilton e Tang (2017).

Mannheim Multihalle é significativo pelo processo de projeto em uma época que pouco se discutia sobre cascas e construções leves com geometrias complexas (CHILTON; TANG, 2017).

### 2.3.1.2 Segunda geração

Existem discrepâncias entre alguns autores em relação ao ano de início da segunda geração do *gridshell*. Para Bechthold (2008 apud NAICU, 2012) iniciou-se em 1960, quando algumas técnicas de construção e análise estrutural foram desenvolvidas. Já para Chilton e Tang (2017), iniciou-se após a construção do Mannheim Multihalle em 1975. Ambos os autores concordam que na segunda geração, essas estruturas tornaram-se mais populares, abrigando igrejas, instalações esportivas e infraestruturas temporárias para eventos (NAICU, 2012).

Nesse período, além da madeira, popularizou-se também o uso de aço e concreto, pois eram considerados materiais mais controláveis, se comparados à

madeira que apresentava imperfeições. Arquitetos como Félix Candela e Pier Luigi Nervi foram os principais inovadores durante este período, desenvolvendo cascas contínuas, estruturas de membranas e redes de cabos, que constituíam uma classe de estrutura classificada como “estruturas espaciais” (NAICU, 2012). Na segunda geração, destaca-se o *gridshell* de Weald And Downland.

- The Weald And Downland *Gridshell*, Singleton, Reino Unido, 2002

Essa estrutura foi projetada por Edward Culling *Architects* em associação com o engenheiro de estruturas Buro Happold, como parte de um edifício para o museu ao ar livre de Wee and Downland, no Reino Unido (Figura 5). Assim como Multihalle and Restaurant, o The Weald And Downland foi construído em uma superfície plana e depois erguido à posição final. Essa estrutura tem 50m de comprimento e 16m de largura nas partes mais amplas e 12,5m nas partes mais estreitas. A altura varia de 9,5m nas partes mais altas e 7,25m nos pontos mais baixas (CHILTON; TANG, 2017).

Desde a construção do Mannheim Multihalle houve avanços em análises estruturais em *computer-aided design* (CAD). Assim, em Downland foram utilizados modelos digitais para análises estruturais, bem como modelos físicos. Em conjunto com Chris Williams, da Universidade de Bath, o Downland avançou em entender o comportamento de estruturas *gridshell* em madeira e em estudos sobre os nós (CHILTON; TANG, 2017).

Figura 5 – Vista da cobertura e interior do *gridshell* de Weald and Downland.

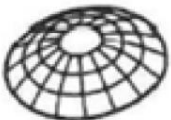
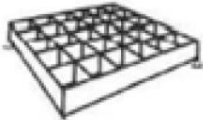
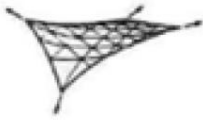
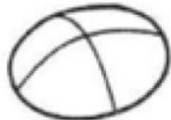


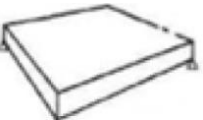


Fonte: Chilton e Tang (2017).

## 2.4 Comportamento estrutural do *gridshell*

Estruturas espaciais se caracterizam por vencer grandes vãos com grande elevação e capacidade de resistência a cargas. Existem três tipos de estruturas espaciais que se diferenciam pelo tipo de esforço predominante. Assim, “distinguem-se as treliças, concebidas para resistir a esforços de flexão; os cabos, para resistir a esforços de tração; [e] os arcos, solicitados à compressão” (CARVALHO, 2015 p.29). A tabela 1 exemplifica os esforços a que as tipologias estão sujeitas.

Tabela 1 – Tipologia de estrutura e esforço predominante.

Compressão	Flexão	Tração
		
Gridshell	Grelha de vigas	Rede de cabos
		
Casca	treliça espacial	membranas
		
	Laje	

Fonte: Imagens adaptadas de Carvalho (2015).

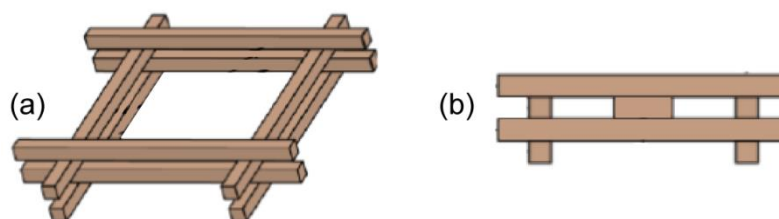
Dessa forma, o *gridshell* é um tipo de estrutura espacial que se assemelha em comportamento estrutural a cascas. Portanto, essa estrutura é predominantemente sujeita a compressão (CARVALHO, 2015). Casca e *gridshell* se diferem no sentido em que as cargas são dispersas. Enquanto a casca redireciona as forças em todos os sentidos, o *gridshell* transfere as cargas axialmente na direção do eixo longitudinal de seus segmentos (ADRIAENSSENS et al., 2014) minimizando a quantidade de material para cobrir espaços de grande envergadura, uma vez que são compostas por segmentos em vez de um único elemento contínuo (BEGHINI et al., 2014; CUVILLIERS et al., 2017).

Contudo, a constituição de segmentos do *gridshell* faz com que sejam estruturas mais suscetíveis ao cisalhamento, sendo, por vezes, necessária a

adição de um elemento diagonal ou contraventamento para estabilização, segurança e para que não ocorram grandes deformações (CAFFARELLO, 2016).

Além disso, *gridshell* podem contar com dupla camada de malha, conforme a figura 6, permitindo curvaturas maiores com menor deformação da estrutura. Em estruturas de madeira, essa configuração pode minimizar problemas causados por defeitos nas tábuas (NAICU; HARRIS; WILLIAMS, 2014).

Figura 6 – Malha com dupla camada (a) e vista lateral (b).



Fonte: Imagens adaptadas de Naicu, Harris e Willians (2014).

## 2.5 Classificação do *gridshell*

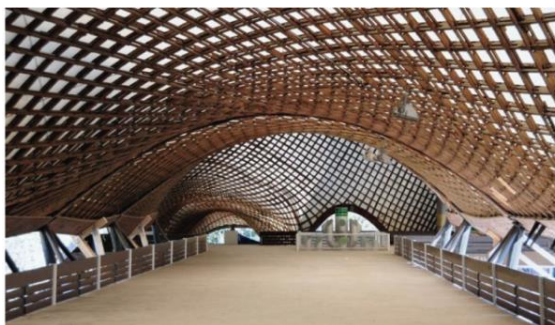
As classificações propostas por Naicu (2012), Chilton e Tang (2017) e Charest et al., (2019) são utilizadas nessa pesquisa como embasamento teórico para reconhecer e identificar níveis de complexidade dos *gridshell*. Dessa forma é possível fornecer informações e recomendações sobre como projetar esse sistema considerando a constituição dos segmentos, material, contorno da superfície e composição da malha.

### 2.5.1 Constituição dos segmentos

Naicu (2012) discute a classificação dos *gridshell* a partir da constituição dos segmentos, da escolha do material e da forma de construção e montagem. Dessa forma, o autor os divide em dois tipos: malha com membros contínuos e malha com membros discretos.

As estruturas com membros contínuos são constituídas por ripas longas que se estendem por toda a estrutura, sem necessidade de conexões nodais individuais (Figura 7). Em estruturas desse tipo é possível ter uma fabricação padronizada, podendo ser constituída de madeira, papelão ou fibra de vidro (NAICU, 2012).

Figura 7 – Exemplos de *gridshell* de membros contínuos.



Madeira: Mannheim complex, Mannheim, Alemanha.



Papelão: Japan Pavilion, Hannover, Alemanha.



Fibra de Vidro: Experimental pavilion, Institut Navier, ENPC, França.

Fonte: Imagens adaptadas de Naicu (2012) , Adriaenssens et al. (2014) e Douthe, Caron e Baverel (2010).

Como demonstrado na figura 7, o Mannheim *Complex* foi construído em perfis de madeira contínua e nós exclusivos, o que inicialmente simplificaram construção do *gridshell* (NAICU, 2012). Porém, como discutido por Chilton e Tang (2017), esse tipo de segmento exige um canteiro de obras grande o suficiente para a manipulação dos perfis, uma vez que é preciso movimentá-los por meio de esteiras e andaimes, resultando em uma construção mais lenta.

Por sua vez, membros discretos são estruturas *gridshells* constituídas por segmentos menores que se conectam em nós, geralmente fabricados fora do local da obra, como exemplificado na figura 8. Dessa forma, a madeira e aço são materiais comumente utilizados para a construção dos segmentos (NAICU, 2012).

Figura 8 – Exemplos de *gridshell* de membros discretos.



Madeira: Pods Sports Complex, Scunthorpe, Inglaterra.



Aço: British Museum Great Court Roof, London, Inglaterra.



Aço: Smithsonian American Art Museum, Washington DC, Estados Unidos.

Fonte: Imagens adaptadas de Naicu (2012) .

Apesar dos segmentos mais curtos e, portanto, mais fáceis de manipular, estruturas com membros discretos tendem a ser mais difíceis de montar, uma vez que cada segmento e nó têm um ângulo e posição específica para criar a curvatura da estrutura (NAICU, 2012).

Dessa forma, pode existir uma diversidade de nós entre os segmentos que aumenta a complexidade da fabricação e a construção do *gridshell*. Contudo, em estruturas de membros discretos é possível explorar geometrias complexas com malhas com composições diversas de maneira facilitada (CHILTON; TANG, 2017). Logo, tendo em vista o objetivo de buscar a variabilidade das combinações de polígonos, consideramos *gridshells* de membros discretos mais apropriados, uma vez que é possível mudar a posição de um segmento de maneira localizada.

## 2.5.2 Geometria da superfície, composição da malha e do material

Para Charest et al. (2019), o *gridshell* pode ser classificado conforme a complexidade da superfície, da malha e da disposição do material. Os tópicos seguintes sintetizam e a pesquisa desenvolvida pelos autores, que consideram que variações, mesmo que sutis, podem afetar o comportamento do material e o






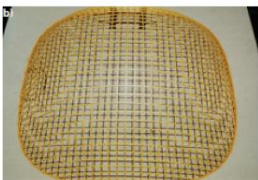


comportamento estrutural. Ao categorizar o *gridshell*, Charest et al. (2019) analisaram cerca de 60 estruturas entre 1962 e 2010.

### 2.5.2.1 Classificação pelo contorno da superfície

Pela condição da superfície, os autores dividem entre: estrutura com curvatura simples, dupla curvatura, forma livre e estruturas com dobras (CHAREST et al., 2019) (Tabela 2).

Apesar do *gridshell* de curvatura simples apresentar construção aparentemente menos complexa, as primeiras estruturas deste tipo foram desenvolvidas em curvatura dupla com a German Building em 1962 e em forma livre com a Mannheim Complex em 1975. Segundo o artigo de Charest et al., (2019), o primeiro *gridshell* de curvatura simples foi construído em 1995 com o Boat House na Suíça. Como visto, o *gridshell* é uma tipologia arquitetônica historicamente exploratória, uma vez que busca soluções para materializar geometrias complexas.

Tabela 2 – Classificação do *gridshell* pela forma.

Forma			
			
Curvatura simples	Curvatura dupla	Forma livre	Forma com dobras
			
Boat House, Suíça.	German Building Exhibition, Alemanha.	Mannheim complex, Mannheim, Alemanha.	Solemar Therme, Alemanha.

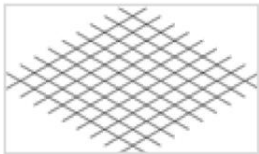
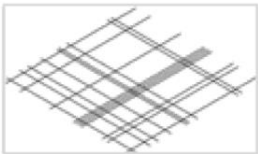
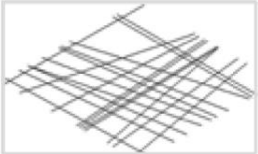





Fonte: Imagens adaptadas de Charest et al. (2019) e Chilton e Tang (2017).

### 2.5.2.2 Composição da malha

Quanto a disposição dos segmentos das malhas, Charest et al. (2019) dividem malhas entre: estruturas com malhas regulares e segmentos equidistantes

ortogonais; malhas ortogonais com variação nas distâncias entre os segmentos; malhas com segmentos que se desviam; e malhas em que os segmentos se interceptam (Tabela 3).

Tabela 3 – Classificação por composição da malha do *gridshell*.

Estrutura			
			
Equidistante	Ortogonal	Desvio	Interseção
			
Mannheim complex, Mannheim, Alemanha.	Weald and Downland, Alemanha.	Boat House, Suíça.	Smart Geometry gridshell, Estados Unidos








Fonte: Imagens adaptadas de Charest et al. (2019), Chilton e Tang (2017) e Henriques e Franco (2020).

Malhas com segmentos ortogonais, que se desviam ou em arranjos menos restritivos são geralmente utilizados para obter *gridshell* otimizados (CHAREST et al., 2019). Assim como no exemplo de malhas interseccionadas, o Smart Geometry *gridshell*, os segmentos se cruzam e reagrupam em uma configuração para atender os parâmetros de otimização, resultando em malhas não necessariamente paralelas. Além disso, a configuração da malha influencia no processo de elevação da estrutura, da configuração dos nós e conseqüentemente na geometria final (CHAREST et al., 2019).

### 2.5.2.3 Material da malha.

A disposição do material pode ser classificada por: malha homogênea em sua extração; malha que utiliza diferentes materiais de acordo com suas necessidades; malha que utiliza um arranjo com mais materiais; e malha em que permite a variação de material em um mesmo segmento (Tabela 4) (CHAREST et al., 2019).

Tabela 4 – Classificação por material da malha do *gridshell*.

Material			
			
Homogêneo	Variação	Heterogêneo	Composição
			
Mannheim complex, Mannheim, Alemanha.	Antwerp Law Courts, Bélgica.	Canopy Roof, Alemanha.	

Fonte: Imagens adaptadas de Charest et al. (2019) e Chilton e Tang (2017).

Malhas classificadas como composição são exemplificadas pelos autores como um único segmento em que dois tipos de material são alternados, por exemplo, um segmento de madeira de uma espécie pode ser unida à outra espécie distinta (CHAREST et al., 2019). O estudo de Charest et al. (2019), não apresenta exemplos desse tipo de malha.

Ao fazer esse levantamento, Charest et al., (2019) apresentaram uma evolução em complexidade dos *gridshells*. Nessa análise, podemos perceber o interesse crescente nesse tipo de tipologia arquitetônica nos últimos 10 anos. Charest et al. (2019), também discutem que a popularização dos *gridshells* com grande complexidade construtiva partiram de explorações digitais e integração de ferramentas de fabricação digital com potencial de customização em massa.

Dessa forma, é possível obter sistemas estruturais complexos, com “versões não padronizadas que oferecem a possibilidade de otimizar o desempenho estrutural e criar ambientes arquitetônicos particulares” (CHAREST et al., 2019 p. 1375, tradução dos autores<sup>6</sup>).

<sup>6</sup> “These non-standard versions offer the possibility to optimize the structural behaviour and create particular architectural ambiances” (CHAREST et al., 2019 p.1375).

## 2.6 Métodos construtivos

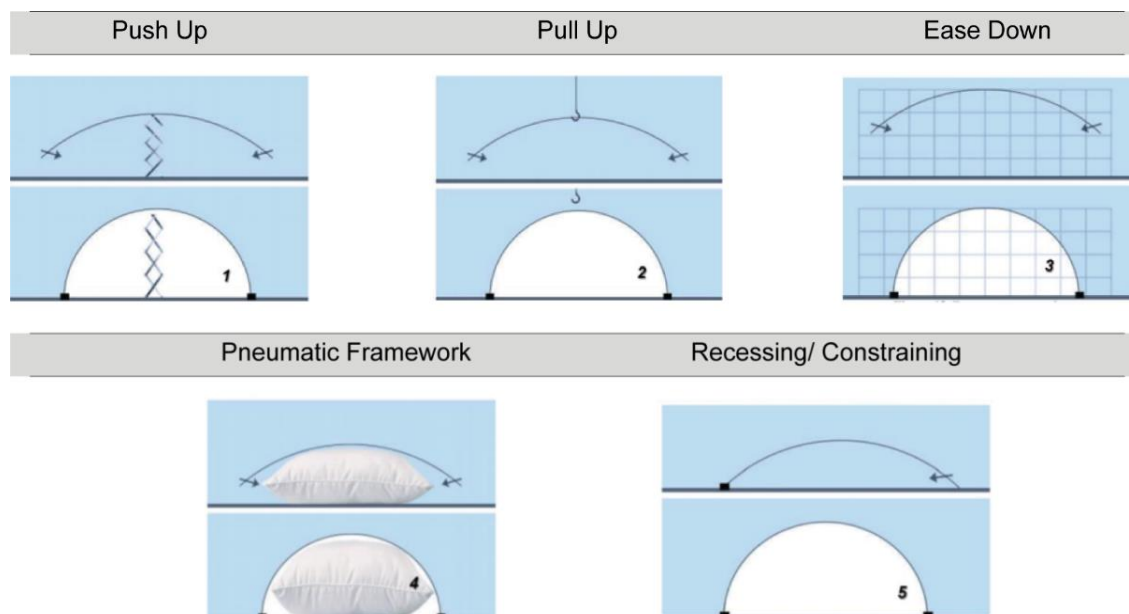
Estruturas *gridshells* são construídas para resistir a cargas por meio dos segmentos encurvados, no processo de elevação da malha ou na fabricação da peça previamente (SOUZA, 2019).

Ao projetar *gridshells* é importante considerar aspectos referentes ao processo de montagem que influencia na fase de projeto e construção. Dessa forma, a montagem pode ocorrer de forma ascendente e descendente (SOUZA, 2019).

No método ascendente, a malha é montada em uma superfície plana e erguida a partir dos pontos predeterminados até atingir a posição desejada. A elevação ocorre por equipamentos hidráulicos ou andaimes. Ao elevar a malha em pontos específicos para gerar a superfície, a ação da gravidade faz com que a malha se deforme e se aproxime do modelo proposto (CARVALHO, 2015). Segundo Chilton e Tang (2017), esse processo de montagem foi inspirado pela técnica da Catenária desenvolvida por Gaudí. Dessa forma, as estruturas podem ser erguidas por cinco técnicas, segundo Fernandes, Kirkegaard e Branco (2016), representados na tabela 5:

- *Push Up*, na qual se utilizam equipamentos hidráulicos na parte inferior da malha que é empurra até a altura desejada.
- *Pull Up*, no qual a malha é içada em pontos específicos por sua parte superior.
- *Ease Down*, na qual se eleva a malha por completo e aproveita a gravidade para dobrar gradativamente os segmentos para baixo.
- *Pneumatic Framework*, na qual se utiliza uma bolha pneumática que infla e eleva a estrutura até a posição final.
- *Recessing/Constraining*, na qual se restringem alguns suportes da malha enquanto o *gridshell* é fletido.

Tabela 5 – Métodos de construção ascendente.



Fonte: Imagens adaptadas de Fernandes, Kirkegaard e Branco (2016).

*Gridshell* construídos em método ascendente podem ser chamados de pós-formados uma vez que se obtém a geometria curva pro meio da flexão dos segmentos na elevação da estrutura. É comum ver estruturas de madeira ser construídas utilizando esse método (PONE et al. 2013; SOUZA, 2019).

No método descendente, ou pré-formados, a malha é montada em uma plataforma de disposição no qual a malha se apoia, sendo necessário que seus segmentos tenham sido previamente curvados para gerar a superfície proposta (PONE et al. 2013; CARVALHO, 2015), como exemplificado na figura 9. São comumente utilizados perfis metálicos e madeira para construir *gridshell* por esse método.

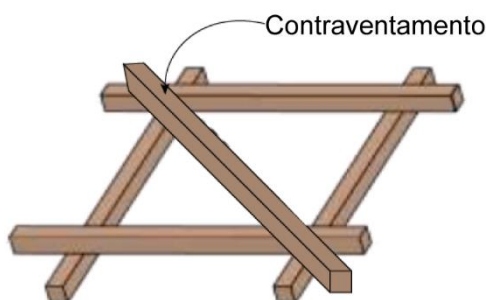
Figura 9 – Exemplo de construção descendente.



Fonte: Imagem de Toussaint (2007)

Alguns autores como Toussaint (2007) e Caffarello (2016) consideram o contraventamento como método construtivo, sendo a última fase de construção na qual se adiciona um segmento de madeira ou aço na diagonal para garantir a estabilidade (Figura 10).

Figura 10 – Exemplo de contraventamento.



Fonte: Imagens adaptadas de Naicu, Harris e Willians (2014).

## 2.7 Detalhe construtivo: tipos de nós

*Gridshell* são compostos por um número expressivo de nós, portanto, a escolha dos travamentos é essencial para a montagem da malha e para a construção da estrutura. *Gridshells* construídos por método descendente, geralmente tem seus segmentos unidos por solda ou por juntas de aço customizadas (Figura 11), já que cada segmento é fabricado com angulação que conferem a curvatura da estrutura (SOUZA, 2019).

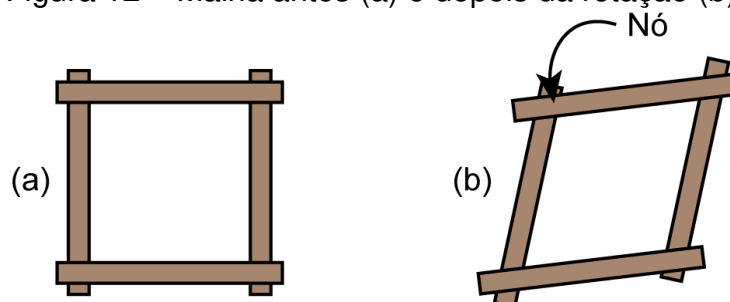
Figura 11 – Travamento para membros discretos em Pods Sports Complex.



Fonte: Naicu (2012).

Em estruturas construídas por método ascendente é preciso prever o tipo de travamento, uma vez que ocorre a rotação dos nós para atingir a curvatura desejada (SOUZA, 2019). Durante a elevação de um *gridshell* de malha quadrangular, o nó deve permitir a mobilidade dos segmentos de forma que assuma o formato de paralelogramo, pois se forem nós fixos, a malha pode romper, conforme figura 12 (COLLINS; COSGROVE, 2016).

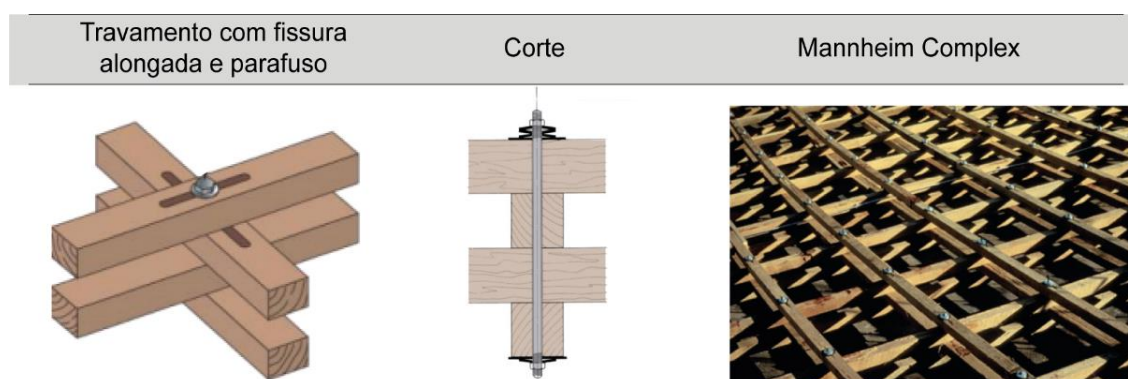
Figura 12 – Malha antes (a) e depois da rotação (b).



Fonte: Imagens adaptadas de Collins e Cosgrove (2016).

Naicu, Harris e Williams (2014) desenvolveram um compilado de ligações para *gridshells* em madeira. A figura 13 demonstra um tipo de travamento em que um parafuso transpassa um orifício alongado. Com esse nó é possível manter os segmentos juntos enquanto a malha é erguida permitindo que os segmentos deslizem um sobre o outro. Posteriormente, quando a malha é posicionada na curvatura desejada, os parafusos são apertados.

Figura 13 – Travamento com orifício alongado.



Fonte: Imagens adaptadas de Naicu, Harris e Williams (2014) e Chilton e Tang (2017).

Outra ligação comum é constituída de placas de aço galvanizado e parafusos para manter os segmentos juntos. Na figura 14, no travamento com placa de aço, dois parafusos em posições opostas são encaixados na montagem

da malha na superfície plana e os outros dois são adicionados após a malha se acomodar. Esse travamento foi utilizado no *gridshell* de Weald & Downland, no qual permitia que as ripas de madeira girassem durante a construção, diminuindo os riscos de rompimento (NAICU; HARRIS; WILLIAMS. 2014).

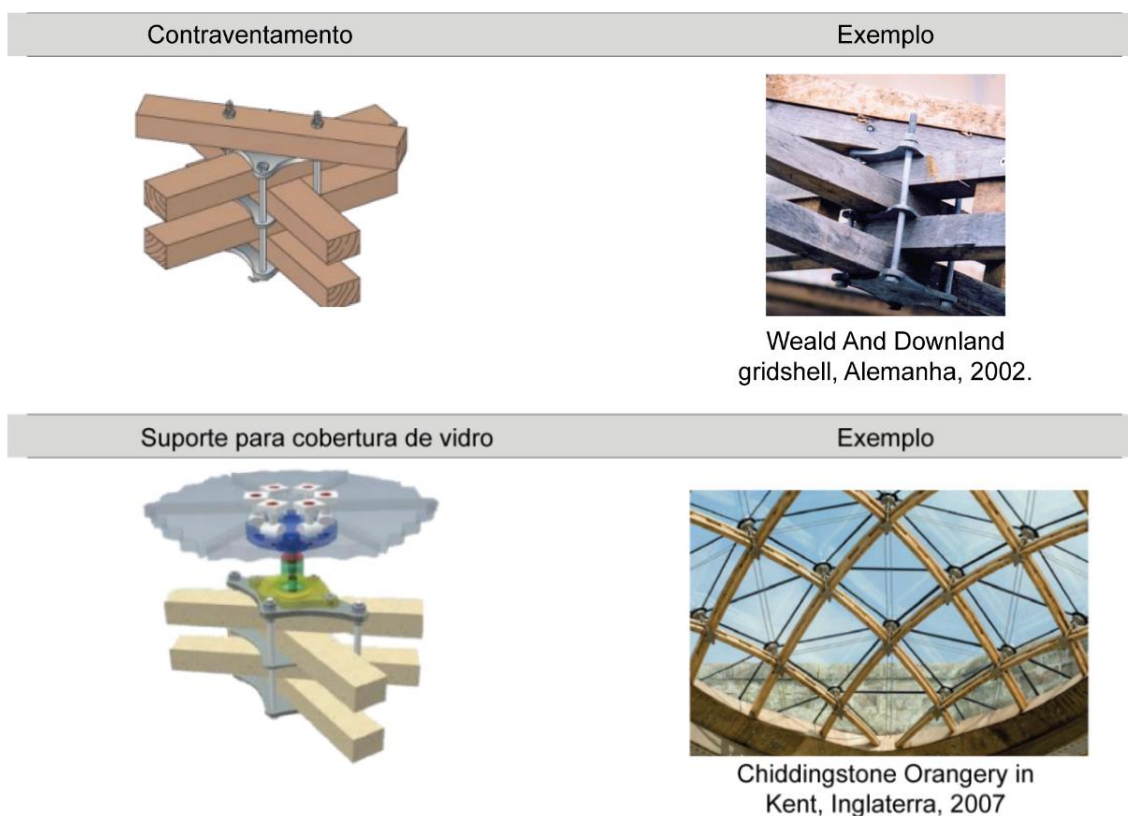
Figura 14 – Travamento com placa de aço e parafuso.



Fonte: Imagens adaptadas de Naicu, Harris e Williams (2014) e Adriaenssens et al. (2014).

Além disso, os travamentos de placa de aço podem ser utilizados para a adição de segmentos de contraventamento e para o suporte de fixação de cobertura de vidro, conforme figura 15.


Figura 15 – Travamento com contraventamento e suporte para vidro.



Fonte: Imagens adaptadas de Naicu, Harris e Williams (2014) e Adriaenssens et al. (2014).

Apesar de essas ligações serem utilizadas em dois dos *gridshells* mais famosos, Fernandes, Kirkegaard e Branco (2016) desenvolveram um catálogo com arranjos de nós menos conhecidos, que utilizam cordas e cabos de aço (Tabela 6).

Tabela 6 – Exemplos de travamentos.

Travamento por furo alongado e parafuso		Travamento com placa de aço	
			
Orifício alongado que permite o desizamento das peças.	Orifício alongado que permite o desizamento de única camada.	Placas de aço com parafuso.	Placa de aço com contraventamento.
Travamento por um único parafuso		Travamento com placa de aço	
			
Um parafuso travando duas camadas	Um parafuso travando uma camada com contraventamento.	Placa circular que permite o ajuste dos segmentos.	Placa de aço quadradas.
Travamento por um único parafuso		Travamento por amarra	
			
Travamento por parafuso com ripas auxiliares no travamento	Travamento com gancho que permite o contraventamento por cabo de aço.	Travamento por amarra com corda.	Peça metálica giratória.

Fonte: Imagens adaptadas de Souza (2019) e Fernandes, Kirkegaard e Branco (2016).

Considerando um *gridshell* de membro discreto, a utilização de juntas customizadas ou soldadas pode ser mais apropriado, uma vez que os segmentos podem ser movimentados conforme as definições de projeto e os nós podem ser customizados conforme a posição e angulação dos segmentos.

## 2.8 Pesquisas que abordam a composição de malha para *gridshell*

Como discutido anteriormente, existe uma lacuna de pesquisas que abordam a gramática da forma para a composição geométrica da malha de *gridshell*. Dessa forma, não encontramos trabalhos que abordam esse método, resultando em uma pesquisa original. Apesar disso, existem pesquisas que abordam a melhora na eficiência estrutural de *gridshells* por meio do *design* da malha.

O artigo desenvolvido por Pottmann et al., (2015), apesar de não propor uma metodologia para o melhoramento de malhas, faz um levantamento de *designs* comumente utilizados em *gridshell* contemporâneo. A pesquisa considera os pontos positivos e negativos resultantes da utilização de malhas com composições geométricas de triângulos, quadrados, retângulos e hexagonais, ponderando o processo de construção, gasto de material e comportamento estrutural. Os autores concluem que as próximas gerações de *gridshells* devem ser mais fáceis de projetar, uma vez que os sistemas de modelagem são difundidos. Além disso, também ponderam que nos próximos anos, o processo de projeto dessas estruturas devem considerar ainda mais aspectos de fabricação, como customização das juntas e fabricação dos segmentos.

Richardson et al. (2013), abordou a otimização de malhas com o objetivo de minimizar o gasto de material e melhorar o desempenho estrutural de *gridshells*. Os autores partem de uma metodologia que, primeiramente, busca definir as condições de limites da estrutura e contorno da superfície por técnica de relaxamento mecânico, seguido pela otimização do padrão da malha. A otimização do padrão inicia com uma malha quadriculada em que se busca reduzir os segmentos sem função estrutural e otimizar a localização dos nós. Essa pesquisa chegou a modelos de malhas irregulares com combinação de quadrados e triângulos, testando diferentes tipos de condição de suporte, ou seja, se as estruturas de base quadradas são apoiadas por dois, três ou quatro lados, conseguindo reduzir cerca de 50% de massa das *gridshells* mantendo a eficiência estrutural.

Assim como Richardson et al., (2013), o artigo de Dźwierzynska (2018), aborda o processo de modelagem paramétrica de *gridshells* associando os modelos de malhas e otimização estrutural, diferenciando na composição

geométrica da malha e condições de suporte. A pesquisa considera *gridshells* com base circular e malha triangular utilizando uma metodologia no qual varia a quantidade e localização dos segmentos e verificam o efeito dessas variações no desempenho estrutural. Os autores utilizam de modelagem paramétrica em que é possível variar a quantidade de suportes, segmentos e sua localização, simultaneamente à avaliação do desempenho estrutural. Dessa forma, concluem que a metodologia empregada em estágios inicial de projeto pode resultar em coberturas originais e facilitar a comunicação entre arquitetos e engenheiros, uma vez que o *design* e comportamento estrutural são abordados em conjunto.

Dimcic (2011), em sua tese de doutorado, pesquisou sobre a otimização de malhas de *gridshell*. O autor utiliza o *Voronoi, plugin* que produz um modelo matemático para subdivisão da malha no *Grasshopper*, com o objetivo de gerar malhas paramétricas para que sejam otimizadas no *Grasshopper*. A pesquisa parte da experimentação em estruturas de base quadrada onde o autor aplicou as malhas. O autor conseguiu demonstrar que é possível chegar a padrões mais eficientes, em que se concentram os segmentos das malhas em locais de maior tração.

Pellis e Pottmann (2020) discutem as composições malhas formadas por quadriláteros, considerando a eficiência estrutural e os gastos para a fabricação de peças. A metodologia da pesquisa partiu de uma malha triangular que foi otimizada para atingir a planicidade das faces e para alinhar os principais segmentos a curvatura da estrutura, objetivando o equilíbrio das tensões. Os principais segmentos foram atribuídos como linha guia para a aplicação de malhas de quadriláteros, no qual poderia ajustar a posição das geometrias na estrutura, considerando a fabricação, construção e *design*. Os autores concluíram que essa metodologia pode ser utilizada como ferramenta para várias configurações de *gridshells* de forma livre, construídos considerando a composição da malha e a eficiência estrutural com a possibilidade de reduzir custos pela diminuição de material.

Na pesquisa de Peng et al. (2018), os autores objetivaram organizar triângulos e quadrados por meio do *tiling* (mosaico, ladrilhagem), como solução para a obtenção da malha considerando os limites e a curvatura da superfície de *gridshells*. Os autores partiram da essência do *tiling*, no qual obtiveram composições que cobrem a superfície sem sobreposição. A metodologia abordada

usa a otimização para calcular e enumerar todas as possibilidades de combinações de triângulos e quadrados dentro de uma determinada região. Os autores concluíram que com essa abordagem o usuário tem controle dos padrões gerados, sendo possível alcançar composições inovadoras.

Percebemos com as pesquisas apresentadas e discutidas que a otimização das malhas de *gridshells* está bem difundida no contexto acadêmico. Esses autores utilizaram diferentes abordagens, enfatizando que não existe uma forma única para chegar a modelos ótimos. No entanto, mais do que entender as composições geométricas que geram estruturas otimizadas, é necessário entender os parâmetros para chegar a um modelo eficiente. Dessa forma, podemos elaborar regras aplicadas a gramática da forma, criando uma variabilidade maior do que composições de quadrados e triângulos.

Além disso, em algumas pesquisas como a de Pellis e Pottmann (2020), Dźwierzyńska (2018), Richardson et al., (2013) e Dimcic (2011), a otimização das malhas está intimamente ligada a forma dos *gridshells*, mas também considera questões relacionadas aos processos de fabricação e materialização dessas estruturas. Dessa forma, ficam claro que as composições de malha e forma das estruturas devem ser consideradas juntamente com as soluções construtivas.

## 2.9 Conclusão

Percebemos o crescente interesse neste tipo de estruturas nos últimos anos, principalmente devido à possibilidade dos *gridshells* permitirem a criação de soluções inovadoras. Na classificação do *gridshell* desenvolvidas por Charest et al. (2019) e nos métodos construtivos, é possível perceber que existem diferentes formas de construção dessas estruturas, diferentes formas arquitetônicas e tamanhos variados, assim como diversidade nos materiais que podem ser utilizados. Essa revisão bibliográfica mostra o potencial de diversidade e a versatilidade dos *gridshells*.

A construção de um *gridshell* pode ser vantajosa, pois são estruturas leves e eficientes, mas também pode ser complexa, uma vez que percebemos que os procedimentos e técnicas de construção se desenvolveram, principalmente considerando a fabricação digital. A fabricação digital tem ampliando a produção das peças, neste sentido, as malhas podem ser compostas por combinações

geométricas diversas, customizadas, e ainda assim ser fabricadas rapidamente. Dessa forma, é importante compreender todos os detalhes construtivos desde as etapas iniciais do projeto, uma vez que é preciso gerencia-las e considera-las no processo de projeto.

Assim, considerando a variabilidade da malha como fator importante para essa pesquisa, ponderamos o processo de projeto de *gridshells* de membros discretos e nós rígidos, uma vez que possibilita a movimentação dos segmentos de maneira individual e é possível fabricar nós de maneira customizada, conforme as definições de projeto.

Além disso, percebemos nas pesquisas que existe interdisciplinaridade entre da Arquitetura e Engenharia, uma vez que o processo de projeto está intimamente ligado a questões estruturais, fabricação e construção.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos ao Nú.Lab (DAU/UFV), à CAPES, pela bolsa de Mestrado vinculada a este projeto e ao Programa de Pós Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

## REFERÊNCIAS

ADRIAENSSENS, S.; BLOCK, P.; VEENENDAAL, D.; WILLIAMS, C. **Shell structures for architecture. Form finding and optimization**. 1 ed. Oxon: ROUTLEDGE, 2014, 338 p. ISBN: 978-0-415-84060-6

BECHTHOLD, M. **Innovative surface structures : technology and applications**. 1ed. Oxon: ROUTLEDGE, 2008, 240p. ISBN 9780415419673

BEGHINI, L.; BEGHINI, A.; KATZ, N.; BAKER, W.; PAULINO, G. Connecting architecture and engineering through structural topology optimization. **Engineering Structures**, v. 59, p. 716–726, 1 fev. 2014. DOI: 10.1016 / j.engstruct.2013.10.032

CARVALHO, D. **Gidshells em madeira: morfologia, aplicabilidade, comportamento estrutural e projeto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e tecnologia, Universidade de Coimbra. Coimbra, 2015.

CAFFARELLO, F. **Análise estrutural de cobertura em gidshells de madeira**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2016.

CHAREST, P.; POTVIN, A.; DEMERS, C.; MÉNARD, S. Assessing the complexity of timber gridshells in architecture through shape, structure, and material classification. **BioResources**, v.14 , p.1364-1378, 7 jan. 2019. DOI: 10.15376 / biores.14.1.1364-1378

CHILTON, J.; TANG, G. **Timber Gridshells; Architecture, structure and craft**. 1. ed London: Routledge, 2017, 404 p. ISBN 9781138775305

COLLINS, M.; COSGROVE, T. A Review of the State of the Art of Timber Gridshell Design and Construction. In: Civil Engineering Research in Ireland Conference, 2016, Limerick. **Anais eletrônicos**...Limerick, 2016. Disponível em: <https://ulir.ul.ie/handle/10344/5192>. Acesso em: 14 mar. 2021.

CORREIA, R; DUARTE,J; LEITÃO, A. GRAMÁTICA: A general 3D shape grammar interpreter targeting the mass customization of housing, 2012. Proceedings of ECAADE 30, 2012, Praga. **Anais eletrônicos**... Polônia: 2012. Disponível em: [http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/Show?ecaade2012\\_273](http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/Show?ecaade2012_273) . Acesso em: 10 dez. 2020.

CUVILLIERS, P.; DOUTHE, C.; PELOUX, L. LE ROY, R. Hybrid Structural Skin: Prototype of a GFRP Elastic Gridshell Braced by a Fiber-Reinforced Concrete Envelope. **Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures**, v. 58, p. 65–78, 1 mar. 2017. DOI: 10.20898 / j.iass.2017.191.853

DIMCI, M. **Structural Optimization of Grid Shells based on Genetic Algorithms Stuttgart**. Dissertação (Doutorado em Arquitetura) – Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen, Universität Stuttgart. Stuttgart, 2011.

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

DOI:10.1016/j.conbuildmat.2010.02.037

FERNANDES, J.; KIRKEGAARD, P.; BRANCO, J. Tectonic design of elastic timber gridshells. In: World conference on timber engineering (WCTE), 2016, Viena. **Anais eletrônicos**... Austria, 2014. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/311321180\\_TECTONIC\\_DESIGN\\_OF\\_ELASTIC\\_TIMBER\\_GRIDSHELLS](https://www.researchgate.net/publication/311321180_TECTONIC_DESIGN_OF_ELASTIC_TIMBER_GRIDSHELLS) . Acesso em: 14 mar. 2021.  
DOI: -

HENRIQUES, G.; FRANCO, J. Gridshells: integrating design with structural performance: formal and informal form finding. In: Proceedings of the XXIV International Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics, 2020, Colômbia. **Anais eletrônicos**... Colômbia: 2020. Disponível em: <https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/gridshells-integrating-design-with-structural-performance-formal-and-informal-form-finding-35431>. Acesso em: 10 dez. 2020.  
DOI 10.5151 / sigradi2020-23

NAICU, D. **Geometry and performance of timber gridshells**. Dissertação (Mestrado em Filosofia) - Department of Architecture and Civil Engineering, University of Bath. Bath, p. 98. 2012.

NAICU, D.; HARRIS, R.; WILLIAMS, C. Timber gridshells: design methods and their application to a temporary pavilion. In: World conference on timber engineering (WCTE), 2014, Quebec. **Anais eletrônicos**..., Canadá: 2014. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/264539965\\_Timber\\_gridshells\\_Design\\_methods\\_and\\_their\\_application\\_to\\_a\\_temporary\\_pavilion](https://www.researchgate.net/publication/264539965_Timber_gridshells_Design_methods_and_their_application_to_a_temporary_pavilion) . Acesso em: 14 mar. 2021.  
DOI: -

PELLIS, D.; POTTMANN, H. Geometry and Statics of Optimal Freeform Gridshells. In: Proceedings of Baustatik, 2020, Universität Stuttgart, Stuttgart. **Anais eletrônicos** ... Stuttgart: 2020. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/340953781\\_Geometry\\_and\\_Statics\\_of\\_Optimal\\_Freeform\\_Gridshells](https://www.researchgate.net/publication/340953781_Geometry_and_Statics_of_Optimal_Freeform_Gridshells). Acesso em: 10 dez. 2020.

PENG, C.H.; JIANG, C.; POTTMANN, H.; WONKA, P. Designing patterns using triangle-quad hybrid meshes. **ACM Transactions on Graphics**, v.37, n.4, p. 1-14, Ago.2019.  
DOI: 10.1145 / 3197517.3201306

PONE, S.; COLABELLA, S.; D'AMICO, B.; FIORE, A.; LANCIA, D.; PARENTI, B. Timber post formed gridshell: digital forma finding/ drawing and building tool. In: Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium, 2013, Polônia. **Anais eletrônicos** ... Polônia: 2013. Disponível em: <https://www.napier.ac.uk/~media/worktribe/output-187192/timber-post-formed-grid-shell-digital-form-finding-drawing-and-building-toolpdf.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2019.  
DOI: -

POTTMANN, H. EIGENSATZ, M. VAXMAN, A. WALLNER, J. Architectural geometry. **Computers and Graphics** , v. 47, p. 145-164. Abr. 2015.  
DOI: 10.1016 / j.cag.2014.11.002

RICHARDSON, J. ADRIAENSSENS, S. COELHO, R. BOUILLARD, P. Coupled form-finding and grid optimization approach for single layer grid shells. **Engineering Structures**, v. 52, p. 230–239, 1 jul. 2013.  
DOI: 10.1016 / j.engstruct.2013.02.017

SOUZA, I. **Processo construtivo de estrutura *gridshell* pós-formada com uso de pinus**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

TOUSSAINT, M. **A Design Tool for Timber Gridshells**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology. Delft, 2007.



XXIV International Conference  
of the Iberoamerican Society  
of Digital Graphics  
Medellín | Colombia

## Gridshell structural evaluation criteria based on Upward and Downward Modeling Methods in Karamba3D.

**Elisa Bomtempo Matos**

Universidade Federal de Viçosa | Brasil | [elisa.matos@ufv.br](mailto:elisa.matos@ufv.br)

**Andressa Carmo Pena Martinez**

Universidade Federal de Viçosa | Brasil | [andressamartinez@gmail.com](mailto:andressamartinez@gmail.com)

### Abstract

Despite the vast number of researches that address Gridshells as regular meshes, there is a lack of studies discussing hybrid meshes. In this context, this paper presents a parametric approach and employs visual algorithms for designing digital gridshells with different mesh patterns. We intend to formulate a methodology for Karamba 3D applications that address the structural performance according to variations in geometric composition, number of props, and construction methods. The work seeks to examine patterns that improve structural performance, through a parallel discussion between Upward and Downward modeling methods. Although the Upward modeling method is the most recurrent in studies on the topic, in this study, the Downward method generated structures with better structural performance.

**Keywords:** Gridshell; Pattern; Geometric Modeling; Structural Design; Structural Optimization.

## INTRODUÇÃO

*Gridshells* são estruturas reticulares tridimensionais formadas por elementos de barras, compondo uma malha que possibilita a criação de formas complexas, capazes de vencer grandes vãos, com considerável altura (KUNZ; PRAUCHNER, 2015). Elas popularizaram-se nos últimos cinquenta anos, pois são estruturalmente eficientes como coberturas e têm grande potencial para readaptação de espaços existentes (CHILTON; TANG, 2016). Também associam liberdade formal à eficiência estrutural, o que permite vencer grandes distâncias, que atingem cerca de 60 metros, sem a necessidade de apoios intermediários. Adicionalmente, elas permitem uma variedade de materiais construtivos, tais como madeira e aço (CHILTON; TANG, 2016). Para Naicu (2012) e Williams (2014), sua resistência é derivada da forma, geralmente com dupla curvatura, além da relação entre a geometria da malha ou grid, o material e as forças internas atuantes.

O comportamento das cargas diferencia-se de uma *shell* (casca contínua), para um *gridshell* (casca formada por uma malha treliçada). *Shells* transferem cargas em todas as direções, enquanto um *gridshell* transfere cargas axiais na direção de suas peças, podendo ser necessária a utilização de elementos diagonais que restrinjam o movimento da malha (CARVALHO, 2015). Segundo Toussaint e Andriaenssens (2007; 2014), quando se utilizam elementos diagonais nas peças, consegue-se transferir esforços cortantes, fazendo com que o *gridshell* trabalhe também de forma semelhante a uma casca contínua.

De modo geral, essas estruturas resistem às cargas por meio de sua forma e composição geométrica das grids, podendo ser cada vez mais complexas, à medida que os *software* de análise estrutural foram sendo refinados (CHILTON; TANG, 2016).

Essas estruturas podem ser classificadas por sua forma e comportamento em relação às cargas. Forma-ativa é caracterizada principalmente por estruturas que se ajustam ao carregamento, como as tensionadas. Forma-passiva, por outro lado, são estruturas que não se ajustam ao carregamento, ou seja, sofrem tração e compressão, mas são estruturas aparentemente rígidas (WILLIAM, 2014).

Esse artigo centra-se, então, no estudo de *gridshells* com elementos de linhas curvas de forma-passiva. As mais populares nessa categoria são as cúpulas geodésicas, que são modeladas por processo de triangulação, elaboradas por Fuller (DŹWIERZYŃSKA, 2018). No entanto, um desafio que ainda permanece no processo de projeto dessas estruturas é a lacuna entre as formas ainda não estudadas, limitadas pelas propriedades dos materiais e padrões das grids (PONE, 2013). Segundo Rieffel et al. (2009), existem poucos métodos capazes de descobrir as geometrias que são capazes de produzir o caráter autoportante, ou seja, suportam a estrutura de modo independente, sem auxílio de outras complementares.

Sendo assim, este artigo constitui a segunda etapa de uma pesquisa cujo objetivo principal é a elaboração de regras de gramática da forma para a geração de

*gridshells*, a partir de estudos de geometrias que favorecem o desempenho estrutural. A pesquisa possui como etapas: (1) revisão de literatura sobre *gridshells*, gramática da forma, simulação e otimização de desempenho estrutural; (2) desenvolvimento de métodos de simulação de desempenho estrutural em Grasshopper, utilizando os *plug-ins* Kangaroo e Karamba 3D; (3) análise de composições geométricas das malhas ou grids para o desempenho estrutural de *gridshell*; (4) elaboração de regras para geração de uma gramática da forma.

Para esta etapa, o artigo apresenta algoritmos visuais (GHX) para a criação de modelos digitais de *gridshell* com vários padrões de geometrias de malhas. O objetivo é desenvolver uma metodologia aplicada ao Karamba 3D para calcular o desempenho estrutural, segundo as variações de composição geométrica, número de suportes e método de modelagem. Mais especificamente, este trabalho discute o comportamento de *gridshells* concebidos de modo Ascendente e Descendente, como etapa preliminar para o aprofundamento dos estudos dos padrões de composição geométrica da malha.

### PLUG-IN DE ANÁLISE ESTRUTURAL: KARAMBA3D

O Karamba3D é um *plug-in* de análise estrutural para o Grasshopper. Ele se baseia na análise de elementos finitos e, por isso, toda a simulação pode ser executada em um mesmo ambiente sem necessidade de transferências entre *software*. Nele pode-se facilmente atribuir propriedades estruturais aos elementos, pois fornece um menu de seleção simples, além de visualização clara dos resultados por meio de um gráfico de cores na própria estrutura (ELIASSEN; HUSEBY, 2018).

O manual do Karamba3D não explicita a teoria dos elementos de viga (PREISINGER, 2016). Segundo Eliassen e Huseby (2018), Clemens Preisinger, desenvolvedor do Karamba, sugere que seja a teoria de Timoshenko, o que significa que as deformações por cisalhamentos, ou *shear deformation*, são contabilizadas nas análises. Já para as cascas contínuas, os mesmos autores sugerem que seja a teoria de Kirchhoff, modelo matemático para placas finas em que se busca determinar as tensões e deformações de estruturas sujeitas à forças e momentos (LOVE, 1888). Objetivamente, no Karamba 3D, a casca é dividida por elementos triangulares, cujos nós geram seis conexões. Neste sentido, a resolução da malha, conforme a densidade da triangulação, afeta a precisão dos resultados, assim como o tempo de computação da estrutura (ELIASSEN; HUSEBY, 2018).

### MÉTODOS CONSTRUTIVOS DE GRIDSHELLS DE ELEMENTOS EM LINHAS CURVAS

Nesse estudo, serão analisados os Métodos de Modelagem Ascendente e Descendente para a geração de *gridshells*. A definição do método é fundamental para o processo de projeto, já que a complexidade da estrutura requer o desenvolvimento de peças e encaixes específicos na fase de fabricação.

No processo Ascendente (*upward*), a malha é montada em uma superfície plana, sendo elevada a partir dos pontos predeterminados, reforçados para gerar a forma final, facilitando a ligação entre os elementos. Em

estruturas em que existe a sobreposição de camadas, as malhas são produzidas separadamente e ligadas posteriormente, quando a malha inferior estiver elevada em apoios temporários (CARVALHO, 2015).

Andriaenssens (2014) define esse método construtivo como *strained gridshell* ou *gridshell* tensionado, pois durante o içamento da malha, a flexibilidade é crucial para a montagem. No entanto, como o procedimento pode causar flexão das peças, resultando em grandes deslocamentos do *gridshell*, o autor sugere a adição de elementos na diagonal para garantir a rigidez.

Ao elevar a grelha em pontos específicos, a ação da gravidade faz com que a malha se deforme e produza a curvatura da estrutura proposta. Após a elevação, os apoios são fixados e os nós são reforçados (CARVALHO, 2015). Diferentes técnicas podem ser adotadas para elevar a malha, podendo ser puxada por guindastes ou empurrada por macacos hidráulicos, porém, ambas requerem a verificação adicional da estrutura e exigem maior detalhamento e estudo sobre os pontos que sofrerão o esforço adicional de içamento (PAOLI, 2007).

Segundo Carvalho (2015), durante o processo de construção, os elementos estão mais sujeitos à ruptura, uma vez que erros na seleção dos pontos de apoio podem acarretar tensões estruturais superiores à previsão, levando a quebra das ligações. Essas tensões adicionais podem ser decorrentes do raio de curvatura menor das ripas ou da flexão adicional entre pontos de apoio mal localizados (CAFFARELLO, 2016). A desvantagem construtiva desse método dá-se quando existe a necessidade de elevar grandes *gridshells*, pois, maiores serão as forças necessárias para neutralizar o próprio peso e existe maior possibilidade da estrutura se romper (PAOLI, 2007).

Já a modelagem Descendente (*downward*) é um processo geralmente empregado em *gridshells* contemporâneos e funciona de maneira inversa à modelagem Ascendente, agindo em favor da gravidade. Dessa maneira, começa-se a construção do *gridshell* pelo topo e não ao nível do solo, não havendo esforços de içamento. Uma plataforma de disposição é elevada à altura desejada, na qual a malha se apoia, em um processo em que topos e vales podem ser construídos ao mesmo tempo (PAOLI, 2007). Andriaenssens (2014) classifica esse método como *unstrained gridshell*, ou não tensionado, pois a construção ocorre a partir da montagem de peças já curvadas, ou seja, uma estrutura rígida livre de tensões além do próprio peso.

### PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DAS MALHAS

Segundo Williams (2014), existem alguns parâmetros no processo de *form-finding* de *gridshells*, dentre os quais destacam-se o suporte, a carga externa, a topologia do modelo e a relação da geometria com forças internas. Assim, não apenas o material garante a capacidade de suportar cargas, mas também a forma da estrutura.

Pottmann et al. (2015), afirmam que malhas híbridas, compostas por triângulos, quadrados e hexágonos, são mais otimizadas. Segundo o autor, triângulos, quadrados e hexágonos, quando agrupados, geram um fluxo de

força mais uniforme, o que dificulta a deformação da malha.

Os triângulos, quando agrupados, geram nós compostos por seis vértices, e, portanto, malhas com boas propriedades estruturais. Contudo, resultam também em sobras de material, já que as placas são geralmente retangulares. Malhas quadradas, por sua vez, podem acarretar problemas em estruturas curvas, pois podem gerar polígonos com pequenos ângulos, além de limitar a liberdade de criação. Por sua vez, a malha hexagonal é rígida e menos suscetível à deformação, porém é desafiadora para o projeto, uma vez que cada nó possui três vértices (POTTMANN et al 2015).

Para Dimcic (2011) e Hernandes (2015), a qualidade estrutural da malha está associada à densidade da grid, que pode ser entendido como o aumento do número dos vértices em áreas estratégicas, reduzindo a área dos planos e evitando que as peças se deformem. Com essa estratégia, as forças seriam distribuídas de maneira uniforme em pontos de tensão.

Dimcic (2011) e Hernández (2015) acreditam que independente das geometrias escolhidas para compor a malha, um *gridshell* com qualidade estrutural é obtido por meio de processo de otimização dos padrões, que redistribui e reorienta os membros da malha, modificando a densidade da grid em uma superfície para a obtenção de uma solução ideal. Com uma otimização do padrão da grid - orientação e disposição dos perfis - pode-se obter uma minimização da curvatura dos perfis e melhorar a capacidade de carga dos *gridshells* (HERNÁNDEZ. p.4. 2015 – tradução nossa).

Existem diversas possibilidades de projeto para *gridshell*, uma vez que diferentes densidades podem ser produzidas com vários padrões. As forças internas de relaxamento e tensão podem ser controladas ajustando a densidade da malha (DIMCIC, 2011).

Em geral, esses autores concordam que a robustez do *gridshell* está relacionada à distribuição de carregamento ao longo de suas vigas. Quanto mais uniforme a distribuição, mais resistente é a estrutura. Por esse motivo, o padrão da malha, assim como a densidade e orientação, afetam a capacidade de carga da estrutura. Esse é um estudo importante para a fase inicial de projeto, já que entre todas as geometrias possíveis, pode haver padrões ineficientes ou inviáveis (OVAL et al. 2019). Diante dessas considerações, este estudo propõe, em etapas subsequentes, a obtenção de ferramentas conceituais e práticas para aprofundar o conhecimento sobre padrões eficientes nos estágios iniciais de projeto de *gridshells*.

Neste estudo, são propostas duas etapas comparativas para o método: (1) Definição da modelagem por Método Construtivo Ascendente e (2) modelagem pelo Método Construtivo Descendente. No primeiro método de modelagem, a malha projetada no solo é elevada em pontos específicos, de modo que a ação da gravidade produza a forma final proposta. No segundo método, cria-se uma casca tridimensional, que é transformada posteriormente em uma estrutura treliçada equivalente.

A primeira etapa foi caracterizada como uma fase de pré-processamento do experimento, utilizando o *plug-in* Kangaroo, na qual definiu-se (a) a dimensão da estrutura a ser analisada (base e altura), (b) o número e localização dos apoios e (c) a densidade da malha. Em ambos métodos, a análise busca a menor massa, menor deslocamento dos membros e forças de utilização de compressão e tensão próximas a 100% positivo e negativo.

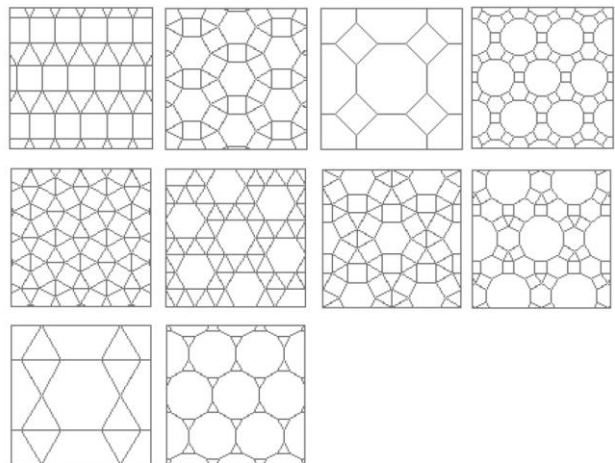
Em ambas as fases também foram realizados testes (d) de composição geométrica, caracterizados por treze malhas diferentes, com o objetivo de selecionar o método de modelagem, cujo desempenho estrutural seja superior em diferentes geometrias de malhas, sejam elas regulares (padronização das dimensões dos segmentos ou polígonos) ou irregulares (composições com diferentes densidades e padrões). Apesar de consolidado na literatura o uso de padrões triangulares ou diagonais para esse tipo de estrutura, testou-se casos distintos para observar as limitações e potencialidades entre métodos construtivos de modo mais abrangente.

## FASE DE PRÉ-PROCESSAMENTO

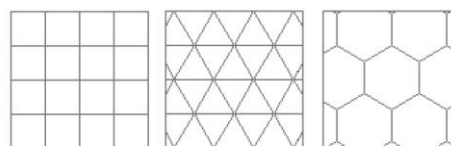
Na fase de pré-processamento, a estrutura foi por Modelagem Ascendente utilizando a suíte de modelagem Rhinoceros3D + Grasshopper e os *plug-in* Kangaroo 2 e Karamba 3D. A malha foi construída em um plano XY e içada no eixo Z para a posição final, produzindo uma estrutura treliçada de base quadrada, cujos lados são 25,0 metros (25,0m x 25,0m). Por sua vez, as composições geométricas de malhas diferentes (regulares e irregulares) foram criadas com os padrões do *plug-in* Parakeet para Grasshopper, e três malhas regulares foram modeladas em Rhinoceros.

**Tabela 1:** Padrões de malha desenvolvidas pelo componente Parakeet e padrões regulares pelo Rhinoceros. Fonte: os autores.

### Malhas produzidas pelo Parakeet



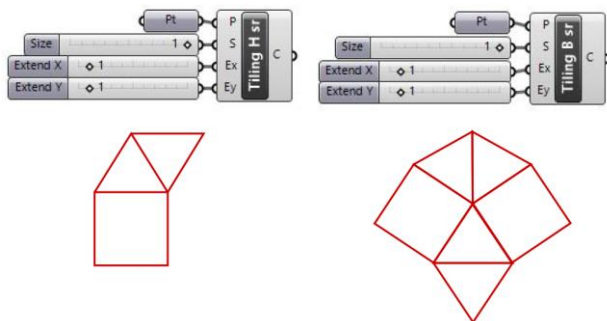
### Malhas produzidas em Rhinoceros



Essa estrutura foi modelada com material tubular circular com diâmetro e espessura constantes para as treze possibilidades de malhas. Apesar do Karamba 3D possuir um componente que otimiza e varia a espessura do material (*cross section optimizer*), para aumentar o desempenho estrutural, os testes preliminares para definição do método indicaram que este recurso aumenta significativamente a massa da estrutura.

O objetivo dessas simulações foi analisar a composição geométrica, a densidade e dimensão dos segmentos das malhas e sua relação com o desempenho estrutural. Da mesma forma, buscou-se determinar a quantidade de apoios e altura ideal da estrutura para a definição dos parâmetros adotados na próxima etapa.

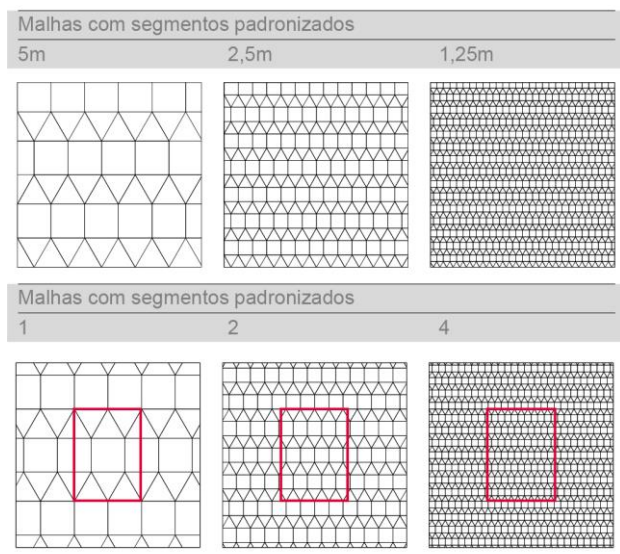
As malhas geradas pelo Parakeet são compostas por módulos de geometrias diferentes, com dimensões diferentes, ou seja, não há padronização entre quantidade na subdivisão de módulos e dos segmentos dos polígonos entre todas as possibilidades malhas (Figura 1). Portanto, para avaliação e comparação das malhas foram definidas duas classificações: malhas com segmentos de dimensões padronizadas, cujas geometrias são definidas a partir de um ponto de 'origem', na extremidade do *gridshell* e malhas irregulares, cujo padrão geométrico inicia-se em módulo central, com recortes nas extremidades (Tabela 2).



**Figura 1:** Padrões com composição de triângulos e quadrados, mesmo tamanho de segmentos, porém tamanho de módulos diferentes, já que a malha *Tiling H* é composta de um quadrado e dois triângulos e a malha *Tiling B* por dois quadrados e quatro triângulos. *S* significa *Size*, ou tamanho do segmento, ajustado em 1cm. *Ex* e *Ey*, são números de módulos em cada eixo. A imagem demonstra que para o mesmo valor associados aos eixos, os módulos apresentam tamanhos diferentes. Fonte: os autores.

Para malhas com tamanhos de segmentos padronizados, foram definidas dimensões de 1,25 metros, 2,50 metros e 5,00 metros, configurando um aumento progressivo de proporções de 1, 2 e 4 vezes o tamanho da primeira. Por sua vez, as malhas com início da composição geométrica em módulo centralizado, foram configuradas a partir da subdivisão da base quadrada em 4 módulos, 2 módulos e 1 módulo. Dessa maneira, todas as malhas foram avaliadas em ambas as categorias, em escalas e proporções semelhantes.

**Tabela 2:** Tabela com composição de malha em segmentos padronizados regulares e módulos centralizados, irregulares. O retângulo em vermelho aponta a configuração de módulos partindo do centro da malha em que os padrões são ajustados. Fonte: os autores.

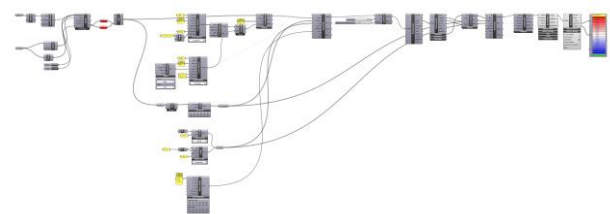


Para cada uma das malhas, foram aplicadas duas distribuições de suportes: Suportes nos quatro pontos nas extremidades (vértices), ou seis pontos (quatro nos vértices externos da base e dois no eixo central).

Para análise estrutural foram consideradas ainda as seguintes propriedades: o aço como material: Steel 235, resistente à tensões e ações externas; Dimensionamento das seções transversais das vigas: tubulares circulares com diâmetro de 13,95 cm e espessura entre 0,5 e 1,5 cm; e as propriedades dos carregamentos: a gravidade e cargas imperfeitas.

## PRIMEIRA ETAPA: MÉTODO DE MODELAGEM ASCENDENTE

As malhas foram obtidas utilizando os dez padrões do *plug-in* Parakeet para Grasshopper e três produzidos manualmente no software Rhinoceros e inseridos como curva, em substituição ao componente do Parakeet. Os pontos de suporte foram introduzidos no Grasshopper pelo componente *Point*. A malha, assim como os pontos de ancoragem são conectados ao componente *Kangaroo Solver*. O algoritmo visual possui também as definições, conforme a Figura 2.



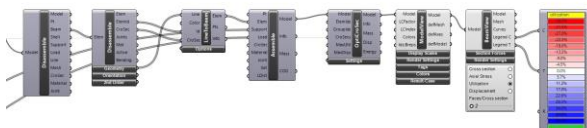
**Figura 2:** Algoritmo visual (GHX) desenvolvido para Modelagem Ascendente. Fonte: os autores.

Elementos de vigas: O componente *explode* é utilizado na malha para dividir as curvas em segmentos que serão convertidos em elementos de viga, utilizando o *LineToBeam*. O componente *BeamJoins* é utilizado para controlar as propriedades das juntas entre os nós. Para a análise, presume-se que as juntas sejam fixas.

Especificação de carregamentos: apenas o peso próprio da estrutura e forças imperfeitas foram consideradas

nesta análise. As cargas foram projetadas em toda a superfície com valores sugeridos como padrão no Karamba3D, atuando no eixo Z negativo.

Por fim, para realizar a análise estrutural, todas as informações foram coletadas pelo componente *AssembleModel*, cuja primeira análise foi atribuída ao *AnalyzeThll*. Em uma segunda análise, a saída do componente *AssembleModel* foi conectada ao componente *LargeDeformation*, com atribuição de 10,0 metros de altura à estrutura. Estes componentes estão conectados ao *ModelView* e o *BeamView*, para visualização e interpretação dos resultados.



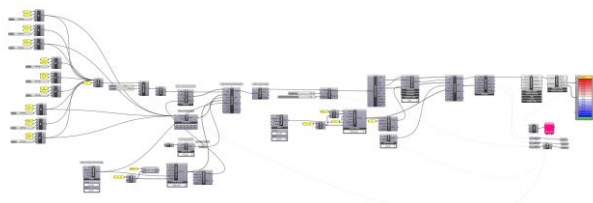
**Figura 3:** Componentes de Análise e visualização do Karamba3D. Fonte: os autores.

## SEGUNDA ETAPA: MÉTODO MODELAGEM DESCENDENTE

Na segunda etapa foi concebida uma casca tridimensional em concreto, posteriormente transformada em uma estrutura treliçada equivalente. O concreto foi adotado por pertencer à biblioteca do Karamba 3D, e ser um material moldável, facilmente adaptável à diferentes geometrias. Nesse caso, o processo de otimização da casca visou a aplicação da malha em uma superfície contínua, em busca de menores deformações e maior controle sobre a geometria. A estrutura também suporta vãos de 25,0 metros (definido na fase de pré-processamento da etapa de Método de Modelagem Ascendente) e é composta por perfis tubulares circulares com as mesmas características da primeira etapa.

O *plug-in* Octopus para Grasshopper foi utilizado na otimização, que teve como parâmetros fixos as dimensões da estrutura e as cargas aplicadas, semelhante à etapa anterior. O objetivo principal foi o melhor desempenho estrutural, com máxima altura e menor peso e deformação. Como valores resultantes da primeira etapa de pré-processamento, adotou-se a variação de altura entre 9,0 e 13,0 metros.

Além disso, a avaliação estrutural da casca pelo Karamba 3D considerou como material o concreto C30/37, o dimensionamento das seções transversais da casca com espessura entre 5,0 e 50,0 centímetros, além da gravidade como carga, uma vez que forças imperfeitas só podem ser aplicadas em elementos de vigas, assim como demonstrado na Figura 3.



**Figura 4:** O algoritmo visual (GHX) desenvolvido para Casca de suporte para *gridshell*. Fonte: os autores.

Na elaboração da definição do modelo de casca contínua, foram definidos pontos interligados para a formação de uma superfície, transformada em *mesh* pelos componentes *SurfaceGrid* e *MeshUV*. Como discutido anteriormente, a densidade da triangulação da malha afeta a precisão, bem como tempo de computação do modelo (ELIASSEN; HUSEBY, 2018). A definição possui também as definições:

**Elementos de casca:** O componente *MeshtoShell* converte o *mesh* para elementos de *shell* no Karamba3D.

**Especificação do material:** O concreto C30/37 foi selecionado entre as opções da biblioteca de materiais no Karamba3D. No componente *CrossSection*, a espessura da casca foi atribuída entre 5,0 e 50,0 centímetros.

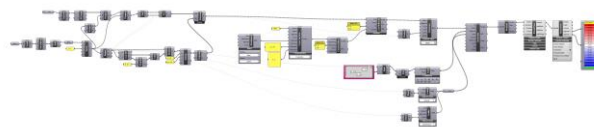
**Especificação dos suportes:** os pontos de ancoragem são extraídos dos vértices da *mesh* e atribuídos ao componente *Supports*, semelhante ao sistema de suporte do *gridshell*.

**Atribuição dos carregamentos:** apenas o peso próprio da estrutura e forças imperfeitas foram consideradas nesta análise, como na definição da primeira etapa.

Para realizar a análise e otimização estrutural, todas as informações foram coletadas pelo componente *AssembleModel*, cuja primeira análise foi atribuída ao componente *LargeDeformation*, com variação da altura da estrutura entre 9,0 e 13,0 metros.

Então, o modelo foi submetido a uma segunda análise pelo componente *OptimizeCrossSection*, capaz de escolher entre os valores da variação da espessura da malha em pontos específicos, atribuída ao *CrossSection*. Do componente *OptimizeCrossSection* existem saídas com valores de deformação e massa que são atribuídos ao motor de otimização Octopus. Estes componentes estão conectados ao *ModelView* e o *ShellView*, para visualização e interpretação dos resultados.

Para estudar o comportamento estrutural o *Gridshell* resultante da casca, foram considerados parâmetros semelhantes à etapa de Método de Modelagem Ascendente: O aço (Steel 235) como material; no componente *CrossSection*, foi selecionada a forma tubular circular com diâmetro e espessura usados para toda a análise (diâmetro de 13,95 cm e espessura entre 0,5 e 1,5 centímetros), demonstrado na Figura 4.



**Figura 5:** *Script* desenvolvido para projeção da malha sobre o Mesh. Fonte: os autores.

Para a configuração da malha, a estrutura resultante da otimização é inserida em um novo arquivo do Rhinoceros e no Grasshopper como componente *mesh*, enquanto os padrões de malha são inseridos como curvas e projetados na superfície do *mesh*. O componente *explode* é aplicado para dividir segmentos de curvas e transformados em vigas pelo componente *LineToBeam*.


O material, sua seção transversal, carregamentos, análise e visualização são configurados como o *script* da primeira etapa.



## RESULTADOS

### DESEMPENHO DA PRIMEIRA FASE DE SIMULAÇÃO: MÉTODO DE MODELAGEM ASCENDENTE

A primeira simulação por meio do Karamba3D foi realizada para *gridshells* com treze composições de malhas utilizando o método da catenária. Analisou-se o comportamento das treze estruturas, com variação de número de apoios (quatro e seis, conforme apresentado na metodologia). Do ponto de vista de desempenho estrutural, ambas apresentam comportamento semelhante, com pequena variação entre os valores de compressão, tensão e massa. No entanto, optou-se pela estrutura de quatro apoios, nos vértices das extremidades, já que são capazes de vencer o mesmo vão, sem apoios intermediários, com maior ganho de altura.


**Tabela 3:** Análise de comparação entre estruturas com quatro e seis apoios em malha composta por quadrados e triângulos. Legenda: U(C)- Utilização de Compressão; U(T)- Utilização de Tensão; M- massa; Altura que a estrutura atingiu e Imagem da estrutura. Fonte: os autores.


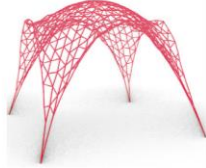


Apoios	U (C)	U (T)	M (kg)	Altura (m)	Imagem
4	-3.2%	11.1%	23071.8	9.5	
6	-2.7%	6.8%	22766.1	6.2	

Após a determinação dos apoios, foi realizada a comparação entre a composição de malhas com segmentos de dimensões iguais e a subdivisão da malha em módulos. Malhas com tamanhos de segmentos padronizados, com dimensões de 5,00 metros, 2,50 metros e 1,25 metros foram comparadas às malhas com padrões geométricos arranjados em modulação central com quatro, dois e um módulo.

**Tabela 4:** Comparação entre malhas de segmentos padronizados e módulos centralizados com mesma composição geométrica de quadrados e triângulos. Legenda: SP – malha com segmentos padronizados; MC – malha com módulo centralizado; U(C)- Utilização de Compressão; U(T)- Utilização de Tensão; M- massa; Altura que a estrutura atingiu e Imagem da estrutura. Fonte: os autores.



Malha	U (C)	U (T)	M (kg)	Altura (m)	Imagem
S.P. 2.5m	-3.3%	11.2%	37268.8	9	
M.C. 2	-1.4%	12.2%	57206.2	16.64	

Notou-se que estruturas com padrões geométricos centralizados em direção às bordas, aumentavam significativamente a massa, mas não a capacidade de suporte das estruturas. Assim, optou-se por malhas com segmentos de dimensões iguais, que começam na origem da base da estrutura, como mais eficientes, já que facilitam a fabricação com a produção seriada das barras (Tabela 02). Além disso, segmentos com 2,50 metros, ou seja, 1/10 do vão da estrutura, produziram *gridshells* com maior capacidade de carga e menor massa em comparações às demais proporções.

Os segmentos das malhas centralizadas, no entanto, como não tiveram as dimensões pré-fixadas, sofreram grande deformação, como consequência da atuação do *plug-in* Kangaroo na construção do *script*. Além disso, essas também geram barras de dimensões desiguais, uma vez que elas sofrem recortes nas extremidades da estrutura. O experimento também demonstrou que malhas que atingiam entre 9,00 e 13,00 metros de altura alcançavam curvaturas com melhor desempenho estrutural. Portanto, esse intervalo de valores tornou-se parâmetro para a otimização da próxima fase.

### DESEMPENHO DA SEGUNDA FASE DE SIMULAÇÃO: MÉTODO DE MODELAGEM DESCENDENTE


Na segunda etapa de simulação, foi produzida uma casca de concreto que simularia o suporte para a construção de um *gridshell* com forma correspondente. A otimização foi realizada usando o Octopus, um *plug-in* para Grasshopper que desenvolve otimização baseada em simulação usando algoritmos genéticos. Esse *plug-in* foi desenvolvido com base em princípios evolucionários multiobjetivo, ou seja, possui a capacidade de fazer referência cruzada de vários parâmetros simultaneamente. Desse modo, produz diversas soluções otimizadas entre os extremos de cada meta (SANTANA, 2015).

A casca otimizada teve como objetivo melhorar sua resistência à carga, porém a partir de pequenos ajustes na forma, resultante da primeira etapa de simulação. A otimização foi configurada para minimizar a massa e o deslocamento, atingindo máxima altura. No entanto, segundo Dźwierżyńska (2020), a minimização de massa e deflexão são objetivos conflitantes, ou seja, quanto

maior a massa, menor deslocamento, enquanto menor é a massa, maior também é o deslocamento.

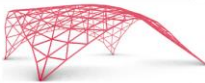

Em simulação, no gráfico da Frente de Pareto, os indivíduos mais próximos da curva são os casos ideais para os três objetivos. Para a essa pesquisa, foi escolhido o indivíduo mais próximo da origem com maior altura, demonstrado na Tabela 5.

**Tabela 5:** Casca resultante do processo de otimização. Legenda: U(C)- Utilização de Compressão; U(T)- Utilização de Tensão; M- massa; Altura que a estrutura atingiu e Imagem da estrutura. Fonte: os autores.

U (C)	U (T)	M (kg)	Altura (m)	Imagem
-95.5%	55.7%	83998.8	10	

Em seguida, o modelo otimizado foi convertido em um *gridshell* correspondente, aplicando as malhas com segmentos de mesma dimensão, com 5,0 metros, 2,50 metros e 1,25 metros para as treze composições de malha. De modo análogo, as malhas com segmentos padronizados da primeira etapa (Método de Modelagem Ascendente) foram submetidas a uma nova simulação, desta vez atribuindo uma altura de 10 metros, para facilitar a comparação entre ambos os métodos.

**Tabela 6:** Comparação entre métodos de modelagem em malha triangular com segmentos padronizados. Legenda: M.C- Método Construtivo; M. A. – Método de Modelagem Ascendente; M.D.- Método de Modelagem Descendente; U(C)- Utilização de Compressão; U(T)- Utilização de Tensão; M- massa; Altura que a estrutura atingiu e Imagem da estrutura. Fonte: os autores.







M.C.	U (C)	U (T)	M (kg)	Altura (m)	Imagem
M.A.	-47.5%	66.6%	17008.2	9.5	
M.D.	-72.1%	71.3%	43863.2	10	

Notou-se que, apesar do Método de Modelagem Ascendente ser o mais recorrente em estudos sobre tema, o Método de Modelagem Descendente gerou estruturas com melhor desempenho estrutural. Para as mesmas composições de malha, a massa da estrutura manteve-se a mesma em ambos os métodos, porém, observou-se melhor desempenho do Método Descendente comparando-se os dados de utilização de tensão e compressão. Além disso, essa melhora significativa demonstra que o *gridshell* otimizado trouxe ganhos em curvatura e altura, independente da composição da malha. No Método Descendente, o *plug-in* Kangaroo não foi utilizado e, portanto, não houve deformação das peças, que se mantiveram da mesma dimensão para facilitar a fabricação.

Em relação à composição geométrica, como esperado, percebeu-se que malhas triangulares geraram estruturas mais rígidas, em decorrência dos nós com seis vértices. Entretanto, notou-se comportamentos semelhantes com




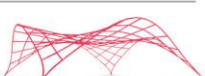


malhas que combinam a composição de quadrados e triângulos ou malhas compostas por triângulos e hexágonos, sugerindo que o arranjo em diagonal seja o elemento estruturador.

**Tabela 7:** Comparação entre padrões diferentes padrões com Método de Modelagem Descendente. Legenda: MC- Método de Modelagem Descendente; U(C)- Utilização de Compressão; U(T)- Utilização de Tensão; M- massa; Altura que a estrutura atingiu e Imagem da estrutura. Fonte: os autores.

M.D.	U (C)	U (T)	M (kg)	Altura (m)	Imagem
	-72.2%	66.6%	35466.3	10	
	-72.1%	71.3%	43863.2	10	
	-77.5%	76.6%	32731.6	10	

Dźwierzyńska (2018) em sua pesquisa descreve que malhas com parâmetro de “utilização” que apresentam resultados muito discrepantes entre compressão e torção, deveriam ser adensadas nos pontos de tensão ou incrementadas no número de suporte. Para a nossa pesquisa, como os números de suporte são constantes, os resultados de utilização serão os indicadores de alterações e adensamento de composição das malhas.

**Tabela 8:** Comparação entre valores de Utilização em malhas compostas por quadrados e triângulos. Legenda: MD- Método de Modelagem Descendente; U(C)- Utilização de Compressão; U(T)- Utilização de Tensão; M- massa; Altura que a estrutura atingiu e Imagem da estrutura. Fonte: os autores

M.D.	U (C)	U (T)	M (kg)	Altura (m)	Imagem
	-58.0%	44.2%	35013.2	10	
	-64.1%	54.2%	26126.5	10	
	-72.2%	66.9%	35466.3	10	

Malhas compostas por quadrados ou quadrados e triângulos na diagonal, demonstram possibilidade de adensamento próxima aos suportes para garantir melhor desempenho estrutural. Isso significaria um incremento da massa da estrutura, porém também menores deformações. Essas informações são essenciais para a continuidade da pesquisa, e serão aprofundadas na etapa de análises de composição geométrica, como estágio preliminar à elaboração de Gramática da Forma.

## CONCLUSÃO

Os algoritmos visuais elaborados para os Métodos de Modelagem Ascendente e Descendente podem ser utilizados para qualquer forma de *gridshells*, com diversos padrões de composição internos de malhas, além de permitir a introdução manual de geometrias por segmentos ou por modelos matemáticos inseridos no Grasshopper.

A intenção deste trabalho foi demonstrar uma abordagem de modelagem paramétrica com testes de desempenho estrutural de um *gridshell* em seu estágio inicial de projeto, considerando o método de modelagem e as características geométricas da estrutura. Apesar de estruturas com Modelagem Ascendente serem mais comuns na literatura, percebeu-se que o método Descendente gerou estruturas com melhor desempenho estrutural.

A partir do método estabelecido e testes compositivos, foram realizados testes de modificação de parâmetros que impactam diretamente o desempenho estrutural, tais como a dimensão dos segmentos das peças, a altura da estrutura, número de suportes, composição e densidade da malha. Esse experimento atua como base para um estudo futuro que visa a produção de malhas otimizadas com uso da gramática da forma como processo generativo de projeto. Informações sobre densidade, direção das peças, número de nós, dentre outras, serão abordadas em trabalhos futuros como estratégias para a criação ou aplicação das regras, com o objetivo de incremento do desempenho estrutural a partir da geometria das malhas.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Nú.Lab (DAU/UFV) pelo suporte para o desenvolvimento desta pesquisa ao CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela bolsa de Mestrado vinculada a este projeto. Também agradecemos ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Viçosa (UFV) pelo auxílio financeiro para apresentação desse trabalho no SIGraDi.

## REFERÊNCIAS

- Adriaenssens, S., Block, P., Veenendaal, D., & Williams, C. (2014). Shell structures for architecture: Form finding and optimization. In *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization* (1st ed., Vol. 9781315849). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315849270>.
- Carvalho, D.F.P.A. (2015). *Gidshells em madeira: morfologia, aplicabilidade, comportamento estrutural e projeto*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.
- Chilton, J. (2016). *Timber gridshells: Architecture, structure and craft* (1o ed). London, U. K: Routledge.
- Dimcic, M (2011). *Structural Optimization of Grid Shells based on Genetic Algorithms* Stuttgart. Dissertação de Doutorado. Universit"at Stuttgart, Alemanha.
- Dzwierzynska, J. (2018). Shaping curved steel rod structures. *Czasopismo Techniczne*, 8. <https://doi.org/10.4467/2353737XCT.18.117.8892>
- Dzwierzynska, J. (2020). Multi-objective optimizing curvilinear steel bar structures of hyperbolic paraboloid canopy roofs. *Buildings*, 10(3),39. <https://doi.org/10.3390/buildings10030039>
- Eliassen, M. Huseby, A.(2018) *The Digital Workflow of Parametric Structural Design Developing Grid Shells in a Nordic Climate*. Tese de Mestrado, University in Trondheim, Noruega.
- Hernández, C. H. (2015). Recent developments in architectural fabric structures in Latin America. In *Fabric Structures in Architecture* (p.585–660).Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-233-4.00017-6>
- Kunz, M., & Prauchner, M. B. (2015). Uso do sistema estrutural gridshell na criação de formas complexas em estruturas de madeira. *Revista de Arquitetura IMED*, 4(1), 19–25. <https://doi.org/10.18256/2318-1109/arqimed.v4n1p19-25>
- Love, A. E. H. (1888).The Small Free Vibrations and Deformation of a Thin Elastic Shell. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 179(0), 491–546. doi:10.1098/rsta.1888.0016
- Naicu, D. I. (2012). *Geometry and performance of timber gridshells*. Dissertação de mestrado. University of Bath, Baht, Inglaterra.
- Oval, R., Rippmann, M., Mesnil, R., Van Mele, T., Baverel, O., & Block, P. (2019). Feature-based topology finding of patterns for shell structures. *Automation in Construction*, 103, 185–201. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.02.008>
- Paoli, C. (2007). *Past and future of grid shell structures*. Dissertação de Mestrado, Massachusetts Institute of Technology – MIT, Massachusetts, Estados Unidos da América.
- Pone, S. D'amico, B. Colabella, S. Flore. A. (2013). Timber post formed gridshell: digital forma finding/ drawing and building tool. In: *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium*. Retrieved from: [https://www.researchgate.net/publication/261285620\\_Timber\\_post\\_formed\\_grid\\_shell\\_digital\\_form\\_finding\\_drawing\\_and\\_building\\_tool](https://www.researchgate.net/publication/261285620_Timber_post_formed_grid_shell_digital_form_finding_drawing_and_building_tool).
- Pottmann, H., Eigensatz, M., Vaxman, A., & Wallner, J. (2015). Architectural geometry. *Computers & Graphics*, 47, 145–164. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2014.11.002>
- Preisinger, C. (2016). *Parametric structural modeling Karamba: User Manual For version 1.2.2*. Retrieved from : [http://web.arch.virginia.edu/struct/arch721/docs/Karamba\\_1\\_2\\_2\\_Manual.pdf](http://web.arch.virginia.edu/struct/arch721/docs/Karamba_1_2_2_Manual.pdf).
- Rieffel, J, Valero-Cuevas, F., Lipson, H., (2009) "Automated discovery and optimization of large irregular tensegrity structures", *Computers and Structures*, Vol. 87, pp. 368-379.
- Santana, L.O; Guimarães, Í.B.B; Carlo, J.C., 2015. Parametrização aplicada ao desempenho energético de edificações. *VIRUS*, São Carlos,11.[online] Retrieved from: <http://www.nomads.usp.br/virus/virus11/?sec=4&item=4&lang=pt>
- Toussaint, M. H.Ba.(2007). *Design Tool for Timber Gridshells*. Dissertação de mestrado. Delft University of Technolog, Delft, Holanda.
- Williams, C. (2014). What is a shell? In Adriaenssens, S., Block, P., Veenendaal, D., & Williams, C. (Eds.). *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization* (pp 21-31). London, U. K: Routledge.

#### 4. CAPÍTULO 4 – UMA ABORDAGEM GENERATIVA COMO FERRAMENTA PARA OBTENÇÃO DE ESTRUTURAS *GRIDSHELLS*

##### RESUMO

Existem pesquisas que abordam o processo de projeto de *gridshells* por meio da otimização da geometria das malhas. Ainda assim, a maioria delas parte de estudos de malhas compostas por quadrados, triângulos e hexágonos. Nesse sentido, a pesquisa visa ampliar a variabilidade de soluções para composições geométricas de malhas, relacionadas ao desempenho estrutural. Com o objetivo de formular uma metodologia para aplicação de regras de gramática da forma em *lattices*, exploramos a variabilidade de padrões que podem aferir o desempenho estrutural. A metodologia parte de uma seleção preliminar de malhas ao qual procuramos entender e extrair as regras de gramática da forma associadas à simulação estrutural preliminar. Dessa forma seguimos com a requalificação e formulação de novas malhas de acordo com os parâmetros elencados durante as simulações preliminares. Como resultados, esse artigo apresenta a avaliação do desempenho estrutural de *lattices*, a partir de diferentes regras de gramática da forma, considerando como variáveis os esforços de compressão, tração e massa da estrutura. O método apresentado amplia a variabilidade de composições geométricas para as malhas de *gridshells*, combinando-as à análise de desempenho estrutural.

Palavras-chave: Gramática da forma. *Lattice*. Desempenho estrutural. Karamba3D.

## 4.1 Introdução

Na última década o *Gridshell* de superfície complexa tem se tornado popular como cobertura para grandes espaços desobstruídos, sendo utilizada como solução arquitetônica para instalações temporárias e para eventos públicos (RICHARDSON et al., 2013). O *Gridshell* é um tipo de estrutura de forma curva, é formado por uma malha treliçada que permite “uma grande variabilidade arquitetônica, aliada a um bom desempenho estrutural” (CARVALHO, 2015 p.3).

Estruturalmente, o *gridshell* deriva sua resistência a cargas da forma da superfície, das condições de suporte e dos nós, e principalmente da geometria global que compõe a malha treliçada (RICHARDSON et al., 2013).

Relativo à geometria global, o padrão da malha influencia aspectos da estrutura como a montagem, fabricação, custo e, principalmente, segurança e estabilidade da estrutura (RICHARDSON et al., 2013; OVAL et al., 2019). Dessa forma, este capítulo aprofunda os estudos de geração geométrica para composição de malhas de *gridshells* utilizando uma abordagem visual baseada na gramática da forma.

Esse estudo aborda duas hipóteses: (1) a gramática da forma como método generativo para ampliar a variabilidade compositiva do padrão de malhas de *gridshell*; e (2) a possibilidade de incremento do desempenho estrutural do *grid* a partir da definição de regras de gramática da forma que combinem diferentes padrões geométricos.

Esse capítulo visa responder ao objetivo de definir parâmetros formais para gramática da forma e desenvolver simulações estruturais, fornecendo um processo de projeto alternativo utilizando as Redes Quadriculadas (*Checkerboard lattice grammar*), ou *lattices*, para a formulação de *designs* de malha.

As redes quadriculadas, um subconjunto específico dos designs de malhas chinesas que preenchem molduras quadradas, e fornecem uma base inicial para discutir ideias-chave em composição formal, incluindo repetição, recursão, modulação, malhas, molduras, limites, proporções, simetria, dentre outros (GRASL; ECONOMOU, 2017 p.7- tradução dos autores<sup>7</sup>).

---

<sup>7</sup> *The checkerboard lattice designs, a specific subset of the Chinese lattice designs that fill window frames provide a great initial framework to discuss key ideas in formal composition including repetition, recursion, modularity, grid, frame, boundary, proportion, symmetry, and many more (GRASL. ECONOMOU, 2017 p.7).*

Limites das estruturas, ou seja, tipo de contornos da base, no caso desta pesquisa a base é quadrada, *grids*, simetrias e modularidade são características importantes para a constituição do *gridshell*, por esse motivo, o *lattice* foi adotada para a geração de composições de malhas.

Dessa forma, esse estudo está estruturado em quatro etapas: (1) revisão de literatura sobre gramática da forma, gramáticas de redes quadriculadas (*lattice grammars*) e estado da arte sobre desempenho estrutural e composição geométrica em *gridshells*; (2) definição das dimensões do *grid* para as gramáticas *lattice* e *gridshell*; (3) simulações de desempenho estrutural em *Grasshopper* com o *plugin Karamba3D*, de gramáticas de *lattice*; e (4) elaboração de regras para geração de gramática da forma e respectivas simulações de desempenho estrutural, em *Grasshopper* com o *plugin Karamba3D*.

## 4.2 Composições geométricas e equilíbrio estrutural

Segundo Adriaenssens et al. (2014), existem alguns parâmetros para o processo de *form-finding* de *gridshells*. Dentre eles, a condição de suporte, da forma do modelo e a relação da geometria da malha com forças internas. A composição da malha é importante para garantir um bom desempenho estrutural sendo responsável pelo seu equilíbrio (OVAL et al., 2019; PELLIS; POTTMANN, 2018; RICHARDSON et al., 2013). Assim, nesse tópico são apresentadas abordagens de composição de malha como fator para otimização estrutural de *gridshells*, bem como considerações sobre as composições geométricas das malhas.

Segundo Pottmann et al. (2015), a constituição geométrica das malhas influencia na eficiência estrutural e na fabricação. Malhas hexagonais possuem poucos segmentos, dificultando o preenchimento de regiões com curvaturas. Apesar disso, podem ser malhas rígidas devido à dualidade com malhas triangulares, pois malhas hexagonais são geralmente formadas pela junção de seis triângulos com um nó em comum.

Dźwierzyńska (2018) e Pottmann et al. (2015) afirmam que malhas triangulares são mais comuns pois são capazes de produzir estruturas de forma livre permanecendo rígidas. Além disso, em um processo de otimização é possível

mover os segmentos de malhas triangulares livremente mantendo a planificação da superfície (POTTMANN et al., 2015).

No entanto, para Richardson et al. (2013), apesar das malhas triangulares favorecerem a planicidade das faces em uma superfície curva, elas não são necessariamente mais eficientes, uma vez que alguns seguimentos são empregados apenas para a continuidade do padrão geométrico, influenciando pouco na estabilidade estrutural.

Comparativamente, malhas quadriculadas podem cobrir o dobro da área de malhas trianguladas, em condições semelhantes. A utilização de módulos quadrados reduz o gasto de material e a massa da estrutura, porém, pode dificultar a construção e fabricação de estruturas curvas, gerando quadriláteros com ângulos internos agudos (POTTMANN et al., 2015). Outro desafio para malhas quadriculadas é atingir a planicidade das faces em relação à superfície de referência. Nas pesquisas de Peng et al. (2019) e Richardson et al. (2013), os autores abordam a composição de malhas irregulares com combinações de triângulos e quadrados. Essa organização parte de um eixo guia na curvatura principal da estrutura e facilita a planificação dos quadrados em áreas curvas, criando maior similaridade com a estrutura (PENG et al., 2019).

Entre as abordagens de pesquisas em que se utilizam diferentes composições geométricas, esses autores discutem que o modo mais eficiente para otimizar a eficiência estrutural de um *gridshell*, é garantindo que as direções dos segmentos se alinhem à curvatura principal da superfície de referência a fim de gerar uma estrutura livre de torção (PELLIS; POTTMANN, 2020; PELLIS; POTTMANN, 2018; PENG et al., 2019; RICHARDSON et al., 2013).

Kazemi, Vaziri e Norato (2020), Pellis e Pottmann (2020), Peng et al., (2019) e Beghini et al. (2014), também discutem questões como simetria e condições de contorno, ou seja, as bordas da estrutura, na produção de malhas para *gridshells*. Para esses autores, a simetria da malha deve partir de um eixo guia na curvatura principal da estrutura, coincidente com as forças axiais. Dessa maneira, é possível alinhar os nós, possibilitando uma estrutura livre de torção.

Além disso, é importante considerar as condições de contornos para que as faces das composições de malha permaneçam inteiras no perímetro da estrutura, para que facilite a fabricação e construção da estrutura (KAZEMI; VAZIRI; NORATO, 2020).

De maneira geral, essas pesquisas tem em comum a utilização da otimização como método para produzir *gridshells* eficientes com diferentes abordagens, ressaltando que existe a necessidade de produzir padrões otimizados. Porém, essa dissertação aplica otimização nos *gridshells* independente do padrão geométrico. Portanto, essa pesquisa parte da hipótese de que a gramática da forma pode criar variabilidade de composições geométricas para malhas e que pode resultar no melhoramento no desempenho estrutural.

### 4.3 Conceituação da gramática da forma

Como discutido anteriormente, essa pesquisa objetiva a formulação de composição de malhas de *gridshells* por meio do processo generativo da gramática da forma. Essa técnica é baseada em regras visuais para a produção de padrões bidimensionais ou tridimensionais. O formalismo conhecido como gramática da forma (*Shape Grammar*), foi desenvolvido na década de 1970 por Stiny e Gips e consiste em um conjunto de regras de transformação, a partir de uma forma original aplicadas de modo recursivo (STINY, 1980).

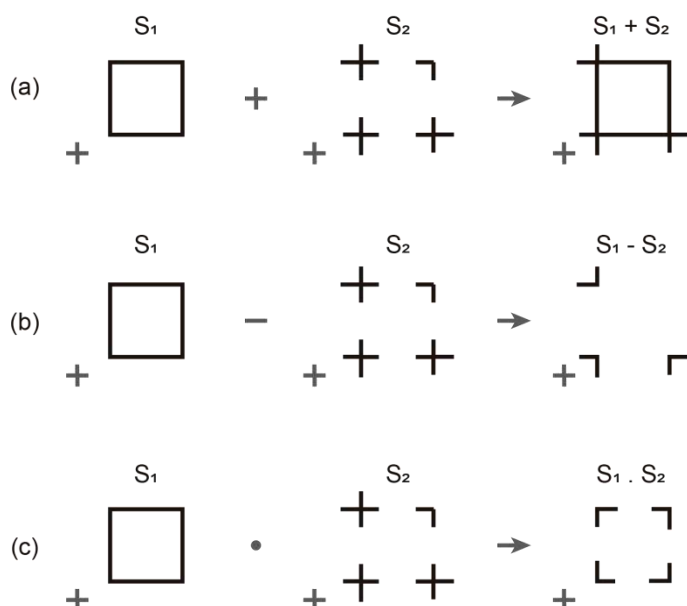
A gramática da forma está inserida na área de conhecimento de *Design Computacional* e é baseada na aplicação de regras para realização de cálculos visuais utilizando formas (CELANI, 2011).

Apesar de o nome remeter ao uso de computadores, o *design computing* não consiste, necessariamente, na implementação de aplicativos em computador ou no uso da programação, implicando, simplesmente, uma maneira de pensar sobre o projeto de maneira lógica e matemática (CELANI et al., 2006 p. 183).

A gramática da forma se configura como processo de projeto generativo e “pode ser utilizada visando à otimização (convergência) ou à variedade (divergência), por meio da geração de múltiplas alternativas” (CELANI, 2011). Por esse motivo, esse processo de projeto passou a ser associado a programas de modelagem paramétrica, apesar de não necessariamente exigir emprego do computador. Ele se baseia no processo de projeto lógico e matemático utilizando formas, mesmo que analogicamente (CELANI, 2011).

As regras de composição sobre as formas atuam recorrendo a transformações booleanas com operações de adição, subtração e interseção e transformações euclidianas, como translação, rotação, reflexão e escala (BEIRÃO, 2004).

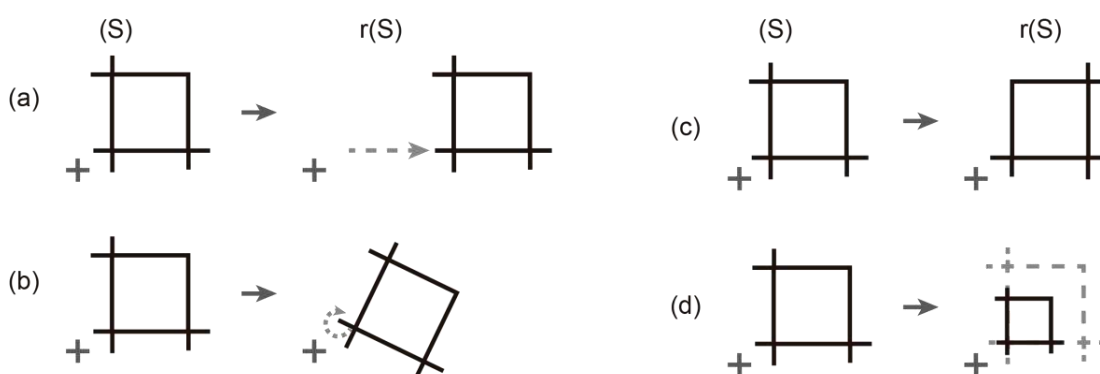
Figura 1 – Operações booleanas (a) adição; (b) diferença; (c) interseção.



Fonte: Os autores.

Na figura 1, em (a), a operação booleana de adição resulta na geometria em que ambas as regras estejam presentes ( $S_1+S_2$ ). Em (b) a geometria de resultado é a diferença entre as regras ( $S_1-S_2$ ). Em (c), a interseção é o que existem em comum entre as regras ( $S_1.S_2$ ).

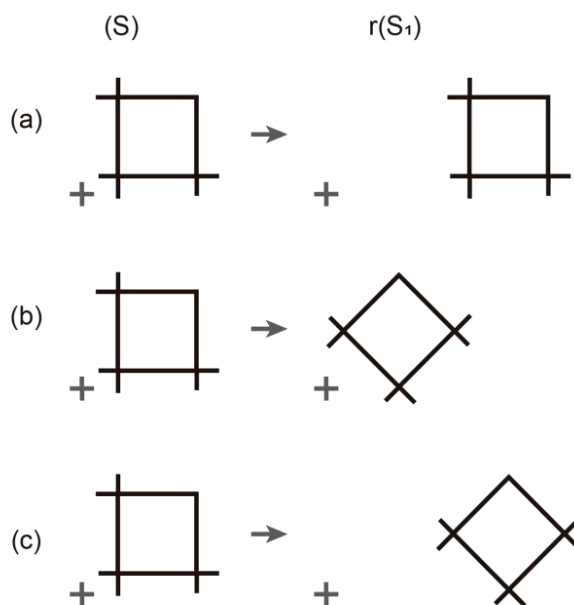
Figura 2 – Operações euclidianas. (a) translação; (b) rotação; (c) reflexão; (d) escala.



Fonte: Os autores

Na figura 2, (a) demonstra a transformação de translação, ou mudança de localização da regra; (b) é referente à transformação de rotação, ou mudança de orientação da regra; (c), referente à reflexão e (d) referente à mudança de tamanho, ou escala.

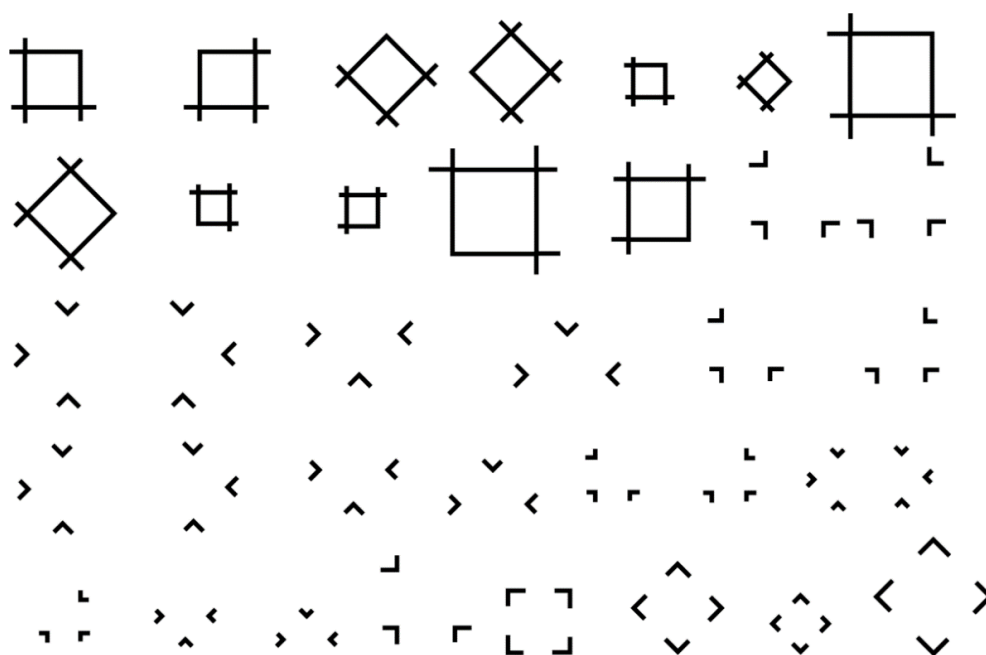
Figura 3 – Operações euclidianas aplicadas em uma geometria inicial.



Fonte: Os autores.

As operações booleanas e euclidianas podem ser aplicadas juntas, ser decompostas e recompostas, gerando grande variabilidade de regras. Na Figura 3 são representadas transformações euclidianas aplicadas simultaneamente. Em (a),  $r(S_1)$  é o resultado de S mais a transformação de translação. Em (b),  $r(S_1)$  é o resultado de S mais a transformação de mudança de orientação. Em (c),  $r(S_1)$  é o resultado de S mais as transformações de translação e de rotação.

Figura 4 – Variabilidade gerada por gramática da forma.



Fonte: Os autores.

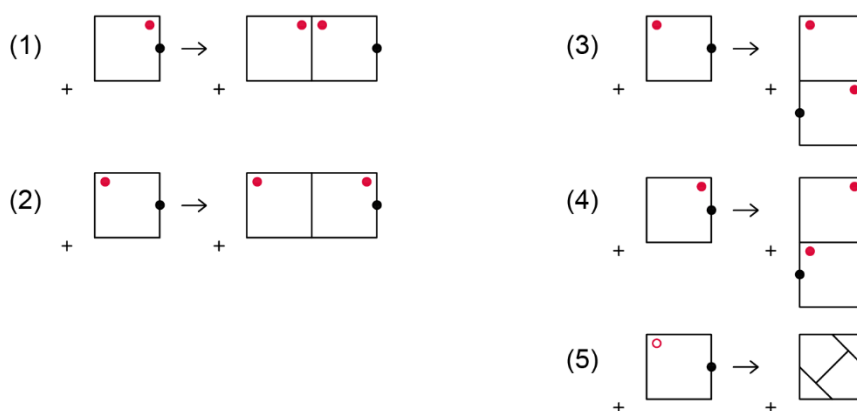
Dessa maneira, a grande qualidade da gramática da forma, é a capacidade de gerar variabilidade de design (CORREIA; DUARTE; LEITÃO, 2012). Na figura 4 é representado parte da variabilidade gerada a partir de transformações booleanas e euclidianas em uma forma inicial, uma vez que existem infinitas possibilidades.

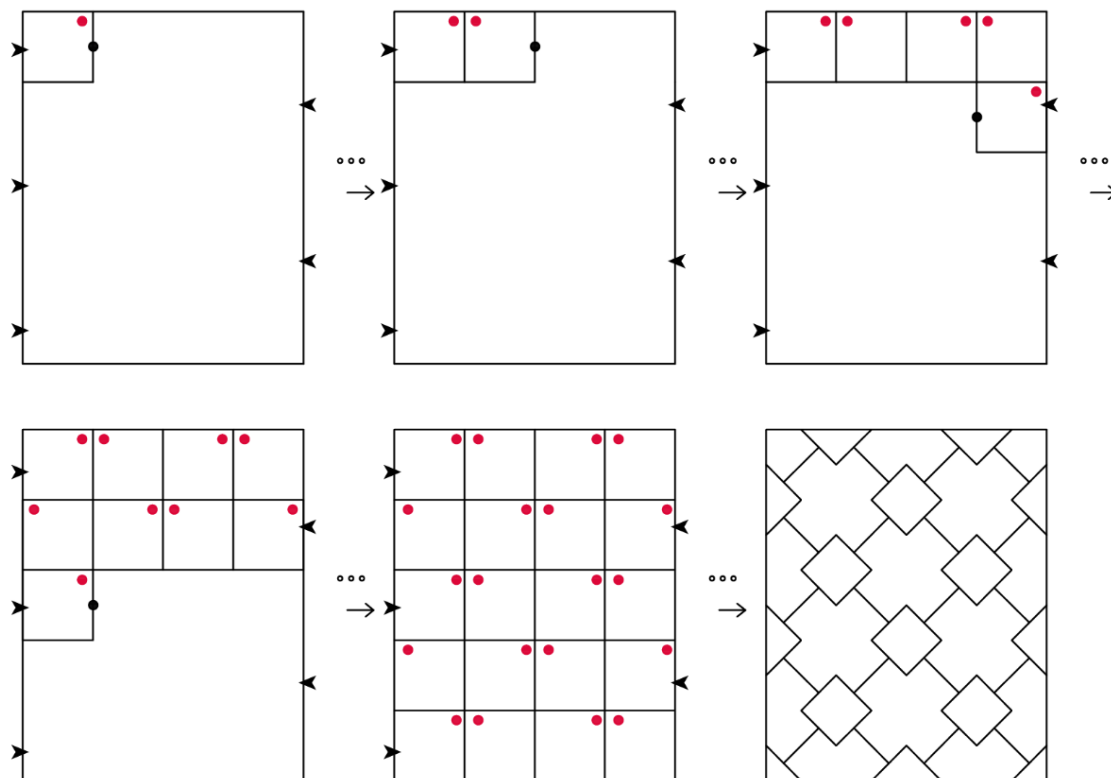
#### 4.4 Teoria do *Lattice*

O *lattice* é um tipo de gramática da forma desenvolvida por Stiny (1977) partindo de estudos de *desenhos* tradicionais chineses. Nesse formalismo, as regras são aplicadas em um *grid* formado por um conjunto de módulos rotulados (*Labelled Shapes*) (STINY, 1977; GRASL; ECONOMOU, 2018) que fornecem uma estratégia de causa e efeito. A mudança ou aplicação de uma regra simples permite a observação da mudança completa na composição original da malha (GRASL; ECONOMOU, 2018).

A figura 5 demonstra a obtenção do *grid* modulado rotulado no qual as regras são aplicadas para produzir o *design* da malha. O *grid* é obtido por transformações de adição pelas regras de (1) a (4). Dessa forma, as regras são aplicadas de forma a sempre adicionar um módulo do *grid*. A regra (5) foi utilizada para exemplificar a aplicação de uma regra que está em conformidade com a posição dos rótulos.

Figura 5 – Formulação do *grid* rotulado como base para a obtenção de *Lattices*.





Fonte: Adaptado de Stiny (1977).

Para Grasl e Economou (2018) e Chau et al. (2018), *lattices* podem ser utilizados para análises de conceitos como repetição, proporção, simetria e limite, uma vez que existe uma estrutura periódica. Como discutido anteriormente, esses conceitos são importantes para assegurar o desempenho estrutural de um *gridshell* e o *lattice* tem essas características inerentes ao seu processo de projeto.

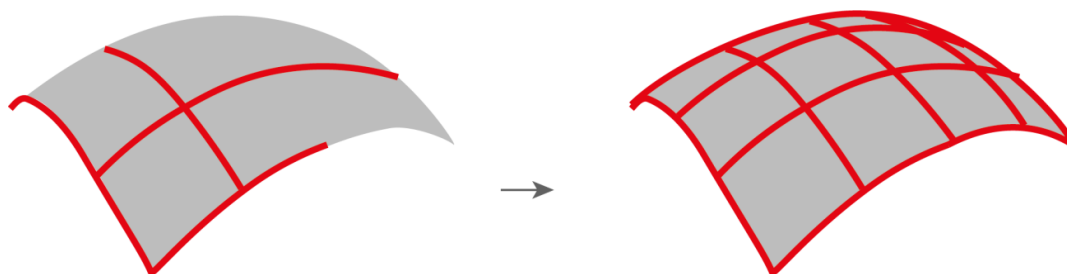
#### 4.5 Procedimentos Metodológicos

Nesse capítulo são propostas duas etapas metodológicas. A primeira etapa busca: (1) revisão e seleção preliminar das malhas; (2) caracterização das malhas; (3) extração das regras de gramática da forma; (4) simulação estrutural preliminar; (5) seleção das malhas com melhor desempenho estrutural; (6) requalificação das malhas de acordo com os parâmetros elencados. A segunda etapa busca a (7) formulação de uma gramática da forma aplicando os melhores parâmetros elencados.

A metodologia parte dos resultados das etapas anteriores, portanto, as estruturas foram modeladas em método descendente, caracterizado por uma casca

em que o *gridshell* se apoia, formando uma estrutura com forma correspondente, conforme a figura 6.

Figura 6 – Método de modelagem descendente.

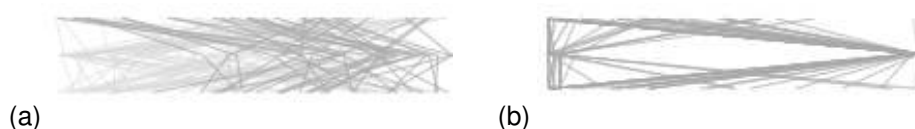


Fonte: Os autores.

As simulações estruturais foram realizadas na suíte de modelagem *Rhinoceros3D + Grasshopper*, utilizando o *plugin Karamba3D*. Nesse capítulo utilizamos uma casca de base quadrada 24m por 24m submetida a um novo processo de otimização com algoritmos genéticos no *Octopus*<sup>8</sup>. Os objetivos da simulação consistem em: maximização do valor de utilização, ao qual deve se aproximar de 100%, altura (variando de 9 a 13 m) e minimização da massa e deformação por flambagem.

No processo de otimização, foi selecionado o intervalo máximo de 30 gerações com população de 50 indivíduos, baseado em testes prévios de otimização. Assim como no capítulo anterior, a convergência das soluções foi considerada como critério de parada. Na figura 7 é apresentado o gráfico de convergência da primeira geração (a) e da décima geração (b), indicativo de convergência.

Figura 7 – (a) Convergência dos parâmetros da primeira geração e (b) na décima geração




Fonte: Os autores.

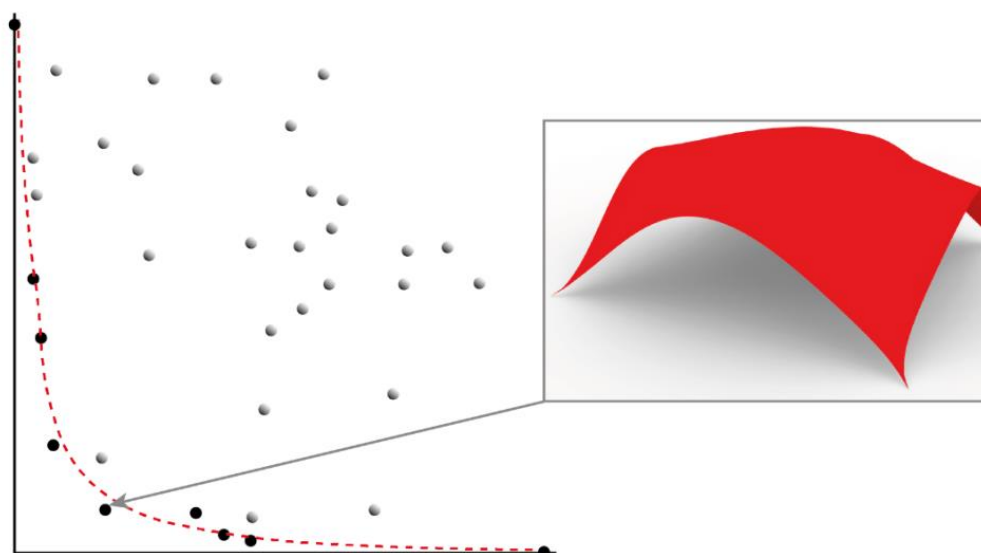
Entre todos os modelos que compunham o Diagrama de Pareto, a casca selecionada se localizava no joelho da curva, com 9.8 metros de altura e utilização

<sup>8</sup> *Plugin para Grasshopper*, que busca por indivíduos otimizados a partir do processo de otimização evolutiva multi-objetivo.

de compressão de -99.8% e utilização de tração de 63.4%, (Tabela 1). O Diagrama e Pareto ou Curva ABC é um método de análise de dados que separa os resultados de maior impacto em uma curva com soluções ótimas potenciais. Como o resultado ótimo deve considerar os parâmetros igualmente, escolhemos trabalhar com um resultado no joelho da curva (SIMONETTI; ASSIS; ALMEIDA, 2021)

Tabela 1 – Casca obtida por otimização. Legenda: (U) Utilização.

U (Compressão)	U (Tração)	Massa (kg)	Altura (m)	Imagem
-99.8%	63.4%	769858.7	9.8	



Fonte: Os autores.

Os *lattices* foram aplicados sobre essa casca para produzirem *gridshells* com forma correspondente. Uma limitação do Karamba3D é não trabalhar com parâmetros de materiais brasileiros. Portanto, foi selecionado um material com as propriedades mais parecidas com os disponíveis no Brasil. Para simulação estrutural, foi selecionado o material Aço 235 em formato tubular circular com diâmetro de 13,95 centímetros e espessura com variação entre 0,5 centímetros e 1,5 centímetros, disponível no *plugin*. Considerou-se as juntas como nós rígidos e a gravidade e as cargas excêntricas foram aplicadas uniformemente em toda a estrutura.

Na análise estrutural, foram considerados os valores de massa e *Utilization*, um valor em porcentagem referente ao estresse máximo do material considerando as cargas aplicadas e propriedades do material. Dessa forma, estruturas com

valores de *Utilization* entre 0% e 100% são estruturas seguras, porém, quanto mais próximas a zero significam que são mais robustas em que aproveitam pouco a capacidade de carga do material.

Dessa forma, esta pesquisa busca pela segurança, mas também a eficiência estrutural. Assim procuramos estruturas com valores de *Utilization* de tração e compressão próximos a 100%, pois significa que a estrutura está aproveitando todo o potencial de carga do material. Destacamos que o *plugin já* considera uma margem de segurança com a resistência de limite último, fornecendo níveis de segurança de 40%, de forma que o resultado obtido não leva ao colapso da estrutura por utilizar 100% da capacidade de carga da estrutura.

#### 4.5.1 Pré-processamento de malhas *lattices*

As primeiras análises foram realizadas utilizando cinco malhas *lattices* geradas a partir do método definido no estudo de Grasl e Economou (2018). Os autores mencionados são referência em pesquisa sobre *lattice* e desenvolvem trabalhos em assuntos similares ao desenvolvido nessa dissertação.

Essa etapa de análise teve como objetivo decodificar regras de gramática da forma aplicadas em um *lattice* e sua relação com o desempenho estrutural. Inicialmente as malhas foram simuladas como primeiro teste para avaliar a eficiência estrutural de cada uma.

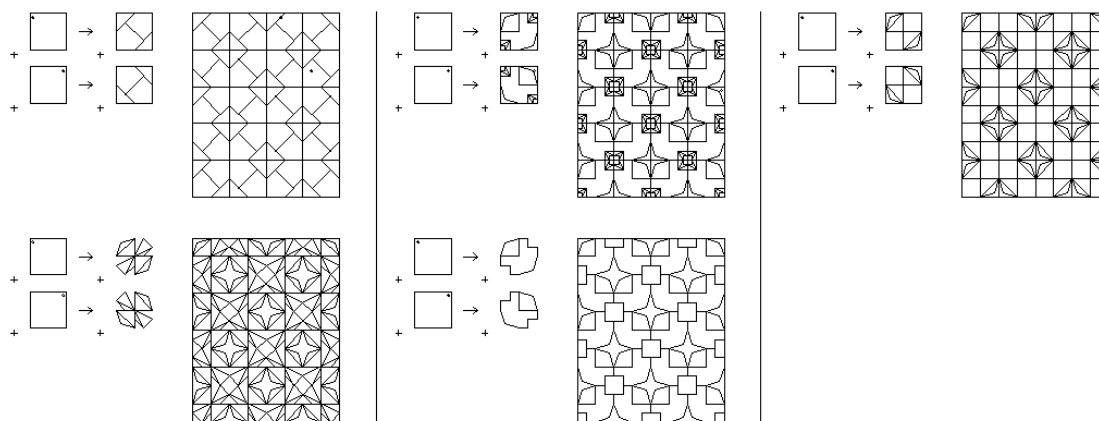
A primeira malha foi retirada da pesquisa de Grasl e Economou (2018) e as outras quatro malhas foram retiradas do site *Shape Computacional Lab*, resultantes de uma disciplina ministrada em 2018 por Athanassios Economou e Kurt Hong (2018) na *Georgia Institute of Technology (Georgia Tech, Estados Unidos)*.

Esses autores utilizaram o *plugin Shape Machine* para o *Rhinoceros*, desenvolvido no *Shape Computation Lab* para a aplicação de regras de gramática da forma parametricamente. Contudo, esse *plugin* não é de acesso livre, dessa forma, essa pesquisa foi desenvolvida utilizando a aplicação e modificação das regras analogicamente no *Rhinoceros*.

De todos os *lattices* apresentados nos estudos de Grasl e Economou (2018) e Economou e Hong (2018), as malhas foram selecionadas pelos seguintes pré-requisitos: não apresentar segmentos curvos e não apresentar regras em que os

segmentos não se interliguem. Dessa forma, as malhas selecionadas são apresentadas na figura 8.

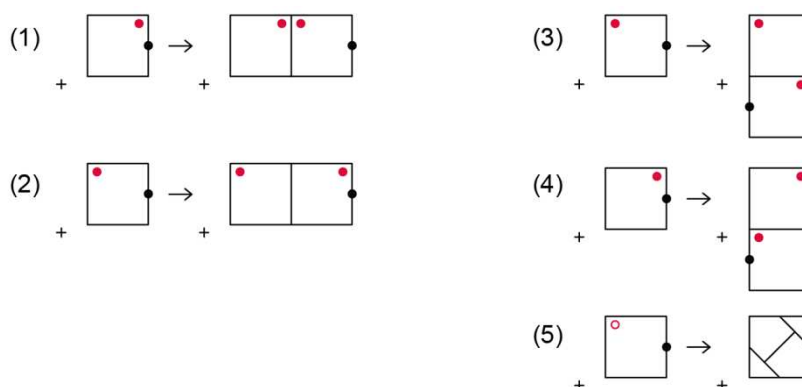
Figura 8 – *Lattices* para pré-processamento.

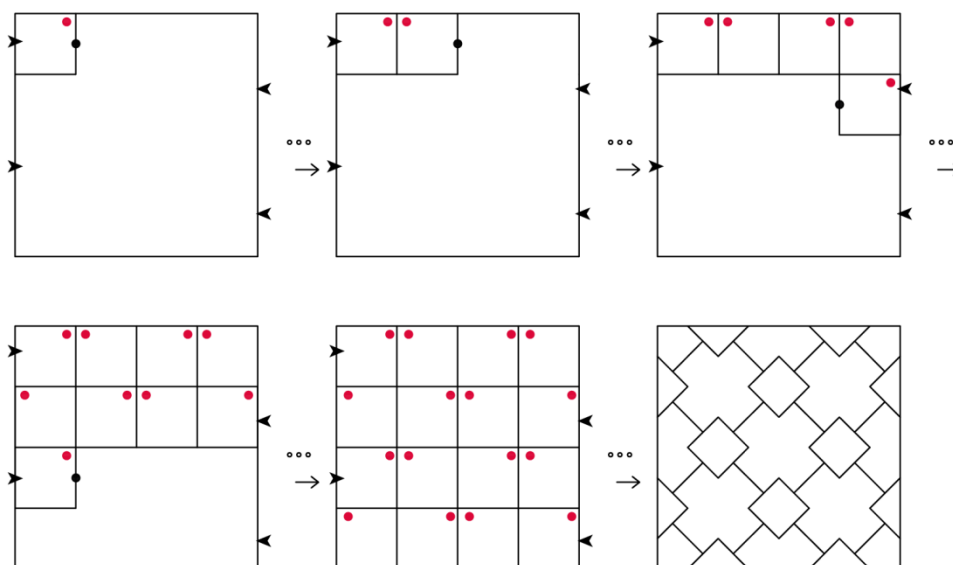


Fonte: Adaptado de Grasl e Economou (2018) e Economou e Hong (2018).

Para tanto, as malhas precisaram ser adequadas para a realização desse estudo. Inicialmente, as malhas são constituídas por contornos retangulares de 5 metros por 4 metros (Figura 8). Para utilizá-las de acordo com a metodologia estabelecida de um *gridshell* de base quadrada de 24m por 24m, reconfiguramos as malhas retangulares e aplicamos em um *grid* rotulado quadrangular mantendo as escalas apropriadas e as regras estabelecidas pelos autores (Figura 9 e Figura 10).

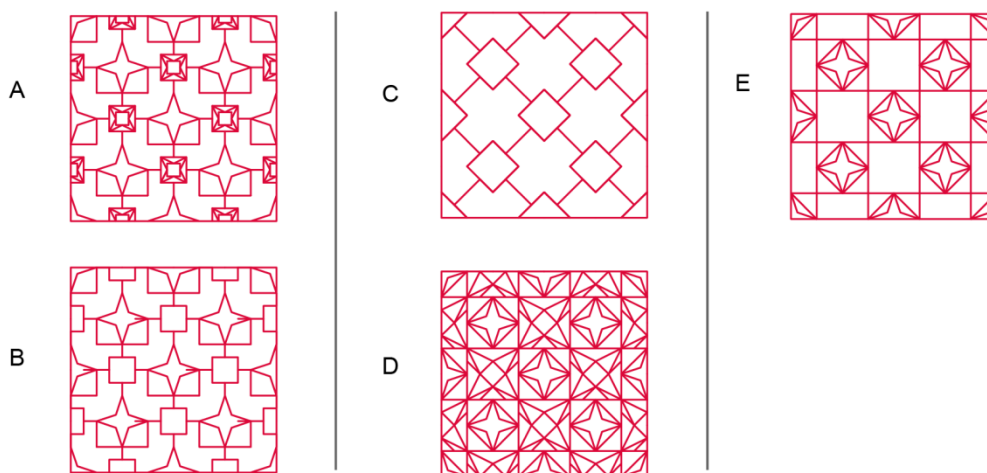
Figura 9 – Transformação do *grid* inicial para aplicação das malhas.





Fonte: Os autores.

Figura 10 – Malhas adaptadas de Grasl e Economou (2018).



Fonte: Adaptado de Grasl e Economou (2018).

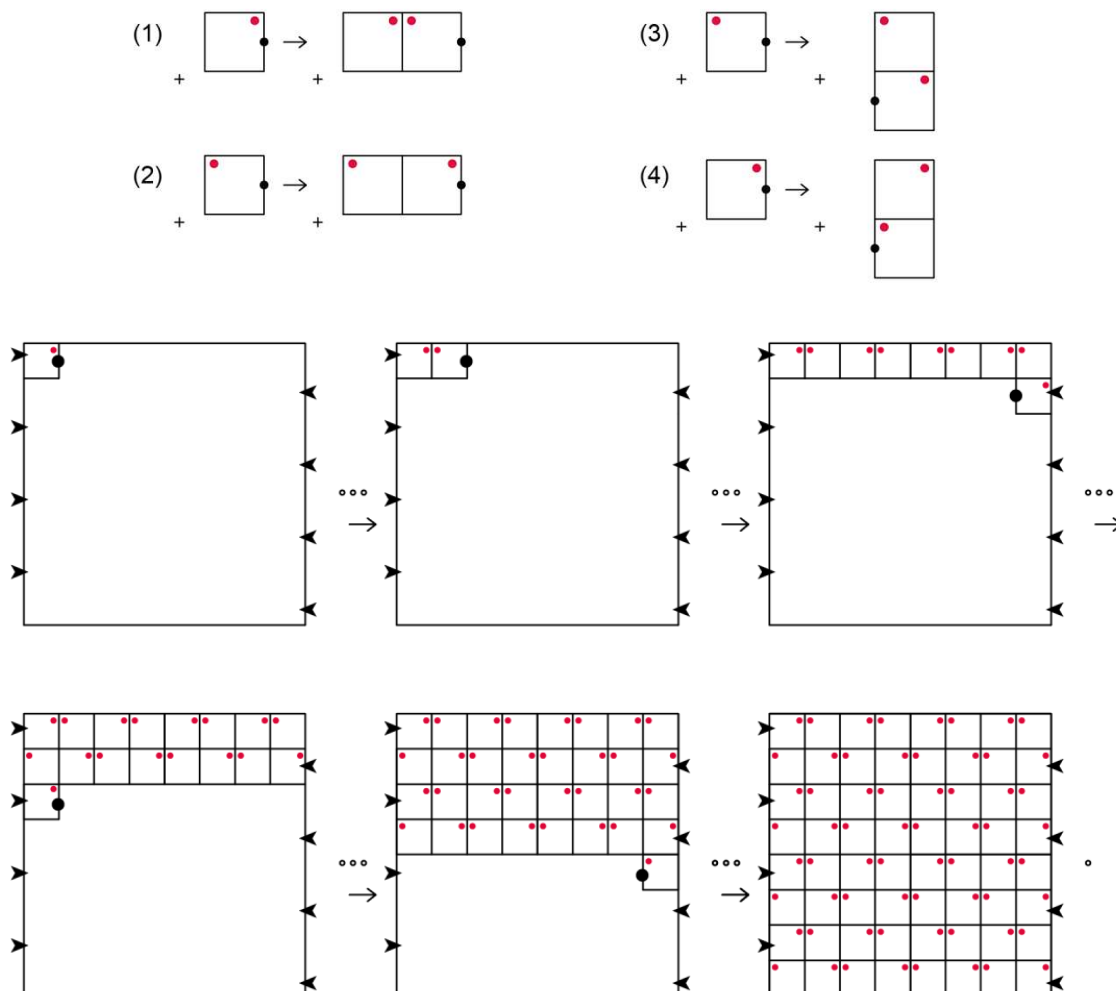
As malhas passaram por simulação no Karamba3D e tiveram como objetivo entender as combinações de regras que resultam em estruturas *gridshells* com melhor eficiência estrutural.

A partir dos resultados das simulações, selecionamos as malhas com melhor e pior valor de *Utilization* e pudemos propor as primeiras modificações para as regras. Cada malha passou por modificações como: intervenção no tamanho dos segmentos, exclusão de segmentos incompletos e aumento de segmentos na diagonal.

Para diminuir o tamanho dos segmentos e aumentar a densidade das malhas das malhas, o *grid* rotulado foi reduzido para  $\frac{1}{4}$  do seu tamanho original e

repetido para manter a base quadrada de 24m x 24m, resultando em um *grid* rotulado com 64 módulos, exemplificado na figura 11.

Figura 11 – *Grid* rotulado com 64 módulos.



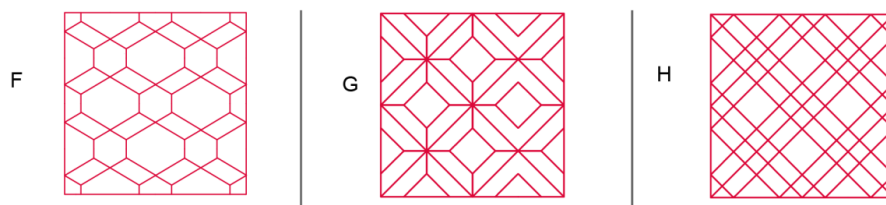
Fonte: Os autores.

#### 4.5.2 Segunda Etapa – elaboração de regras de gramática da forma para malhas *lattices*.

A segunda etapa parte simulação no Karamba3D de malhas produzidas por gramática da forma analogicamente no *Rhinoceros*. Dessa forma, foram propostas três malhas (figura 12). A malha F foi submetida a simulação com o objetivo de descobrir o nível de importância da continuidade dos segmentos do padrão e as malhas G e H foram testadas com o objetivo de verificar a densidade da malha e a quantidade e localização ideal dos segmentos em diagonal. Assim, as malhas G e

H e suas variações são apresentadas conforme os sub tópicos: localização das diagonais e densidade das malhas.

Figura 12 – Malhas propostas para segunda etapa de simulação.



Fonte: adaptado de Grasl e Economou (2018).

Assim como na etapa anterior, as regras foram aplicadas nos grids rotulados de 16 e 64 módulos para experimentar a densidade das malhas.

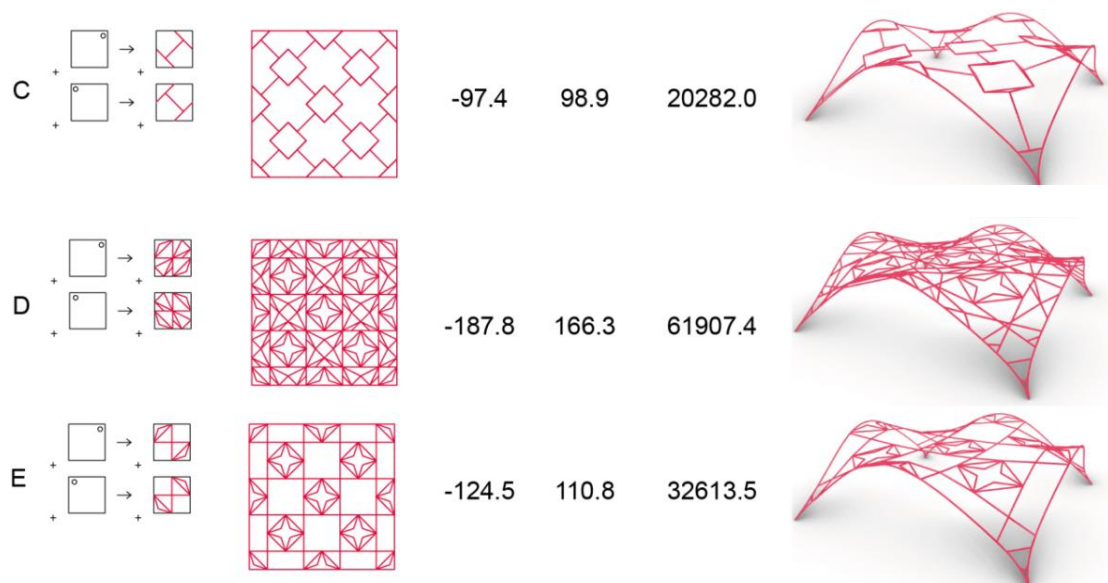
## 4.6 Resultados

### 4.6.1 Etapa de pré-processamento de malhas *lattices*.

Conforme discutido anteriormente, essa etapa teve como objetivo decodificar as regras de gramática da forma e sua relação com o desempenho estrutural. Dessa forma, as malhas passaram por simulação estrutural inicial para obter as primeiras análises do comportamento estrutural dos *lattices*, conforme a tabela 2.

Tabela 2 – Simulação estrutural das malhas A, B, C, D e E.  
Legenda: S.R – Sequencia de regras; T.S – Tamanho dos segmentos; U.C- Utilização de Compressão; U.T- Utilização de Tração; M- massa.

S. R	Malha	U. C (%)	U. T (%)	M (Kg)	Estrutura
A		-164.6	160.5	33350.8	
B		-109.3	103.8	28761.5	

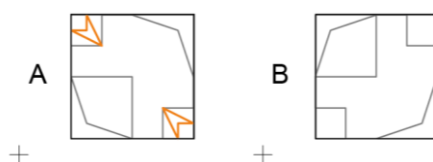


Fonte: os autores.

De acordo com nos resultados mostrados na tabela 2, a malha C apresentou resultados considerados adequados, ou seja, com *utilization* próximos a 100%. Esse resultado pode ser sugerido pela menor massa dentre as malhas apresentadas. As malhas A, B, D e E utilizam mais do que a capacidade de carga do material, o que resulta em estruturas impraticáveis, uma vez que não suportam a carga do peso próprio.

Ademais, percebemos que a malha B é a simplificação da malha A, conforme exemplificado na figura 13. Os elementos identificados em laranja, quando retirados, diminuiriam a massa da estrutura, resultando na diminuição dos valores de *utilization* em cerca de 50%.

Figura 13 – Simplificação da regra A e regra B.



Fonte: os autores.

Esse resultado sugere que os elementos em laranja, quando dispostos em simetria, acumulam segmentos nos nós, aumentando a massa da estrutura e dificultando a distribuição das cargas em pontos de tensão. Apesar da estrutura ainda ser instável, a simplificação da regra possibilitou a melhora na eficiência estrutural.

Dessa forma, o primeiro parâmetro levantado nessa análise se refere à simplificação das regras, considerando que quando aplicada em um *grid* rotulado que reproduz a regra em simetria e com repetição, faz com que esses elementos se encontrem em um nó.

- Modificações referentes à malha C

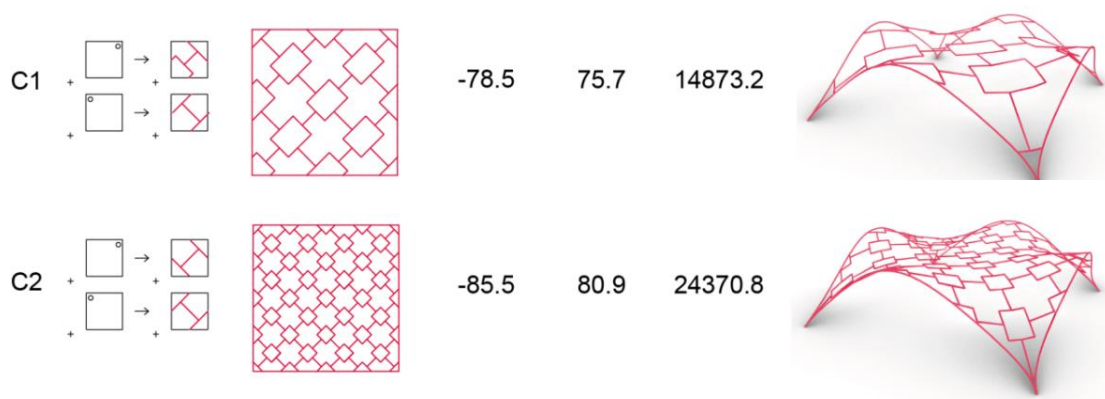
A malha C apresenta os melhores valores de *Utilization*. Portanto, para o propósito dessa pesquisa, buscamos identificar quais fatores tornaram essa malha adequada do ponto de vista da capacidade de suporte do material em relação às cargas. Inicialmente procuramos entender a relação entre o tamanho dos segmentos e a eficiência estrutural.

O arranjo C1 buscou aumentar o tamanho dos segmentos, enquanto o arranjo C2 buscou pelo aumento da densidade da malha utilizando o *grid* rotulado de 64 módulos, gerando malhas com segmentos menores. Ou seja, as malhas produzidas por esse *grid* têm quatro vezes mais segmentos, representado na tabela 3.

Tabela 3 – Simulação estrutural das malhas C, C1 e C2.

Legenda: S.R – Sequencia de regras; T.S – Tamanho dos segmentos; U.C- Utilização de Compressão; U.T- Utilização de Tração; M- massa.

	S. R	Malha	U. C (%)	U. T (%)	M (Kg)	Estrutura
C2						
C			-97.4	98.9	20282.0	



Fonte: os autores.

Nessa análise percebemos que a malha C1 não chega ao limite de carga do material, mas têm massa inferior as outras. Esse resultado sugere que o aumento do tamanho do segmento diminui o espaçamento entre as diagonais, o que melhorou sua resistência às cargas. Além disso, manteve a continuidade dos segmentos nos eixos diagonais entre os suportes. Essa configuração permite que as tensões sejam distribuídas uniformemente independentes dos tamanhos dos segmentos.

A diagonal pode ser considerada como contraventamento, que consiste em elementos adicionados na diagonal para melhorar a estabilidade e rigidez da estrutura, evitando que ocorram grandes deformações (CAFFARELLO, 2016).

Entre as malhas C e C2, manteve-se a geometria variando a densidade. A modificação da malha C2 sugere que o aumento no valor da massa favorece a resistência da estrutura.

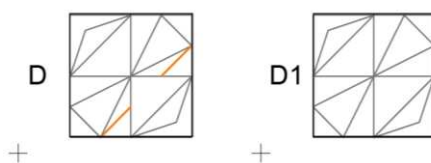
A malha C2 tem mais metros lineares de aço tubular em comparação à malha C, porém, percebemos que a massa não alterou proporcionalmente ao aumento de material, pois o programa calcula automaticamente a espessura do material visando melhorar o desempenho.

Dessa maneira percebemos que a geometria é o suficiente para manter a eficiência estrutural do *gridshell*, pois todas as alterações permitiram variações nas malhas, mas mantiveram os valores próximos a 100% de *Utilization*, cabendo ao projetista decidir a melhor solução de acordo com a finalidade do projeto.

- Modificações relacionadas à malha D.

A malha D apresenta uma diversificação entre os segmentos, dessa forma, propusemos modificações na regra para dar continuidade aos segmentos. Segundo os valores apresentados na Tabela 4, a malha D colapsaria sob as cargas aplicadas. Dessa maneira, buscou-se a simplificação das regras com a proposta da malha D1. Essa regra quando aplicada em simetria, retirou os elementos sem continuidade, realçado em laranja na figura 14.

Figura 14 – Simplificação da regra D e regra D1.



Fonte: os autores.

Conforme demonstrado na tabela 4, os segmentos retirados tinham pouca função estrutural, uma vez que o valor da massa diminuiu, possibilitando que os valores de *Utilization* de compressão melhorassem em 30%, se comparado com a malha D. A estrutura D1 ainda colapsa, mas a massa reduziu e se aproximou de valores melhores em relação a eficiência do material, pois foram retirados elementos que não eram a favor do contraventamento.

Tabela 4 – Simulação estrutural das malhas D e D1.

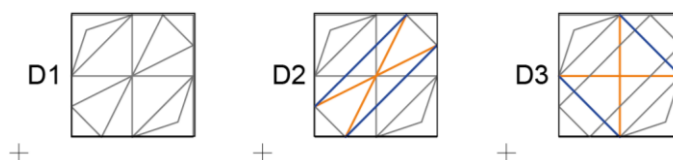
Legenda: S.R – Sequencia de regras; T.S – Tamanho dos segmentos; U.C- Utilização de Compressão; U.T- Utilização de Tração; M- massa.

S. R	Malha	U. C (%)	U. T (%)	M (Kg)	Estrutura
D		-187.8	166.3	61907.4	
D1		-158.6	160.9	44947.9	

Fonte: os autores.

Em segunda análise, percebemos que a malha D tem seus principais segmentos na horizontal e na vertical, portanto, foram propostas as modificações D2 e D3 para explorar as diagonais, a partir da modificação da regra da malha D, conforme exemplificado na figura 15. Os segmentos em laranja foram retirados, enquanto os elementos em azul foram adicionados.

Figura 15 – Simplificação da regra D e regras D2 e D3.



Fonte: os autores.

Conforme a tabela 5, a modificação para segmentos retos paralelos na diagonal representado na malha D2, apesar de melhorar os valores de *Utilization*, ainda não pode ser considerada eficiente, pois não suporta sua carga própria. Além disso, a malha continuou com seus principais segmentos na vertical e horizontal. Assim, a malha D3 foi proposta para que todos os segmentos estivessem posicionados na diagonal, conforme demonstrado em D3 na figura 11.

Tabela 5 – Simulação estrutural das malhas D2 e D3.

Legenda: S.R – Sequencia de regras; T.S – Tamanho dos segmentos; U.C- Utilização de Compressão; U.T- Utilização de Tração; M- massa.

S. R	Malha	U. C (%)	U. T (%)	M (Kg)	Estrutura
D2 <sup>+</sup> + +		-140.8	121.6	37819.8	
D3 <sup>+</sup> + +		-125.7	133.1	35149.7	

Fonte: os autores.

O reajuste da malha D3 apresentou os melhores resultados de *Utilization*, apesar de não ser suficiente para ser considerada uma estrutura segura. Assim,

mesmo após aplicação das modificações nas malhas D, concluímos que não foi suficiente para adequação, pois a massa se manteve com valores altos, fazendo que entrasse em colapso sob a carga do peso próprio.

- Modificações relacionadas à malha E.

A malha E, assim como a malha D, tem seus principais segmentos direcionados na horizontal e na vertical. Assim, a modificação na malha E1 transformou os segmentos perpendiculares em retas paralelas na diagonal, demonstrado na figura 16, no qual os segmentos em laranja foram retirados e os segmentos azul foram adicionados.

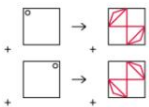
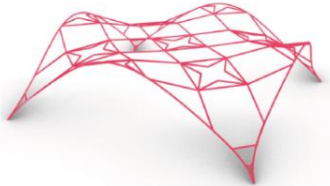
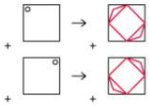
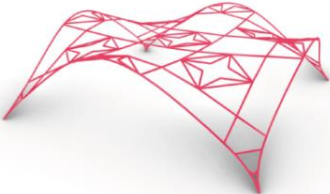
Figura 16 – Simplificação da regra E e regra resultante E1.



Fonte: os autores.

Tabela 6 – Simulação estrutural das malhas E e E1.

Legenda: S.R – Sequencia de regras; T.S – Tamanho dos segmentos; U.C- Utilização de Compressão; U.T- Utilização de Tração; M- massa.

S. R	Malha	U. C (%)	U. T (%)	M (Kg)	Estrutura
E		-132.8	131.5	32289.7	
E1		-93.9	85.7	23374.1	

Fonte: os autores.

A modificação da regra produziu uma estrutura adequada do ponto de vista da eficiência do material em relação às cargas aplicadas, uma vez que a

modificação que resultou na malha E1 aumentou o número de diagonais da malha e reduziu a massa, produzindo uma estrutura mais rígida, conforme a tabela 6. Como discutido anteriormente, os valores de *Utilization* tendem a melhorar quando os segmentos são posicionados a favor do contraventamento.

Dessa forma observaram-se alguns parâmetros a serem repetidos: evitar regras que produzem segmentos sem continuidade e com pouca função estrutural e favorecer os segmentos nas diagonais, uma vez que eles estão a favor do contraventamento.

#### 4.6.2 Resultado da Segunda Etapa – formulação de gramática da forma para malhas *lattices*

Na segunda etapa buscamos desenvolver regras utilizando os parâmetros observados na fase de pré-processamento, objetivando criar a variação necessária para garantir a eficiência estrutural do *gridshell*.

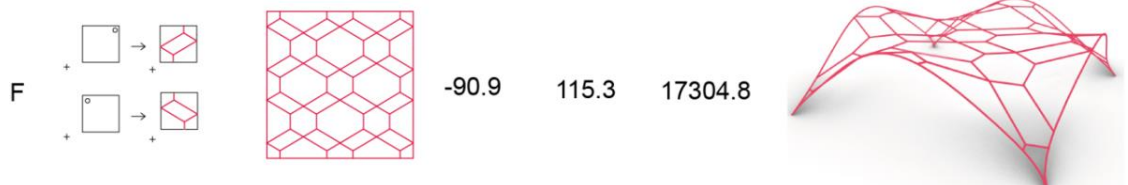
Segundo Pottmann et al. (2015), malhas compostas por hexágonos geram um fluxo de forças uniforme, diminuindo a deformação da estrutura. Dessa forma, buscamos uma composição de hexágonos, pois essa geometria possui lados angulares que poderiam ser posicionados em favor da diagonal.

Porém o autor supracitado considera a malha com hexágonos contínuos. Para a pesquisa desenvolvida nesse capítulo, não é possível obter malhas contínuas de hexágonos, uma vez que as regras são aplicadas em um *grid* rotulado pré-determinado.

Dessa forma, foi proposta a regra da malha F, que quando aplicada no *grid* rotulado, que é configurado com simetria reflexiva, gera uma malha com composições de hexágonos.

Tabela 7 – Simulação estrutural das malhas F.

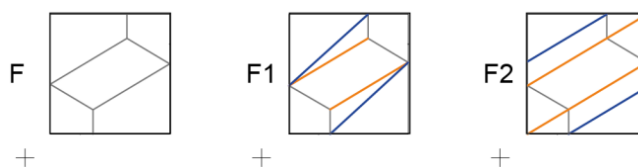
Legenda: S.R – Sequencia de regras; T.S – Tamanho dos segmentos; U.C- Utilização de Compressão; U.T- Utilização de Tração; M- massa.

S. R	Malha	U. C (%)	U. T (%)	M (Kg)	Estrutura
F		-90.9	115.3	17304.8	

Fonte: os autores.

Apesar dos valores de *Utilization* de compressão próximo ao adequado, o valor de tração ultrapassa o desejado. Entendemos esse resultado como uma oportunidade de adequação da malha, uma vez que percebemos que os segmentos não tinham continuidade nas diagonais. Dessa forma, foram propostas duas alternativas para modificações nas regras priorizando as diagonais.

Figura 17 – Simplificação da regra F e regras F1 e F2.




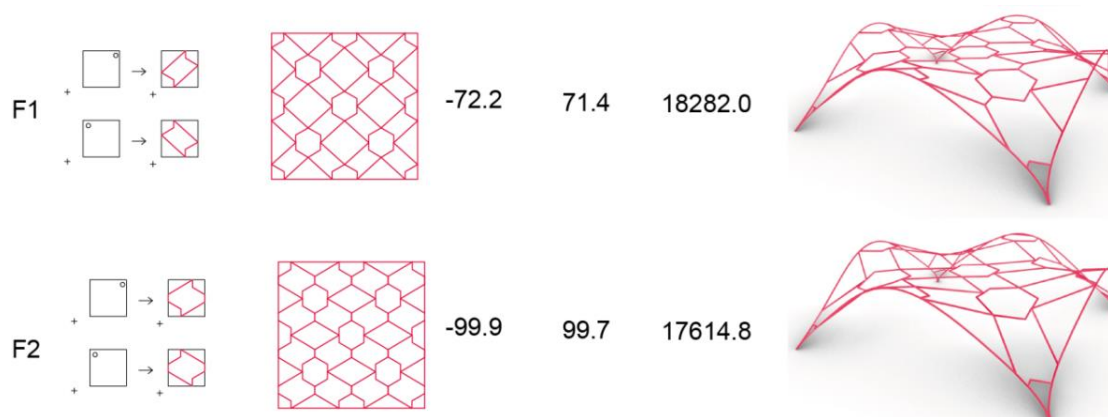
Fonte: os autores.

Na figura 17, a modificação da malha F1, gerou continuidade entre os suportes, mas a regra foi constituída por segmentos que se desviam da diagonal que interliga os suportes. Em contrapartida, a malha F2 foi gerada por segmentos que são paralelos a diagonal dos suportes. Essa simulação teve como objetivo explorar a localização das diagonais como forma de melhoramento das malhas (Tabela 8).

Tabela 8 – Simulação estrutural das malhas F, F1 e F2.

Legenda: S.R – Sequencia de regras; T.S – Tamanho dos segmentos; U.C- Utilização de Compressão; U.T- Utilização de Tração; M- massa.

S. R	Malha	U. C (%)	U. T (%)	M (Kg)	Estrutura
F		-90.9	115.3	17304.8	



Fonte: os autores.

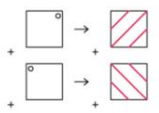

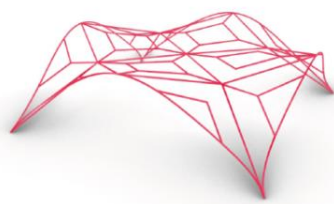
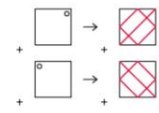
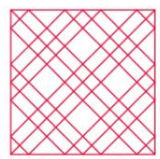
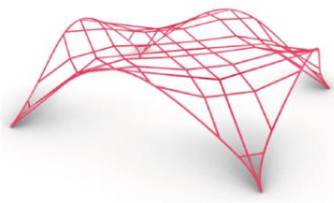
A malha F1 gerou a continuidade dos segmentos entre os pontos de suporte, apesar disso, apresentou resultados piores comparados à malha F2. Apesar da malha F2 não ter gerado a continuidade dos segmentos, além de ter criado pequenos segmentos na vertical, a diagonal perfeita gerou uma estrutura mais rígida, resultando em uma estrutura leve e adequada aos valores de *Utilization* desejados.

Nessa simulação percebemos mais do que a continuidade dos segmentos, as regras devem priorizar a diagonal alinhada com a curvatura da estrutura, para que as tensões axiais sejam distribuídas uniformemente. Dessa forma, as malhas G e H foram propostas para explorar ainda mais a localização das diagonais, assim como a densidade das malhas.

- Localização das diagonais

As malhas G e H são produzidas por regras simples, compostas apenas por retas nas diagonais, porém percebemos que os resultados não alcançaram os valores de *Utilization* desejados, apesar de serem estruturas leves (Tabela 9). Dessa forma, propusemos as variantes G1 e H1, com o objetivo de explorar a localização da diagonal na malha.

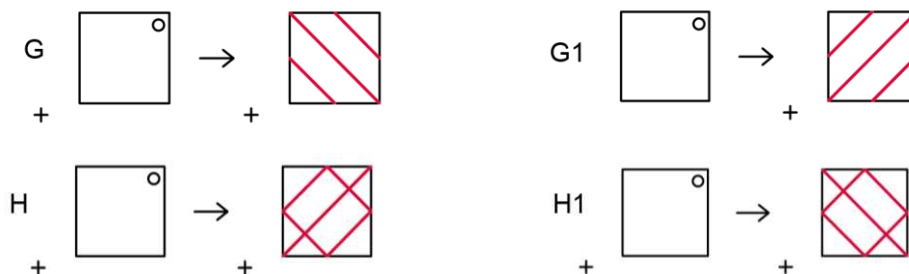
Tabela 9 – Simulação estrutural das malhas G e H.

	S. R	Malha	U. C (%)	U. T (%)	M (Kg)	Estrutura
G			-82.4	82.9	20916	
H			-83.8	75.6	23793.1	

Legenda: S.R – Sequencia de regras; T.S – Tamanho dos segmentos; U.C- Utilização de Compressão; U.T- Utilização de Tração; M- massa.

As malhas G1 e H1 são obtidas pelas mesmas regras das malhas G e H, porém com a regra invertida, conforme exemplificado na figura 18. Dessa forma a malha começa de maneira oposta.

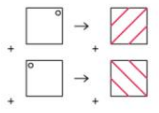
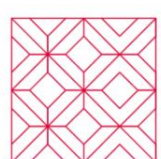

Figura 18 – Simplificação da regra G1 e H1.

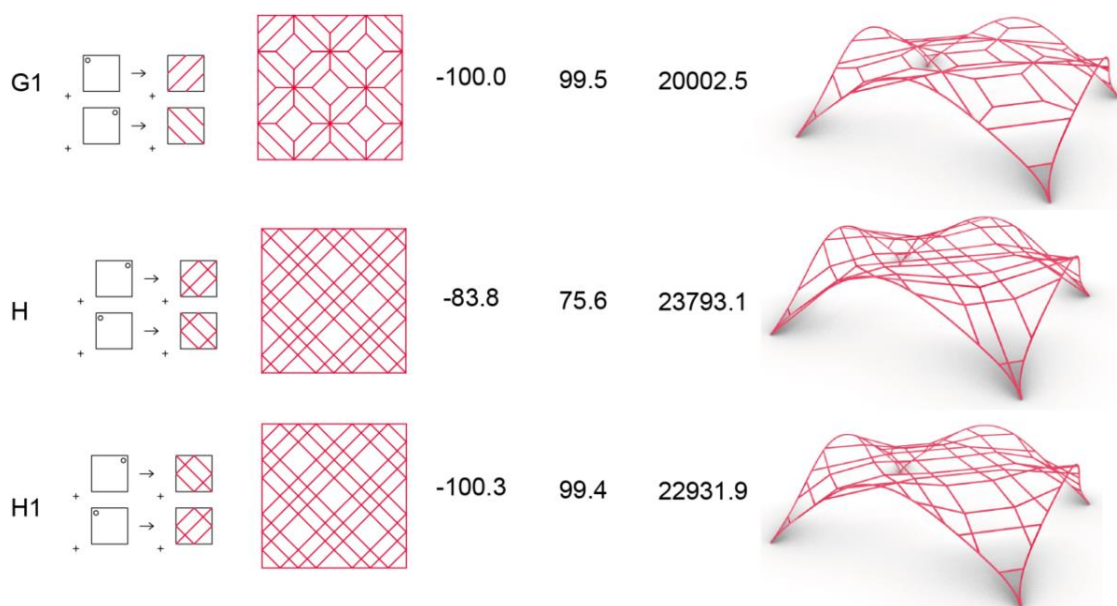


Fonte: os autores.

Tabela 10 – Simulação estrutural das malhas G e G1.

Legenda: S.R – Sequencia de regras; T.S – Tamanho dos segmentos; U.C- Utilização de Compressão; U.T- Utilização de Tração; M- massa.

	S. R	Malha	U. C (%)	U. T (%)	M (Kg)	Estrutura
G			-82.4	82.9	20916	



Fonte: os autores.

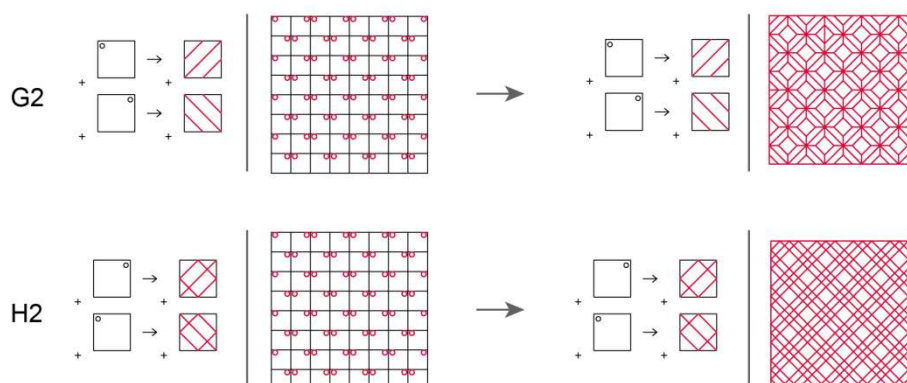
Apesar de serem compostas pela mesma regra, notamos que as malhas G1 e H1 apresentaram características importantes para a eficiência estrutural, uma vez que essa organização criou mais diagonais que atravessam a estrutura entre os suportes.

Enquanto a malha G apresenta três diagonais em cada direção, a malha G1 apresenta quatro. Já a malha H apresenta dez diagonais para cada direção, enquanto a malha H1 apresenta doze. Essa modificação fez com que a malha apresentasse resultados melhores, sendo possível perceber que a forma como escolhemos aplicar as regras podem gerar mais ou menos diagonais e isso tem efeito na eficiência estrutural das malhas. Dessa forma, na próxima etapa procuramos explorar a densidade dessas malhas.

- Densidade das malhas

Na etapa de pré – processamento foi possível perceber na malha C que é possível propor o aumento da densidade da malha e manter os valores de *Utilization* aproximados ao da malha original. Portanto, as malhas G1 e H1 foram aplicadas no *grid* rotulado com 64 módulos, resultando nas malhas G2 e H2, com o objetivo de explorar a densidade de malhas em que já existem diagonais suficientes para garantir a melhor eficiência estrutural (Tabela 11).

Tabela 11 – Simulação estrutural da malha G2.  
 Legenda: S.R – Sequencia de regras; T.S – Tamanho dos segmentos; U.C- Utilização de Compressão; U.T- Utilização de Tração; M- massa.



S. R	Malha	U. C (%)	U. T (%)	M (Kg)	Estrutura
G1		-100.0	99.5	20002.5	
G2		-97.0	89.0	37097.6	
H1		-100.3	99.4	22931.9	
H2		-86.4	91.2	41200	

Fonte: os autores.

Ambas as variações de malhas G2 e H2, apesar de terem aumentado significativamente o número de segmentos, o acréscimo de diagonais foi suficiente para manter a rigidez da estrutura e manter a eficiência e estabilidade estrutural. Apesar disso, os valores de massa aumentam para quase o dobro do valor original, dessa forma, apesar do valor de *Utilization* adequados, essas estruturas são muito

pesadas, dificultando a fabricação e montagem e aumentando o gasto de material.

#### 4.7 Conclusão

As principais soluções para composição de malhas derivam de regras simples, que se ajustam a curvatura da superfície, alinhada as diagonais dos suportes, que respeitavam os limites da estrutura e evitavam que as regras que produzissem geometrias desmembradas ou que adicionassem massa, porém com pouca função estrutural.

Portanto concluímos que não existe uma regra que possa ser aplicada de maneira universal, sem nenhum tipo de adaptação, mas sim regras que aplicam os parâmetros supracitados. Exemplificado pelas regras C, F2, G1 e H2, pois podem ser consideradas as mais eficientes dentre as malhas apresentadas, mantendo a variabilidade. Dessa forma as regras mais eficientes são as que criam geometrias alinhadas à curvatura principal da estrutura e que permitiam a continuidade dos segmentos.

Além disso, quanto maior o número de segmentos, inevitavelmente o valor da massa será maior, portanto, as modificações devem garantir que os parâmetros sejam alcançados para produção de estruturas adequadas. Assim, notou-se que nem todas as mudanças foram favoráveis ao desempenho estrutural, mesmo com o incremento de material.

Destaca-se a importância de uma investigação mais aprofundada em relação ao comportamento estrutural do *gridshell*. Essas estruturas possuem uma carência de métodos de projetos que permitem sua otimização, embora aparentem um potencial para diversas aplicações na Arquitetura. Apesar desse estudo basear-se na avaliação dos parâmetros de *Utilization* de tração, compressão e massa, há outros parâmetros inerentes às estruturas de *gridshell* que podem ser incluídos em estudos futuros, tais como os nós rotulados, diversidade de materiais, comprimento e variabilidade das barras, dentre outros.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos ao Nú.Lab (DAU/UFV), grupo de pesquisa ao qual essa dissertação está vinculada. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de Mestrado vinculada a este projeto. Ao Programa de Pós Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

## REFERENCIAS

ADRIAENSSENS, S. BLOCK, P. VEENENDAAL, D. WILLIAMS, C. **Shell structures for architecture. Form finding and optimization.** 1 ed.Oxon: Routledge, 2014. 338 p.

ISBN 9780415840606

BEIRÃO, J. **Gramáticas urbanas: por uma metodologia de desenho urbano flexível.** Tese (Mestrado em Arquitetura) - Instituto superior de ciências do trabalho e da empresa, Universidade de Lisboa. Lisboa, p.243. 2004.

CAFFARELLO, F. **Análise estrutural de cobertura em gidshells de madeira.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2016.

CARVALHO, D. **Gidshells em madeira: morfologia, aplicabilidade, comportamento estrutural e projeto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e tecnologia, Universidade de Coimbra. Coimbra, 2015.

CELANI, G. Algorithmic Sustainable Design. Uma visão crítica do projeto generativo. **Vitruvius**, Resenhas Online, São Paulo, n. 116.03, ago. 2011. Arqtextos. Disponível em: <https://vitruvius.com.br/index.php/revistas/read/resenhasonline/10.116/3995>. Acesso em 08 mai. 2021.

DOI: -

CELANI, G. CYPRIANO, D. GODOI, G. VAZ, C.E. A gramática da forma como metodologia de análise e síntese em arquitetura. **Conexão – comunicação e Cultura**. v.5, n.10, p.180-197. jul. 2006.

DOI: -

CHAU, HH. MCKAY, A. EARL, CF. BEHERA, AK. DE PENNINGTON, A. Exploiting lattice structures in shape grammar implementations. **Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing** v.32, p. 147–161. 9 mai. 2018.

DOI: 10.1017 / S0890060417000282

CORREIA, R; DUARTE, J; LEITÃO, A. GRAMÁTICA: A general 3D shape grammar interpreter targeting the mass customization of housing, 2012. Proceedings of ECAADE 30, 2012, Praga. **Anais eletrônicos...** Polônia: 2012. Disponível em: [http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/Show?ecaade2012\\_273](http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/Show?ecaade2012_273) . Acesso em: 10 dez. 2020.

DOI: -

DŹWIERZYŃSKA, J. Shaping curved steel rod structures. **Czasopismo Techniczne**, v. 8, p. 87-98. Ago. 2018.

DOI: 10.4467/2353737XCT.18.117.8892

ECONOMOU, A.; HONG, K. Ice-ray Tilings. **Shape Computational Lab**. Disponível em: [https://shape.design.gatech.edu/Research/Projects/2018\\_Tilings/index.html](https://shape.design.gatech.edu/Research/Projects/2018_Tilings/index.html) . Acesso em: 26 jan. 2021.

DOI: -

GRASL, T. ECONOMOU, A. From shapes to topologies and back: an introduction to a general parametric shape grammar interpreter. **Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing**. v. 32, p. 208-224, 9 mai. 2018.

DOI: 10.1017/S0890060417000506

GRASL, T. ECONOMOU, A. Paperless Grammars. In: Proceedings of the Cultural DNA: Computational Studies on the Cultural Variation and Heredity, 2017, Coreia do Sul. **Anais eletrônicos ...Coreia do Sul :2017**. Disponível em: Acesso em: 10 dez. 2020. DOI: 10.1007/978-981-10-8189\_12.

PELLIS, D.; POTTMANN, H. Aligning principal stress and curvature directions . In: LARS HESSELGREN, L.; KILIAN, A.; MALEK, S.; OLSSON K-G.; SORKINE-HORNUNG, O.; WILLIAMS, C. **Proceedings of Advances in Architectural Geometry 2018**. 2018. Stuttgart: Universität Stuttgart. 2018, 34-53. ISBN 978-3-903015-13-5

PELLIS, D.; POTTMANN, H. Geometry and Statics of Optimal Freeform Gridshells. In: Proceedings of Baustatik, 2020, Universität Stuttgart, Stuttgart. **Anais eletrônicos ... Stuttgart: 2020**. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/340953781\\_Geometry\\_and\\_Statics\\_of\\_Optimal\\_Freeform\\_Gridshells](https://www.researchgate.net/publication/340953781_Geometry_and_Statics_of_Optimal_Freeform_Gridshells). Acesso em: 10 dez. 2020.

PENG, C.H.; JIANG, C.; POTTMANN, H.; WONKA, P. Designing patterns using triangle-quad hybrid meshes. **ACM Transactions on Graphics**, v.37, n.4, p. 1-14, Ago.2019. DOI: 10.1145 / 3197517.3201306

POTTMANN, H. EIGENSATZ, M. VAXMAN, A. WALLNER, J. Architectural geometry. **Computers and Graphics**, v. 47, p. 145-164. Abr. 2015. DOI: 10.1016 / j.cag.2014.11.002

PREISINGER, C. Linking Structure and Parametric Geometry. **Architectural Design**, v. 83, n. 2, p.110–113, mar. 2013. DOI: 10.1002/ad.1564

KAZEMI, H.; VAZIRI, A.; NORATO, J. A. Multi-material topology optimization of lattice structures using geometry projection. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 363, p. 112895, 1 maio 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.112895>

RICHARDSON, J. ADRIAENSSENS, S. COELHO, R. BOUILLARD, P. Coupled form-finding and grid optimization approach for single layer grid shells. **Engineering Structures**, v. 52, p. 230–239, 1 jul. 2013. DOI: 10.1016 / j.engstruct.2013.02.017

SIMONETTI, H. L.; DE ASSIS DAS NEVES, F.; ALMEIDA, V. S. Multiobjective topology optimization with stress and strain energy criteria using the SESO method and a Multicriteria Tournament Decision. **Structures**, v. 30, p. 188–197, 1 abr. 2021. DOI: 10.1016 / j.istruc.2021.01.002

STINY, G. Ice-Ray: A Note on the Generation of Chinese Lattice Designs. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v.4, n.1, p. 89–98, 1977.

STINY, G. Introduction to shape and shape grammars. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v.7,p. 343–351, 1980.

## 5. CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação apresentou uma investigação de uma metodologia de projeto de um *gridshell*, produzido por processos generativos com o auxílio de ferramentas de modelagem paramétrica. Como elemento original, o tema proposto combinou a obtenção de padrões de malhas por um processo de projeto generativo objetivando produzir uma estrutura otimizada estruturalmente. Apesar dos vários estudos de *gridshell* em software paramétrico faltam pesquisas que combinam a produção de malhas por gramáticas da forma com a simulação estrutural.

O capítulo 2 teve como objetivo investigar as características teóricas e construtivas do *gridshell*. A metodologia partiu do levantamento bibliográfico de tópicos como classificação do *gridshell*, métodos construtivos, tipos de nós, tipos de segmentos e composições de malhas. Conhecer os métodos de construção influencia nos processos de projeto e este capítulo teve como objetivo expor conceitos importantes para as próximas etapas.

Dessa forma, elaboramos algoritmos visuais que podem ser utilizados com diversas composições de padrões e concluímos que estruturas modeladas em método descendentes geraram estruturas com melhor desempenho estrutural, uma vez que as malhas são aplicadas em uma casca que passou por processo de otimização.

No capítulo 3 foram elaborados algoritmos visuais para os Métodos de Modelagem Ascendente e Descendente demonstrando os efeitos da abordagem de modelagem paramétrica nos resultados de melhor desempenho estrutural de uma *gridshell* em estágio inicial de projeto.

A metodologia da pesquisa aborda a utilização da suíte de modelagem *Rhino6+Grasshopper* com exploração de algumas ferramentas de análise e simulação como o *Karamba3D*, para apresentação dos resultados graficamente, facilitando a visualização e interpretação dos dados de análise de desempenho estrutural.

A utilização do *Karamba3D* para essas simulações foi satisfatória, mas ressaltamos a importância de conhecer os métodos de simulação que utilizam além de entender quais são os índices de segurança já considerados no *plugin*.

Os resultados obtidos demonstram que apesar de estruturas com Modelagem Ascendente serem comuns na literatura, o Método Descendente gerou

melhores resultados em desempenho estrutural, uma vez que foi utilizado uma casca otimizada. Além disso, a partir dos testes compositivos das malhas, percebemos alguns parâmetros que impactam diretamente o desempenho estrutural, como a adição de segmentos na diagonal da malha. Esse experimento atuou como estudo preliminar para a etapa desenvolvida no capítulo 4.

No capítulo 4, a pesquisa explorou a eficiência estrutural do *gridshell* de acordo com a composição de malhas, considerando a gramática da forma como método generativo para variabilidade dos padrões, partindo do pressuposto de que a gramática da forma poderia ampliar a variabilidade compositiva das malhas e resultar no melhoramento da eficiência estrutural do *gridshell*.

Inicialmente a gramática da forma foi aplicada em *lattices* publicadas na literatura, uma vez que fornece uma estrutura inicial para discutir ideias-chaves para o desenvolvimento de *gridshell*. Os resultados das simulações foram consistentes em relação de causa e efeito entre as variações das regras e a eficiência estrutural.

Os resultados obtidos confirmaram o pressuposto, uma vez que demonstram variabilidade com as melhores composições de malhas de *gridshell*, desde que fossem produzidas por composição de malhas que se derivaram de regras simples, com continuidade dos segmentos e que exploravam as diagonais.

## 5.1 Contribuição da pesquisa

Neste trabalho foram apresentadas metodologias que aprofundaram a investigação da gramática da forma como técnica que possibilita a variabilidade das malhas e efeito no desempenho estrutural de *gridshell*.

A pesquisa ampliou a investigação de gramáticas da forma para malhas de *gridshell*, considerando as redes quadriculadas como composição formal, que permite a observação direta de uma regra simples aplicada em diferentes transformações.

Exploramos ainda parâmetros que proporcionam a melhora no desempenho da malha, contribuindo para a investigação e reaplicação do processo de projeto.

## 5.2 Limitações do trabalho

Uma vez que o foco da pesquisa se inclinou para a análise de desempenho estrutural, as principais limitações do trabalho foram relacionadas à viabilidade física e de execução dessas estruturas. Portanto, existe a necessidade de examinar os aspectos relacionados ao material, custo e processo de fabricação.

Além disso, a análise estrutural aplicada considerou apenas valores de *Utilization* e massa, sendo preciso ponderar a situação globalmente, considerando os valores de deslocamento, para a construção de um *gridshell* utilizando essa metodologia.

## 5.3 Sugestões para trabalhos futuros

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, são sugeridas algumas recomendações de continuação para essa pesquisa:

- Explorar composições de malhas para *gridshell* com diferentes configurações dos limites das estruturas.
- Explorar estratégias de produção digital e materiais para pequenos protótipos e modelos de menor escala visando validar este estudo e obter maior precisão nos valores relacionados ao desempenho estrutural.
- Discutir questões relacionadas à materialização, execução e construção, reconhecendo os problemas de *design*.
- Desenvolver e avaliar novos parâmetros com base na produção arquitetônica, visando solucionar problemas eventuais na construção do modelo.