



**PGDESIGN** | Programa de Pós-Graduação  
Mestrado | Doutorado



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**FACULDADE DE ARQUITETURA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN**

Guilherme Bonotto Furman

**ANÁLISE DE EFEITO DE INSERÇÃO DE ESTRICÇÃO EM PRODUTO  
PARAMETRIZADO COMO BARRAS PELO GRASSHOPPER**

Dissertação de Mestrado

Porto Alegre

2024

**GUILHERME BONOTTO FURMAN**

**Análise de efeito de inserção de estrição em produto parametrizado como barras  
pelo grasshopper**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Design.

Orientadora: Profa. Dra. Branca Freitas De Oliveira

Coorientador: Prof. Dr. Renato Vaz Linn

Porto Alegre

2024

### CIP - Catalogação na Publicação

Furman, Guilherme Bonotto  
Análise De Efeito De Inserção De Estricção Em  
Produto Parametrizado Como Barras Pelo Grasshopper /  
Guilherme Bonotto Furman. -- 2024.  
89 f.  
Orientadora: Profa. Dr. Branca Freitas De Oliveira.

Coorientadora: Prof. Dr. Renato Vaz Linn.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de  
Pós-Graduação em Design, Porto Alegre, BR-RS, 2024.

1. Design de produto. 2. Separador de azulejo  
cruzeta. 3. Rhinoceros 3d. 4. Grasshopper. 5.  
Karamba3D. I. Oliveira, Profa. Dr. Branca Freitas De,  
orient. II. Linn, Prof. Dr. Renato Vaz, coorient.  
III. Título.

**Guilherme Bonotto Furman**

**ANÁLISE DE EFEITO DE INSERÇÃO DE ESTRICÇÃO EM PRODUTO PARAMETRIZADO  
COMO BARRAS PELO GRASSHOPPER**

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Design, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS.

Porto Alegre, vinte e oito de Março de 2024.

---

**Fabio Pinto da Silva**

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS

**Banca Examinadora:**

---

Orientadora: **Prof. Dra. Branca Freitas De Oliveira**

Programa de Pós-Graduação em Design – PGDesign/UFRGS

---

Coorientador: **Prof. Dr. Renato Vaz Linn**

Programa de Pós-Graduação em Design – PGDesign/UFRGS

---

**Prof. Dra. Erika Fernandes Cota**

Programa de Pós Graduação Em Computação – PPGC/UFRGS – Examinadora Externa

---

**Prof. Dr. Fábio Gonçalves Teixeira**

Programa de Pós-Graduação em Design – PGDesign/UFRGS – Examinador Interno

---

**Prof. Dr. Júlio Carlos de Souza van der Linden**

Programa de Pós-Graduação em Design – PGDesign/UFRGS – Examinador Interno



## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar minha gratidão a todas as pessoas que contribuíram de alguma forma para a realização deste estudo.

Primeiramente, agradeço aos meus orientadores Branca Freitas de Oliveira e Renato Vaz Linn, pela orientação, apoio constante e valiosos insights ao longo deste trabalho. Seu comprometimento e expertise foram fundamentais para o desenvolvimento deste projeto.

Agradeço também aos membros da banca examinadora por dedicarem seu tempo e expertise para avaliar este trabalho e fornecer valiosas sugestões e críticas construtivas.

À minha família e amigos, que estiveram sempre ao meu lado, oferecendo apoio emocional e incentivo durante os desafios enfrentados ao longo deste percurso acadêmico. Sua presença e encorajamento foram essenciais para minha motivação e perseverança.

À UFRGS, pela oportunidade de realizar este estudo e pelo suporte oferecido ao longo de minha jornada acadêmica.

Ao programa PGDesign, pelo incentivo à pesquisa e busca pelo desenvolvimento de novas tecnologias.

E agradeço à CAPES, por financiar esta pesquisa. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## RESUMO

FURMAN, G. B. **Análise de efeito de inserção de estrição em produto parametrizado como barras pelo grasshopper**. 2024. 89 f. Dissertação (Mestrado em Design) – Escola de Engenharia / Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

Este estudo buscou avaliar como a inserção de uma estrição circular afeta a estrutura de um produto da Construção Civil: o Separador de Azulejo em formato Cruzeta (SAC). O SAC foi submetido a condições determinadas de carregamento. O estudo ainda avaliou o software Rhinoceros 3d e seus plugins Grasshopper e Karamba3D como ferramentas de design na contribuição dessa análise do produto SAC. Um dos braços do produto sofreu a interferência de estrições em formato circular e, com a técnica de design de parametrização por meio dos plugins mencionados, foram possíveis simulações mecânicas para analisar a resposta estrutural do produto. Foi testado um deslocamento unitário de 1 mm na ponta do braço do produto, idealizado como uma viga engastada, como resposta fixa e posição e tamanho das estrições como variáveis para a análise de todas as simulações. Além disso, três direções de inserção das estrições foram testadas: na altura, largura e em ambas as direções do braço do SAC. Os resultados mostraram que existe divergência de comportamentos: a inserção das estrições na altura exigem estrições menores, comparado com a inserção na largura. As contribuições desse estudo iriam no sentido de explorar as considerações aqui levantadas para a busca da produção de produtos mais enxutos, no sentido da redução de materiais. No entanto, aspectos específicos da fabricação do produto não foram considerados.

**Palavras-chave:** Design de produtos. Separador de azulejo cruzeta. Rhinoceros 3d. Grasshopper. Karamba3D.

## ABSTRACT

FURMAN, G. B. **Analysis of the effect of insertion of a groove in a product parameterized as bars using grasshopper**. 2024. 89 p. Thesis (Master in Design) – Engineering School / Faculty of Architecture, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

This study aimed to assess how the insertion of a circular groove affects the structure of a Civil Construction product: the Tile Separator in Cross format (TSC). The TSC was subjected to specific loading conditions. The study also evaluated the Rhinoceros 3D software and its Grasshopper and Karamba3D plugins as design tools contributing to the analysis of the TSC product. One of the product's arms experienced interference from circular grooves, and with the parametrization design technique using the mentioned plugins, mechanical simulations were possible to analyze the structural response of the product. A unit displacement of 1 mm was tested at the tip of the product's arm, conceptualized as a fixed beam response, with position and size of the grooves as variables for the analysis of all simulations. Additionally, three directions of groove insertion were tested: in height, width, and in both directions of the TSC arm. The results showed that there are divergences in behavior: insertion of grooves in height requires smaller grooves compared to insertion in width. The contributions of this study would aim to explore the considerations raised here towards the pursuit of leaner product production, in terms of material reduction. However, specific aspects of product manufacturing were not considered.

**Keywords:** Products' Design. Cross Tile Spacer. Rhinoceros 3d. Grasshopper. Karamba3D.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - O produto, SAC, com suas diferentes especificações, embalagem e aplicação.....	15
Figura 2 - Exemplos da comercialização de variações de SACs contendo estrições, furos e entalhes.....	16
Figura 3 - Avaliação das capacidades mecânicas do SAC contendo furos, previamente da confecção desse trabalho.....	19
Figura 4 - Produto (SAC) aplicado no piso com 2 diferentes direções.....	23
Figura 5 - Desenho técnico do molde de fabricação do SAC.....	24
Figura 6 - A interface do Rhinoceros 3d e modelagem de geometrias simples.....	27
Figura 7 - Relógio (superior) e edificação (inferior) modelado em Rhino.....	28
Figura 8 - Utilização do plugin Grasshopper na fabricação em impressão 3d de palmilha.....	29
Figura 9 - Utilização do plugin Galapagos na fabricação em corte a laser de luminária.....	30
Figura 10 - 3 casos de modelos de estruturas.....	31
Figura 11 - Dois modelos de vigas deformando por flexão.....	32
Figura 12 - Momento ao giro de manivela.....	33
Figura 13 - Modelos de saltador de trampolim e cálculo da barra em equilíbrio e deformada.....	34
Figura 14 - 3 exemplos de condições de apoio.....	34
Figura 15 - Exemplos de vigas engastadas com geometria transversal e diagrama.....	35
Figura 16 - Cálculo e Diagramas de estrutura com cargas concentrada e distribuída.....	36
Figura 17 - Diagramas de estrutura ligeiramente mais complexa sendo processada em software.....	37
Figura 18 - Gráficos de comportamentos de materiais em regimes de elasticidade.....	38
Figura 19 - Comportamento de viga ao ser carregada e descarregada em regimes elástico e plástico.....	38
Figura 20 - Diagrama Tensão-Deformação de um material de exemplo.....	39
Figura 21 - 2 Posições possíveis em viga.....	39
Figura 22 - Cálculos de Momento de Inércia (I) para uma viga.....	40
Figura 23 - Perfil (seção) com distribuição de massa em relação ao eixo central.....	41

Figura 24: Perfil (seção) na horizontal de prancha do saltador acumulando mais energia.....	41
Figura 25 - Viga com diferentes posições de carga aplicada.....	42
Figura 26 - Cálculo de deslocamento de viga engastada com carga:.....	42
Figura 27 - Tipos de Tensões.....	43
Figura 28 - Barra em corte para o Cálculo de Tensão de Flexão.....	43
Figura 29 - Aplicações do Abaqus à joalheria.....	44
Figura 30 - Aplicações do Abaqus a uma máquina agrícola.....	44
Figura 31 – Diagrama da relação Rhinoceros 3D, Grasshopper e Karamba3D.....	45
Figura 32 - Exemplos do plugin Karamba3D.....	46
Figura 33 - Aplicação nacional: estudo de gridshells em estruturas reticuladas.....	47
Figura 34 - Modelo de simulação do produto.....	49
Figura 35 - Modelo da estrição circular ao longo do braço do SAC.....	50
Figura 36 - Caso da estrição na direção da altura.....	50
Figura 37 - Caso da estrição na direção da largura.....	51
Figura 38 - Caso da estrição na direção de ambas a altura e largura.....	51
Figura 39 - Valores dos parâmetros básicos do modelo na viga.....	53
Figura 40 - Inputs no Grasshopper: geometria da barra.....	54
Figura 41 - Entradas e componentes dos parâmetros de base para o plugin Karamba3D.....	55
Figura 42 - O componente de base Geometria em verde.....	57
Figura 43 - O interior do componente Geometria.....	58
Figura 44 - O interior do componente Geometria (primeira parte).....	59
Figura 45 - O interior do componente Geometria (segunda parte).....	59
Figura 46 - O interior do componente Geometria (última parte).....	60
Figura 47 - O componente de base Condições de Suporte.....	61
Figura 48 - O interior do componente Condições de Suporte.....	61
Figura 49 - O componente de base Carregamento.....	62
Figura 50 - O interior do componente Carregamento.....	62
Figura 51 - O componente de base Seção Transversal.....	63
Figura 52 - O interior do componente Seção Transversal.....	64
Figura 53 - O interior do componente Seção Transversal (primeira parte).....	65
Figura 54 - O interior do componente Seção Transversal (segunda parte).....	66
Figura 56 - O interior do componente Seção Transversal (última parte).....	68

Figura 57 - O componente de base Material da Barra.....	69
Figura 58 - O interior do componente Material da Barra.....	69
Figura 59 - Componentes das entrada até os de montagem do Karamba3D.....	70
Figura 60 - O componente de base do analisador.....	71
Figura 61 - O interior do componente analisador.....	71
Figura 62 - Vista completa do canvas de trabalho do Grasshopper.....	72
Figura 63 - Resultados contendo o parâmetro de análise yMax.....	72
Figura 64 - Frame de simulação em 'r'=0,35 e 'xc'=1,475 com estricção na direção da altura.....	75
Figura 65 - Frame de simulação em 'r'=0,40 e 'xc'=4,077 com estricção na direção da altura.....	75
Figura 66 - Frame de simulação em 'r'=0,65 e 'xc'=7,238 com estricção na direção da altura.....	76
Figura 67 - Frame de simulação em 'r'=0,90 e 'xc'=9,034 com estricção na direção da altura.....	76
Figura 68 - Frame de simulação em 'r'=0,80 e 'xc'=1,412 com estricção na direção da largura.....	77
Figura 69 - Frame de simulação em 'r'=0,90 e 'xc'=3,075 com estricção na direção da largura.....	78
Figura 70 - Frame de simulação em 'r'=1.20 e 'xc'=5,506 com estricção na direção da largura.....	78
Figura 71 - Frame de simulação em 'r'=1.40 e 'xc'=6.538 com estricção na direção da largura.....	79
Figura 72 - Frame de simulação em 'r'=0.30 e 'xc'=0.753 com estricção em ambas as direções.....	80
Figura 73 - Frame de simulação em 'r'=0.40 e 'xc'=4.74 com estricção em ambas as direções.....	80
Figura 74 - Frame de simulação em 'r'=0.65 e 'xc'=7.78 com estricção em ambas as direções.....	81
Figura 75 - Curvas dos dados da Tabela 1.....	83

## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>barE</b>	Módulo de elasticidade do material da barra implementado
<b>barLength</b>	Comprimento da barra implementada
<b>BarWidth</b>	Largura da barra implementada
<b>BREP</b>	Boundary Representation
<b>CSG</b>	Constructive Solid Geometry
<b>d</b>	Distância perpendicular de atuação da força F
<b>discretiz</b>	Quantidade discretizada de seções ao longo da barra implementado
<b>E</b>	Módulo de Elasticidade
<b>F</b>	Força atuando em corpo
<b>I</b>	Momento de Inércia
<b>M</b>	Momento de uma força F
<b>MEF</b>	Método dos Elementos Finitos
<b>NURBS</b>	Non-Uniform Rational B-Spline
<b>R</b>	Raio de circunferência da estrição na viga
<b>Rhino</b>	Software Rhinoceros 3D
<b>SAC</b>	Separador de Azulejo em formato Cruzeta
<b>Xc</b>	Posição horizontal do centro da estrição na viga
<b>Yc</b>	Posição em y da estrição com relação a altura do braço implementado
<b>UFRGS</b>	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
<b>yMax</b>	Deslocamento da ponta da viga implementada.
<b>δp</b>	Deformação permanente no corpo
<b>σ</b>	Tensão Sigma

## SUMÁRIO

RESUMO.....	6
ABSTRACT.....	7
LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE ABREVIATURAS.....	11
1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Contextualização.....	14
1.2 Problema de pesquisa.....	16
1.3 Hipótese.....	17
1.4 Objetivos.....	17
1.4.1 Objetivo Principal.....	17
1.4.2 Objetivos Secundários.....	17
1.5 Justificativa.....	18
1.6 Delimitações da pesquisa.....	20
1.7 Estrutura da Dissertação.....	21
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	22
2.1 O Separador de Azulejo em formato Cruzeta (SAC).....	22
2.2 Modelagem Geométrica.....	25
2.2.1 Teoria: Conceitos, variáveis e modelos.....	25
2.2.2 Aplicação: O software Rhinoceros 3d (Rhino) e o plugin Grasshopper....	26
2.3 Estruturas.....	30
2.3.1 Teoria: Conceitos, variáveis e modelos.....	30
2.3.2 Aplicação: O software Abaqus.....	43
2.3.3 Aplicação: O plugin Karamba3D do Rhinoceros.....	44
3. METODOLOGIA.....	48
3.1 Modelagem do produto.....	48
3.1.1 Região de interesse do modelo estrutural.....	48
3.1.2 Parâmetros da estrição: Xc e R.....	49
3.1.3 Casos de direções das estrições.....	50
3.1.4 Os valores dos parâmetros de entradas.....	51
3.2 Implementação da simulação com o Rhinoceros 3d.....	53
3.2.1 Elementos.....	57
3.2.2 Condições de suporte.....	60



3.2.3 Carregamento.....	61
3.2.4 Seção Transversal.....	62
3.2.5 Material.....	68
3.2.6 Montagem e Solução.....	70
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	74
4.1 Estricção na direção da altura.....	74
4.2 Estricção na direção da largura.....	77
4.3 Estricção em ambas as direções.....	79
4.4 Avaliação dos resultados.....	81
5. CONCLUSÕES.....	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87

## **1. INTRODUÇÃO**

Os itens a seguir contextualizarão o presente tema, apresentarão problema e hipótese, apontarão os objetivos, justificativa e as delimitações do presente estudo. Por último, a estrutura de toda a dissertação será explicada com o intuito de facilitar a localização, em todo o trabalho, dos assuntos aqui abordados.

### **1.1 Contextualização**

A indústria atual enfrenta um cenário de constantes mudanças e demandas, impulsionadas pela rápida evolução tecnológica e pelas crescentes expectativas dos consumidores. Observa-se uma busca por inovação e eficiência, tanto em processos de produção quanto em produtos finais. As empresas enfrentam desafios como a globalização da concorrência, pressões por redução de custos e prazos de entrega mais curtos.

Um conceito relativamente novo na indústria é o de design enxuto. Um design enxuto é um design que se fundamenta em uma lógica de redução de materiais, tempo e esforço com o objetivo de gerar o maior valor agregado aos produtos e serviços (ABDELHAMID, EL-GAFY & SALEM, 2008).

Nesse sentido, a busca por produtos mais eficientes ou eficazes e a adoção de ferramentas modernas e computacionais de design, como o software Rhinoceros 3D (Rhino), Grasshopper e Karamba 3D, tornam-se fundamentais para se aprimorar a competitividade e a capacidade de inovação das empresas. Nesse sentido, tais práticas, como se verá mais adiante neste trabalho, auxiliam no desenvolvimento de produtos mais eficientes, ergonômicos e até mesmo personalizados. Será explicado com mais detalhes mais a frente o funcionamento e relação de cada uma dessas três ferramentas. Essencialmente, o Rhino é um software de modelagem 3d; o Grasshopper é um plugin (extensão) de parametrização; e o Karamba3D é outra extensão capaz de realizar simulações mecânicas em estruturas.

Analisando o produto utilizado deste trabalho é possível melhor compreender como o mesmo se apresenta na indústria atualmente. O Separador de Azulejo em formato Cruzeta (SAC) é amplamente utilizado no setor da Construção Civil,

desempenhando um papel crucial na fase de acabamento das obras. Em projetos de construção de edifícios, por exemplo, o SAC é reutilizado várias vezes e está presente em múltiplos pavimentos. A Figura 1 ilustra o produto com suas diferentes especificações, o método de embalagem para distribuição e sua aplicação nos revestimentos de áreas molhadas (banheiros, cozinhas, etc).

**Figura 1** - O produto, SAC, com suas diferentes especificações, embalagem e aplicação.

#### Espaçadores Juntapiso



Fonte: Esquerda, Cortag (2020); direita, Walmart (2023)

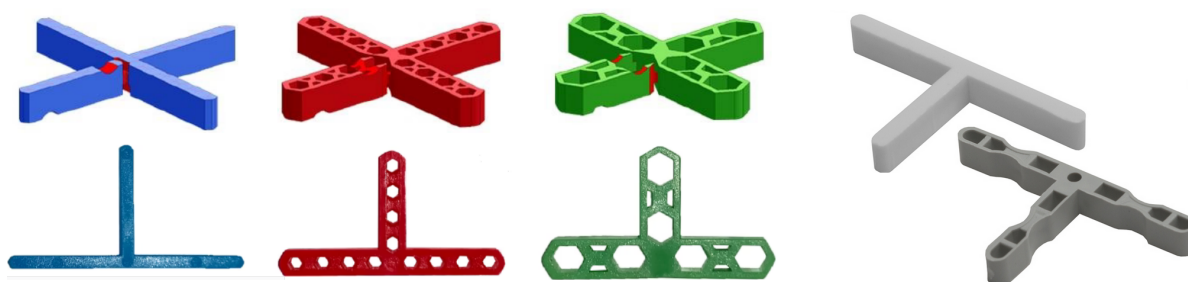
Do ponto de vista tecnológico, o produto vem ganhando novas conformações geométricas e funcionalidades. Alguns exemplos dessas variações já comercializadas podem ser vistos na Figura 2. É possível notar que existem produtos no mercado contendo estrições ou variações geométricas, e todas elas mostram produtos com estrições, furos ou entalhes (com menos material). Logo, ainda analisando a Figura 2 torna-se claro o objetivo dessas novas tendências de produção: desenvolver produtos mais enxutos, conforme pontuado anteriormente. E, nesse sentido, o assunto deste trabalho é o estudo de uma das variações geométricas mencionadas do produto SAC: um SAC contendo estrições.

Por outro lado, e em conjunto com os produtos que têm surgido na indústria, as tecnologias de concepção e fabricação também têm avançado.

As ferramentas de design paramétrico, a qual será abordada mais adiante, como o Rhinoceros 3D, Grasshopper e Karamba3D, representam uma forma peculiar de como os produtos são concebidos e desenvolvidos. Essas ferramentas oferecem uma abordagem flexível e iterativa para o design, permitindo a criação de

geometrias complexas e a simulação do comportamento estrutural dos produtos em um ambiente virtual. A integração dessas ferramentas permite uma análise mais abrangente, facilitando a tomada de decisões durante o processo de desenvolvimento. Além disso, a modelagem paramétrica oferece a vantagem de automatizar tarefas repetitivas e explorar um grande número de variantes de design em um curto período de tempo, acelerando o ciclo de desenvolvimento e reduzindo os custos associados.

**Figura 2** - Exemplos da comercialização de variações de SACs contendo estricções, furos e entalhes.



Fonte: Esquerda, Acufloor (2024); direita: adaptado de Sigma (2024)

Será abordado no capítulo da Revisão da Literatura como essas ferramentas auxiliaram, em outros estudos, no processo de avaliação e proposição de produtos. Bugin, et al. (2020), por meio do Grasshopper, explorou as capacidades mecânicas de um solado, com base em um padrão Voronoi, criando um produto personalizado ao usuário. Ruggiero (2021), utilizou plugin Karamba3d para avaliar estruturas reticuladas gridshells (grelhas em casca). Fagundes (2019), comprovou como mais plugins associados ao Grasshopper otimizaram um produto, levando em consideração tempo e dinheiro de sua fabricação.

Além disso, será mostrado no mesmo capítulo de revisão a relação entre as três principais ferramentas deste estudo: Rhinoceros, Grasshopper e Karamba3d.

## 1.2 Problema de pesquisa

De acordo com o que foi contextualizado anteriormente, o problema de pesquisa do presente trabalho foi levantado:

**Como a realização de simulações mecânicas avaliando o produto SAC, com o auxílio das ferramentas computacionais de design Rhinoceros 3D e**

**seus plugins Grasshopper e Karamba3d, podem avaliar o efeito causado pela inserção de estrições no braço do produto?**

### **1.3 Hipótese**

Com a realização de simulações mecânicas utilizando as ferramentas mencionadas, por meio da conexão de segmentos de barras de dimensões variáveis na região da estrição e dimensões constantes fora dessa região é possível realizar uma avaliação do efeito de estrições no braço do produto. Esse procedimento permite a exploração de aplicações a um custo relativamente baixo de pesquisa e desenvolvimento. Além disso, agrega uma técnica inovadora de análise de produtos a futuros estudo e, conseqüentemente, projetos.

### **1.4 Objetivos**

Com base no exposto, os objetivos que nortearam a elaboração deste estudo são os seguintes:

#### **1.4.1 Objetivo Principal**

Avaliar como a inserção de uma estrição circular afeta a estrutura do produto SAC submetido a condições impostas de carregamento e, também, avaliar como o software Rhinoceros 3d e seus plugins contribuem para essa análise do produto.

#### **1.4.2 Objetivos Secundários**

1. Determinar os pontos de melhor posição e tamanho das estrições ao longo do braço do produto;
2. Avaliar os mesmos resultados para diferentes direções de inserção das estrições (com estrições inseridas nas bordas superior e inferior, nas laterais e, por último, em todas as quatro bordas);

3. Avaliar os mesmos resultados para diferentes direções de inserção das estrições (com estrições inseridas nas bordas superior e inferior, nas laterais e, por último, em todas as quatro bordas).
4. Discutir tal comportamento mecânico, a fim de apontar possíveis estudos futuros.
5. Discutir sobre o uso do Rhinoceros 3D e seus plugins (Grasshopper e Karamba3D), abordando as experiências aprendidas durante a elaboração do presente estudo com essas ferramentas de design utilizadas.

### **1.5 Justificativa**

A realização deste estudo se justifica no potencial da integração do Rhinoceros 3D, Grasshopper e Karamba 3D para a proposição de uma abordagem eficaz na busca pela redução do volume de produtos sem comprometer a integridade estrutural ou desempenho funcional.

Tal avaliação, aqui proposta, pode contribuir para o estudo de um design enxuto. Como mencionado, esse conceito se trata de um processo de pensamento de projeto e foi uma das motivações deste trabalho.

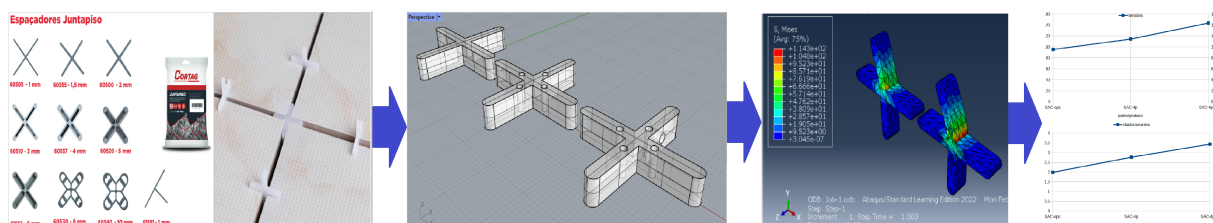
A modelagem de um produto contendo estrições serve como ponto de partida para avaliações de relações de geometria e estrutura para estudos mais aprofundados.

A estrição ao longo do comprimento (braço) do produto como forma de manipulação e otimização geométrica do mesmo foi adotada considerando que furos, estrições e entalhes já são parte das especificações do produto. Como mencionado anteriormente, há, no mercado atual, variações do produto sendo estudado e comercializado com essas características. Considerando a busca por uma produção mais enxuta, portanto, optou-se por explorar as capacidades estruturais de uma dessas variações (contendo estrições) diante de um conjunto de restrições específicas.

Em análise preliminar do produto, seu comportamento mecânico contendo outro tipo de variação geométrica (furos) foi analisado por simulação computacional. A Figura 3 ilustra, em uma escala mais ampla, a análise feita no outro estudo pelo autor para que apenas seja entendida a natureza da simulação realizada, não sendo

necessário ao leitor o entendimento dos detalhes de como foi realizada. Ou seja, a mesma figura serve apenas para pontuar como uma ferramenta computacional de design utilizada pelo próprio autor deste estudo presente pode abordar um produto da vida cotidiana a fim de estudar suas particularidades.

**Figura 3** - Avaliação das capacidades mecânicas do SAC contendo furos, previamente da confecção desse trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após ter sido realizado aquele estudo (variação que continha furos), decidiu-se considerar outra variação e, além disso, definiu-se alguns parâmetros iniciais de abordagem:

1. Para a condição de redução de volume: estrições ao invés de furos;
2. Ferramenta de simulação mecânica: Rhinoceros com plugins de parametrização Grasshopper e de simulações mecânicas Karamba 3d;
3. Abordagem de simulação: dimensionamento de posição e tamanho de estrição com restrição de deslocamento de 1mm;
4. Aplicação de carga aplicada de 30 N na ponta do braço do produto, o qual tomou-se como engastado (fixo em apenas uma extremidade).

Será explicado alguns conceitos fundamentais para o entendimento do uso desses parâmetros neste trabalho. No capítulo da Revisão da Literatura, o produto, as ferramentas de design e conceitos de mecânica, além de ferramentas de aplicação, serão apresentados.

O software Rhinoceros 3d em conjunto com seus plugins foi utilizado devido ao nicho de utilização do software, preço relativamente acessível a estudantes e, além disso, se buscou explorar as capacidades do mesmo. Os plugins do Rhinoceros têm tido boas frequências de atualizações. E, além disso, o Grasshopper permite a modelagem paramétrica da geometria. Portanto, esses motivos se mostraram promissores para um estudo com a ferramenta.

## 1.6 Delimitações da pesquisa

O presente estudo não aborda aspectos detalhados relacionados à fabricação do produto. Portanto, à injeção do polímero no molde ou a aplicação ou uso do produto em obra ou campo não será discutida. Em vez disso, o trabalho concentrou-se exclusivamente em simulações e análises estruturais para explorar o efeito que as estricções podem causar nas variações de direções de inserção no braço do produto. Com isso, foi possível avaliar suas capacidades frente ao conjunto específico de restrições impostas anteriormente e detalhadas no capítulo de Metodologia.

As condições de simulação estrutural se limitaram a apenas carregamentos estáticos (aplicadas lentamente). O material do produto foi tomado como elástico linear e seu comportamento mecânico idealizado como uma estrutura reticulada.

O tipo de separador utilizado para as simulações foi o de formato cruzeta, considerado pelo motivo de ter se mostrado uma geometria relativamente simples de ser analisada. E as condições, as quais serão mostradas na Metodologia, foram as únicas testadas.

A análise de otimização se concentrou, principalmente, em cálculos empíricos de posições e tamanhos de restrições obtidas através do uso do plugin.

Foi utilizado apenas o software Karamba 3d em conjunto com o Grasshopper no Rhinoceros 3d.

Até o momento da realização do estudo, o plugin Karamba 3D não possui a função de gerar seções contínuas. Em vez disso, apenas permite a criação de trechos de valores constantes, com um número finito (máximo de 20 na versão gratuita) de segmentos que possuíam a mesma altura da barra. Diante dessa limitação, optou-se por criar segmentos de altura constante conectados entre si, com variação progressiva de valores, simulando assim uma geometria circular. Resultando em uma discretização em trechos com seção constante. A metodologia detalhará como foi realizada essa distribuição de altura de cada segmento, garantindo que se conectassem de forma a variar a geometria do produto. Portanto, outras formas geométricas não diferentes das mencionadas não foram abordadas neste trabalho.



## 1.7 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos. Cada capítulo com itens e alguns deles possuem subitens.

Este Capítulo 1 apresentou os tópicos introdutórios desta pesquisa científica. Na seção de Contextualização, foi realizada uma familiarização do leitor com os temas abordados neste trabalho. Em seguida, foram apresentados o problema de pesquisa e a hipótese levantada com base nele. Os objetivos e as delimitações da pesquisa também foram delineados, fornecendo a direção e o escopo do trabalho. A justificativa de realização deste trabalho foi pontuada, fundamentando a metodologia adotada nas escolhas de variáveis, parâmetros e caminhos de desenvolvimento. E, por último, como foi delimitado o estudo.

O Capítulo 2 revisa a literatura relacionada ao produto Separador Cruzeta, conceitos e aplicações de Modelagens Geométricas e, por último, conceitos fundamentais de mecânica estrutural e aplicação com os softwares que utilizam esses conceitos para análises mecânicas.

O Capítulo 3 detalha a metodologia adotada para a investigação da inserção da estrição no produto, como a modelagem paramétrica foi empregada e como os resultados das simulações mecânicas foram coletados. O Capítulo 4 apresenta os resultados da pesquisa, coletados na Metodologia. Foram incluídas análises das simulações mecânicas nas três direções de inserção das estrições, conforme detalhado na Metodologia.

O Capítulo 5 conclui a dissertação, resumindo as descobertas, destacando contribuições significativas e sugerindo possíveis aplicações para pesquisas futuras com o que foi aqui aprendido.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

Pretende-se, nesse capítulo, apresentar os conceitos empregados sob a perspectiva de trabalhos anteriores já presentes na literatura e materiais técnicos.

O item 2.1 aborda o produto: qual sua relação com as normas técnicas e alguns dos existentes na indústria. Além disso, é apresentado simplificadamente sua forma de fabricação. Ressalta-se que a fabricação, entretanto, não foi considerada no presente estudo, servindo apenas para auxiliar na contextualização do produto.

O item 2.2 traz conceitos presentes na modelagem: como os sólidos podem ser definidos e técnicas de modelagem. Em seguida, são explicadas as técnicas utilizadas pelo Rhinoceros 3D e pelo Grasshopper com exemplificações de estudos.

O item 2.3 contempla conceitos fundamentais da mecânica de estruturas, a forma prática de como as estruturas são modeladas e analisadas e alguns exemplos de estudos com o plugin utilizado neste trabalho (o Karamaba3d). Ainda nesse item, é apresentada a relação entre Rhinoceros 3D, Grasshopper e Karamaba3d para um melhor entendimento. Ressalta-se que o trabalho limitou-se a apenas apresentar a teoria de estruturas de base. A forma como esses conceitos teóricos são aplicados aos softwares não será abordada, de modo que o presente trabalho contempla apenas a aplicação dos mesmos para a solução do problema proposto.

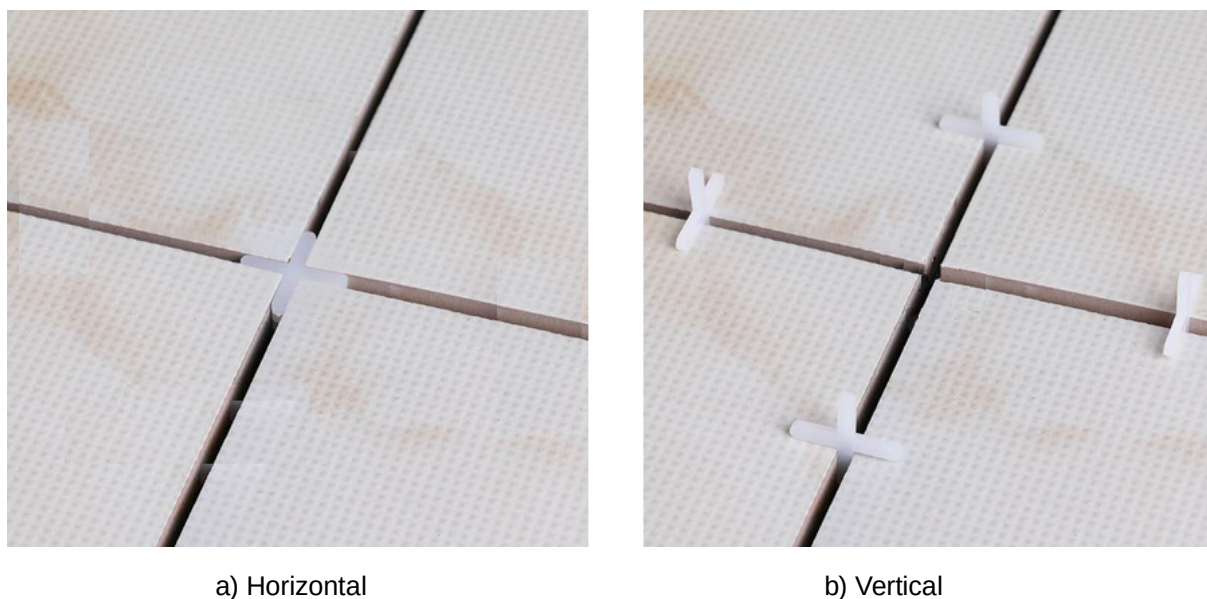
### 2.1 O Separador de Azulejo em formato Cruzeta (SAC)

Muito utilizado na área da construção civil, o SAC é essencial na fase de revestimento de paredes e pisos. Ele possui a função principal de afastar peças de azulejos a uma distância determinada pela espessura do braço do produto. O espaço vazio entre as peças de azulejo é, após a aplicação do SAC, preenchido por rejunte (massa) mantendo a distância constante entre elas. Essa separação serve para que as peças adjacentes não sofram trincas devido à eventuais deslocamentos das mesmas. Além disso, devem ser estanques (impermeabilidade).

Na Figura 4a, um produto é utilizado de forma horizontal no centro de quatro placas cerâmicas, apenas mantendo a distância entre elas pela espessura dos braços do SAC. Porém, na Figura 4b é ilustrado a utilização de quatro SACs

verticalmente garantindo, além de espaçamento, nivelamento entre as quatro peças cerâmicas. Na primeira opção de uso, as peças cerâmicas são geralmente bem regulares (alinhadas e em esquadro). Já a utilização de quatro espaçadores posicionados na vertical da segunda opção é necessária quando existem imperfeições de uma ou mais peças cerâmicas.

**Figura 4** - Produto (SAC) aplicado no piso com 2 diferentes direções.



a) Horizontal

b) Vertical

Fonte: Adaptado de Walmart (2023).

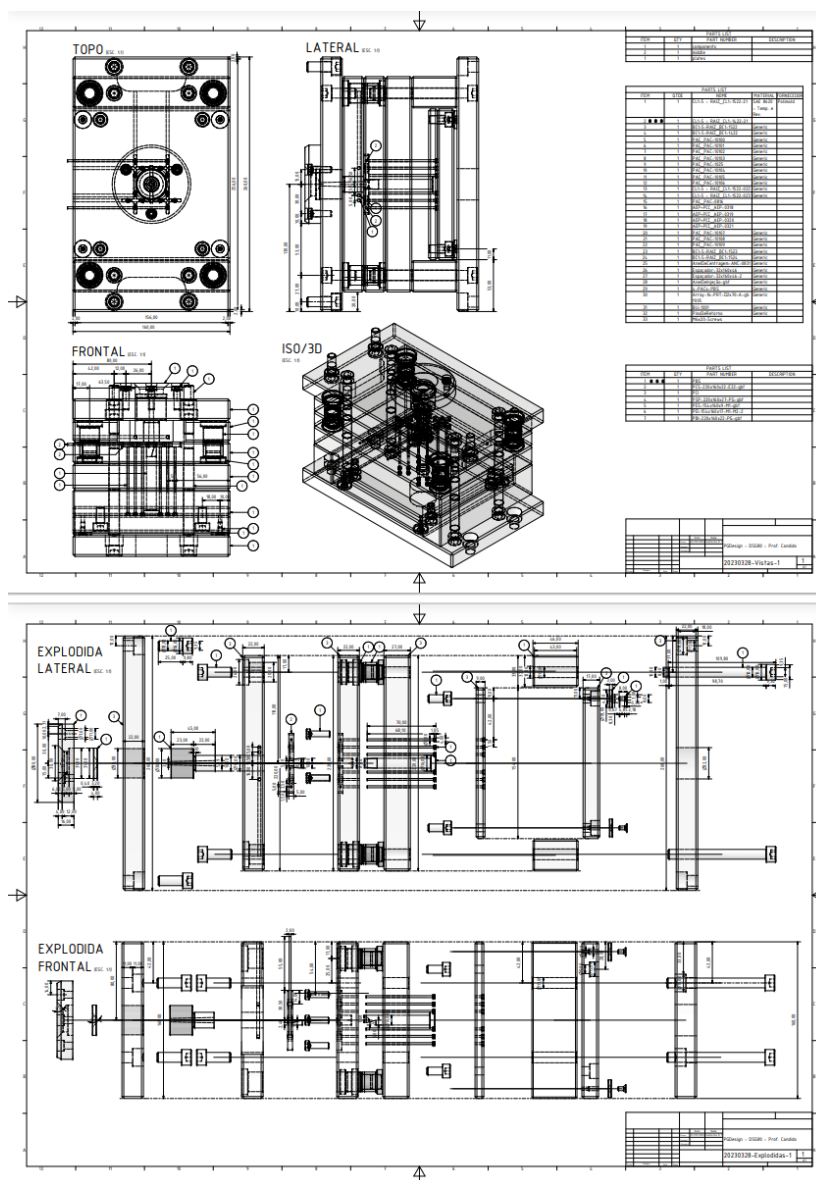
O resultado é a possibilidade de um revestimento melhor planejado a partir do próprio separador. Ainda na Figura 4 é possível perceber que esse nivelamento é garantido pelos braços laterais do produto em contato com as peças do azulejo, o qual é aplicado verticalmente deixando um braço exposto.

A Norma 13753, ABNT (1996), define algumas condições de “Revestimento de piso interno ou externo com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante – Procedimento”. Mas ela apenas aborda espaçamentos e diretrizes de execução de pisos cerâmicos. Contudo, essa norma é a que mais se aproxima da recomendação técnica da utilização do produto em obra.

O processo de fabricação do SAC envolve a injeção de polímero líquido aquecido em moldes confeccionados a partir de placas metálicas. Após o resfriamento adequado o molde é aberto, permitindo que o produto seja removido e direcionado para o processo de embalagem subsequente. O desenho do molde do produto é apresentado na Figura 5, a qual ilustra seu modelo em uma folha de

desenho técnico. O molde, conforme representado na mesma figura, é utilizado no processo de fabricação, o qual revela a presença do produto no seu interior. Porém, como mencionado, não será enfatizado a fabricação do produto, sendo a mesma figura apenas necessária para uma contextualização da fabricação do mesmo.

**Figura 5 - Desenho técnico do molde de fabricação do SAC.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Há outras opções de separadores e/ou niveladores, inclusive em formatos diferentes do cruzeta. Entretanto, como já dito anteriormente, por se tratar de uma geometria relativamente simples de ser analisada, este trabalho avaliou exclusivamente o cruzeta.

## 2.2 Modelagem Geométrica

Um objeto pode ser modelado computacionalmente para diferentes objetivos. Seja para apenas visualização, testes mecânicos de sua estrutura, como em Schwab (2016) e Cesa (2010), ou para, até mesmo, uma otimização de custo e tempo de fabricação de produtos (FAGUNDES, 2019) a modelagem é sempre a primeira etapa.

Este item aborda conceitos e aplicações da modelagem e como ela é importante para análises subsequentes em produtos.

### 2.2.1 Teoria: Conceitos, variáveis e modelos

Existem alguns conceitos elementares na modelagem. Dentre eles, destaque-se:

1. **Constructive Solid Geometry (CSG)**: envolve criar geometrias complexas combinando geometrias simples (primitivas) utilizando operações como União, Intersecção e Diferença.
2. **Boundary Representation (BREP)**: define as superfícies e contornos dos objetos. Descreve suas geometrias usando vértices, arestas e faces. Promove informações detalhadas sobre topologia, conectividade e propriedades das superfícies.
3. **Paramétrica**: Utiliza parâmetros e restrições. Permite a criação de modelos inteligentes facilmente modificáveis e atualizáveis por ajustes de parâmetros. Captura relações geométricas de diferentes partes de objetos, permitindo automação de projeto e otimização.
4. **Non-Uniform Rational B-Spline (NURBS)**: técnica matemática de representação que utiliza curvas e superfícies para descrever objetos físicos. Curvas NURBS são definidas por pontos de controle e pesos, permitindo controle preciso da forma e curvatura do objeto. Comumente utilizada em Computer-Aided Design (CAD) ou Design auxiliado por computador, Design automotivo, e Industrial.
5. **Point Cloud Modeling**: utiliza um grande conjunto de pontos, geralmente capturados por escaneamentos ou sensores. Comumente utilizados em

áreas como Engenharia Reversa, Visão Computacional, e Reconstrução 3D.

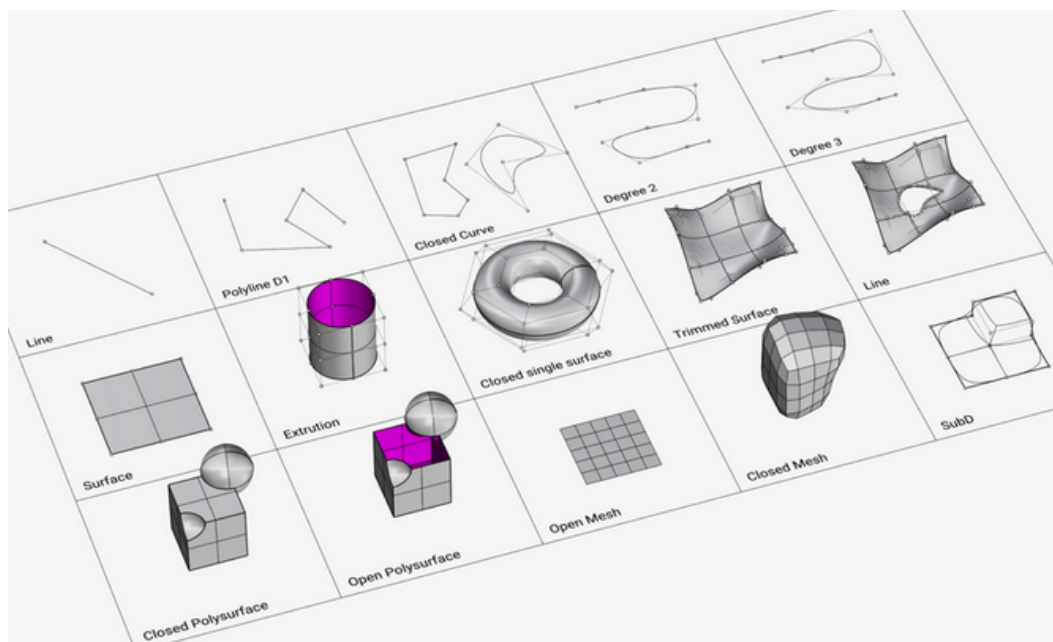
As ferramentas de Design de produto permitem que as geometrias dos objetos sejam parametrizadas. Isso lhes confere versatilidade para manipulação geométrica ao se utilizar formas complexas e amplitude de simulações. Esse conceito foi utilizado neste trabalho ao ser parte da técnica de modelagem utilizada pelas ferramentas cobertas no próximo subitem.

### 2.2.2 Aplicação: O software Rhinoceros 3d (Rhino) e o plugin Grasshopper

Alguns softwares podem ser utilizados para a Modelagem de geometrias de produtos. Eles utilizam uma ou uma combinação de técnicas. Um exemplo de ferramenta, e o utilizado para este estudo, é o Rhinoceros 3d (Rhino). O Rhino utiliza, essencialmente, técnicas NURBS e CSG para criar as geometrias, as quais são representadas como BREPs (além de malhas, as quais não são abordadas nesse trabalho).

A Figura 6 ilustra como, a exemplo de geometrias simples, o Rhino permite modelagens utilizando os conceitos vistos anteriormente. Cademy (2023) apresentou, no canto superior da mesma figura, BREPs e curvas (construídas por NURBS). É possível notar que as geometrias da primeira linha do quadro apresentado pelo autor possuem geometrias simples de linhas, curvas e pontos. Os pontos, como vistos, recaem tanto sobre quanto fora das outras geometrias. As geometrias que possuem pontos sobre as linhas são BREPs, em que guardam informações sobre suas delimitações e conectividades. Por outro lado, as que possuem pontos que recaem fora das curvas, ainda na mesma linha do quadro do autor, são curvas NURBS. Essas últimas têm pontos de controle fora delas mesmas, o que garante suas curvaturas características. Em outra parte da mesma figura, no canto inferior, é possível notar que os sólidos das duas primeiras colunas da linha mais abaixo no quadro foram construídos por CSG. Ou seja, houve operações de subtração da esfera no cubo (aberto ou fechado) para que o mesmo mostrasse tal remoção de material em formato esférico visto na mesma figura.

**Figura 6** - A interface do Rhinoceros 3d e modelagem de geometrias simples.



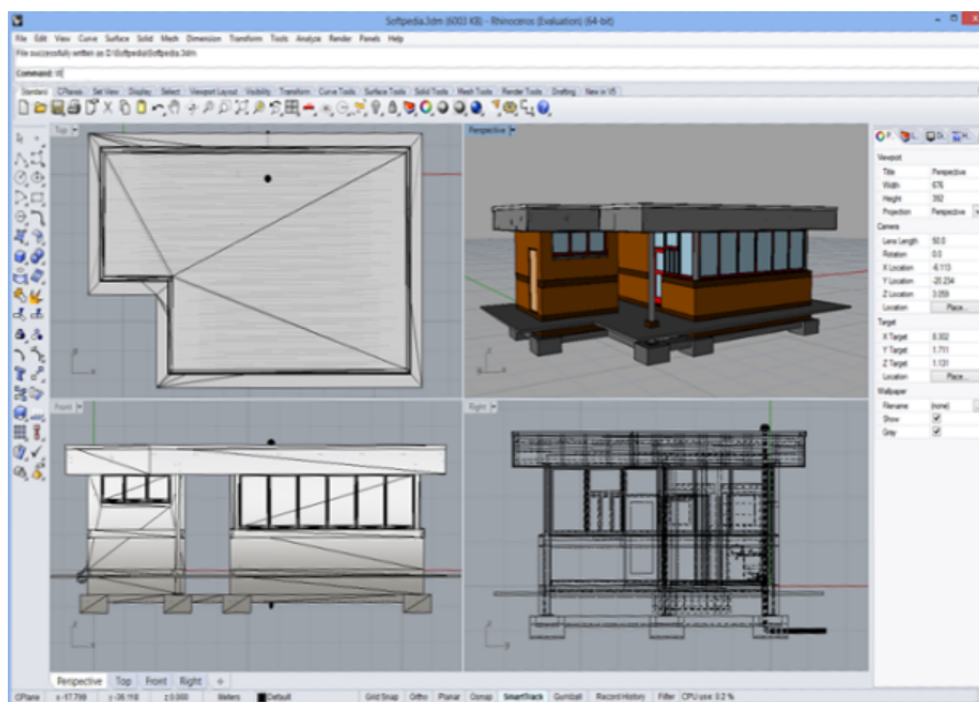
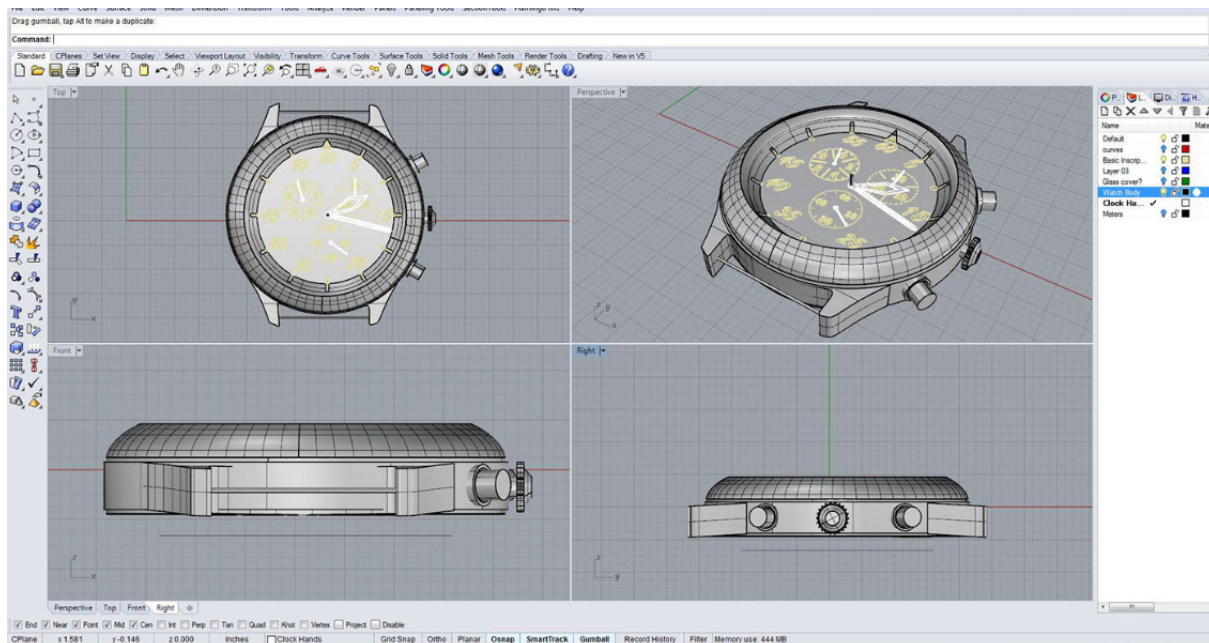
Fonte: Cademy (2023)

Mais exemplos de aplicações podem ser encontrados para o software. A Figura 7 ilustra alguns deles. No canto superior da mesma figura é possível identificar um relógio modelado e sendo visualizado nas quatro vistas técnicas principais: superior, frontal, lateral e isométrica (3d). Mas, no outro canto (inferior) da mesma figura é possível identificar objetos maiores como a edificação ilustrada. Em ambas as aplicações mostradas é possível também notar a interface gráfica do Rhinoceros 3D. E, além da modelagem direta, o software oferece ferramentas internas e externas (plugins).

A técnica de modelagem por parametrização é garantida pelo plugin (extensão) Grasshopper. Ele possui uma interface gráfica com usuário interna no Rhino e a sua característica mais notável é a programação visual. Cada componente possui sua função de operação característica e a ligação dos componentes com essas características permitem funcionalidades mais complexas, como será exemplificado com aplicações de estudos realizados nos próximos parágrafos ainda deste item. Além disso, a Metodologia deste trabalho promove uma importante explicação dos passos de construção com o Grasshopper para o entendimento das análises desempenhadas neste trabalho.



Figura 7 - Relógio (superior) e edificação (inferior) modelado em Rhino.



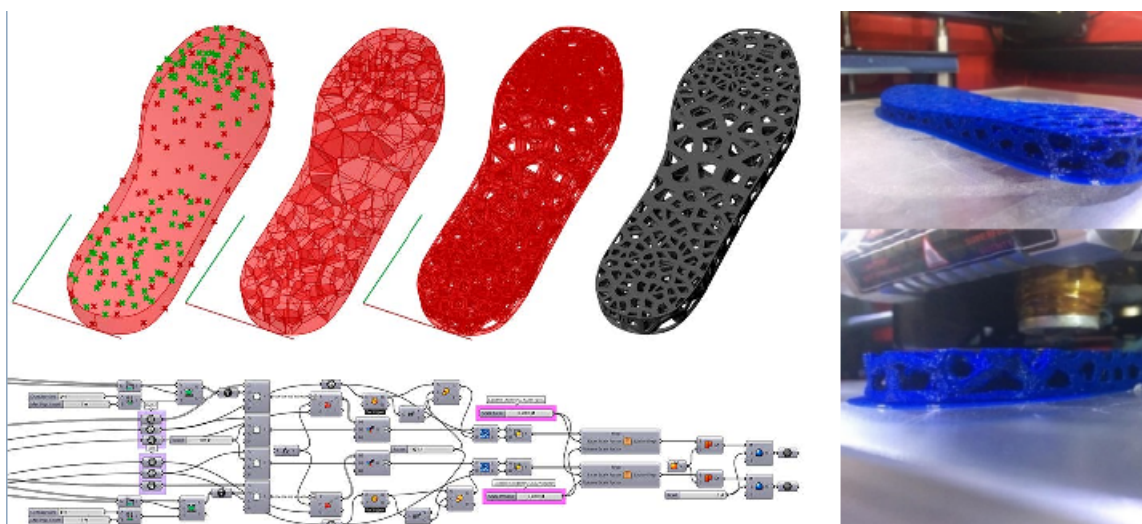
Fonte: Superior, NextFab (2024); inferior, Boxx (2023)

Em Bugin, *et al.* (2020) os autores parametrizaram uma palmilha de calçado com auxílio do plugin Grasshopper do Rhino. Dados mapeados de sensores de pressão e um algoritmo desenvolvido geraram, no software, uma geometria do produto baseada em padrões de resistência mecânica. Parte da modelagem no programa e da estrutura da palmilha impressa são ilustradas na Figura 8. É possível ver, no canto superior esquerdo da mesma figura, o padrão do solado, criado pelos



componentes vistos no canto inferior esquerdo. No outro lado na figura, observa-se o produto impresso em poliuretano termoplástico. Apesar de a mesma figura não permitir uma análise detalhada do padrão estrutural ou dos componentes, ela permite evidenciar a capacidade do Grasshopper. Os autores concluíram que a modelagem paramétrica contribui em projetos de calçados individualizados, conferindo personalização do produto aos usuários.

**Figura 8** - Utilização do plugin Grasshopper na fabricação em impressão 3d de palmilha

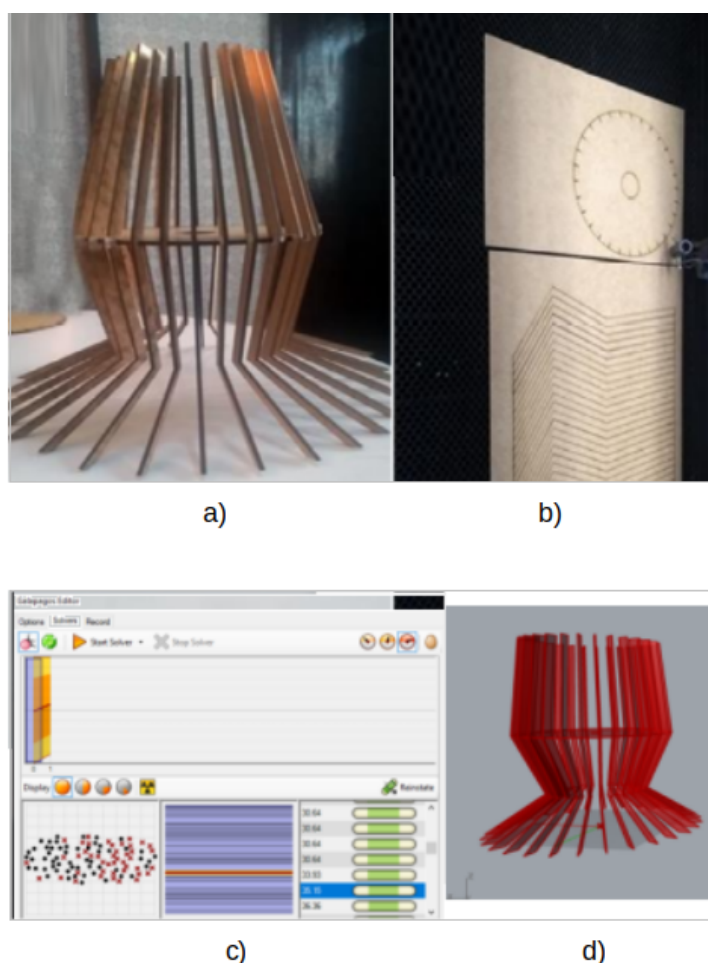


Fonte: Bugin, *et al.* (2020)

Em Fagundes (2019) o autor utilizou um plugin do Grasshopper chamado Galapagos para otimizar a fabricação de uma luminária. Os parâmetros de corte a laser, como custo e tempo foram levados em consideração para se obter, finalmente, a melhor opção de produto. Na Figura 9 é possível identificar, de forma geral, as fases envolvidas no estudo. No canto superior esquerdo da mesma figura é ilustrado o produto final; no canto superior direito é ilustrado a fabricação; no canto inferior esquerdo é ilustrado o processo de convergência do plugin para a obtenção das soluções; e no canto inferior direito é mostrado a resposta final de produto, o qual naquele estudo teria o melhor desempenho.

Portanto, o *software* Rhinoceros e seus plugins permitem auxiliar diversos profissionais na modelagem como na otimização geométrica de produtos, levando em consideração diversos fatores de projeto. Custo, tempo, resistência mecânica, volume de material, massa, entre outros fatores são, comumente, as variáveis de estudo consideradas por diversos designers.

**Figura 9** - Utilização do plugin Galapagos na fabricação em corte a laser de luminária.



Fonte: a) O produto b) a fabricação c) a simulação pelo Galapagos d) o modelo de resultado.

Fagundes (2019)

## 2.3 Estruturas

Nesse item é apresentada a teoria. Como mencionado, o trabalho se limitou a apenas aplicar os softwares (Rhinceros 3D, Grasshopper e Karamba 3D). Entretanto, é importante um entendimento dos fundamentos da mecânica das estruturas. Os próximos subitens abordam esses conceitos.

### 2.3.1 Teoria: Conceitos, variáveis e modelos

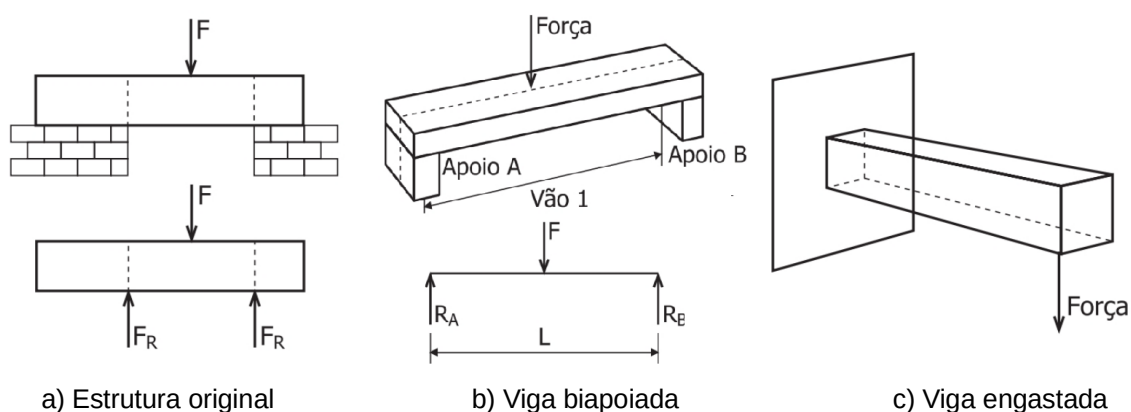
“A natureza usa materiais de estrutura celular fibrosa (como na maioria das plantas e animais) que criam taxas incríveis de peso-resistência. Um material inerte

granular, como uma casca de ovo, é usado frequentemente com máxima economia em relação às forças que a estrutura deve resistir.” (ONOUYE e KANE, 2015).

“O design, ou a concepção estrutural, é essencialmente o processo que envolve o equilíbrio entre as forças aplicadas e os materiais que resistem a essas forças” (Onouye e Kane, 2015). Nesse caso, duas são as possibilidades. “Uma estrutura ou está em equilíbrio ou em movimento.” (Botelho, 2008).

Na Figura 10 são apresentados alguns modelos de estruturas. Todos eles são modelos idealizados de barras (estruturas com apenas uma dimensão predominante). Na Fig. 10a, ilustra-se a aplicação de uma força e o equilíbrio é estabelecido por outras duas de apoio (reação). Na Figura 10b, um modelo estrutural unidimensional é apresentado. Na Fig. 10c, um modelo com uma condição em que o elemento estrutural está suportado: o engastamento.

**Figura 10** - 3 casos de modelos de estruturas.

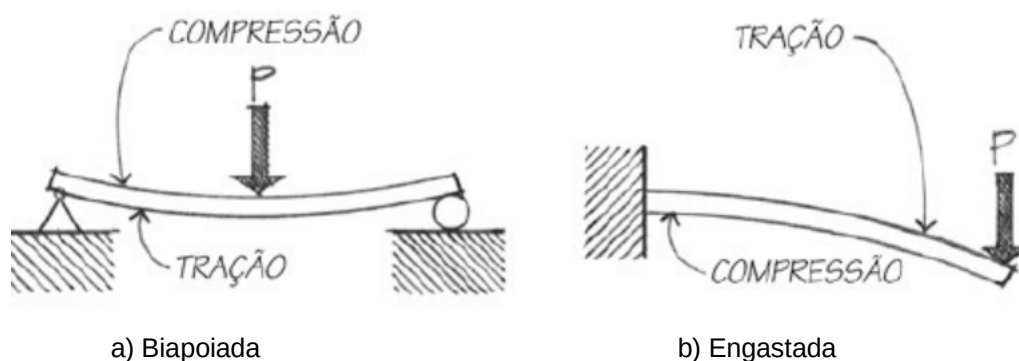


Fonte: Adaptado de Botelho (2008).

Uma situação de flexão é ilustrada na Figura 11. Na Figura 11a, em condição de suporte apoiada nas duas extremidades e na Figura 11b apenas engastada em uma delas. É aplicado um mesmo carregamento (força)  $F$  na estrutura. Como ilustrado por Onouye e Kane (2015), é esperado que ambas deformem e desenvolvam tensões internas. A primeira se comprime na metade superior e se traciona (estica) na metade inferior. A segunda se comprime na parte inferior e se traciona na parte superior. Na condição de suporte da Figura 11a ambas as extremidades da barra apresentam deslocamento nulo. Por outro lado, no caso engastado (Figura 11b) um deslocamento na extremidade livre é esperado. Quanto mais próximo da extremidade e maior o valor de  $F$  maior esse deslocamento, como

será explicado mais adiante. Ressalta-se que esses princípios são muito importantes, pois o desenvolvimento desse trabalho se baseou em uma viga engastada exatamente como a da mencionada Figura 11b.

**Figura 11** - Dois modelos de vigas deformando por flexão.



Fonte: Adaptado de Onouye e Kane (2015)

Por esses modelos, ilustram-se algumas condições de funcionamento e comportamento mecânico das estruturas. “(...) os elementos estruturais dentro do sistema são verificados matematicamente para que sejam asseguradas a segurança e a economia da estrutura”. O que é influenciado pela “geometria e o arranjo dos elementos de carregamento e apoio, o uso dos materiais e a colocação das ligações”. (Barry Onouye; Kevin Kane, 2015).

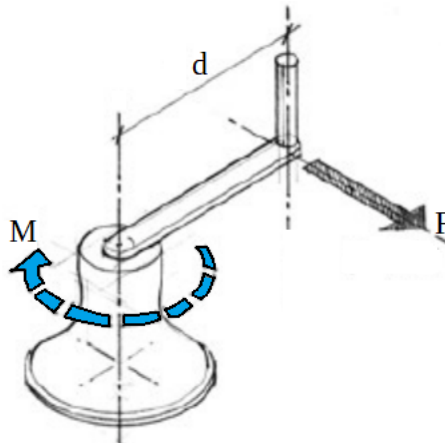
Os mesmos autores também pontuam as “exigências funcionais principais” das estruturas como:

1. Estabilidade e equilíbrio
2. Resistência e rigidez
3. Continuidade
4. Economia
5. Funcionalidade
6. Estética

Uma força gera um efeito (uma sollicitação) nas estruturas. Como mencionado, um sistema precisa estar em equilíbrio. Mas além da força há outra ação que uma estrutura pode estar submetida que deve ser considerada para estar em estado de equilíbrio: o Momento. Este seria a “tendência de uma força produzir rotação de um corpo em torno de algum eixo de referência”. Na Figura 12, uma

manivela é girada devido ao momento (em azul) causado pela aplicação de uma força  $F$  com braço (distância)  $d$ .

**Figura 12** - Momento ao giro de manivela.



Fonte: Adaptado de Onouye e Kane (2015).

Segundo Onouye e Kane (2015), “(...) quantitativamente, o momento  $M$  de uma força  $F$  em torno de um ponto  $A$  é definido como o produto do módulo da força  $F$  pela distância perpendicular  $d$  de  $A$  até a linha de ação de  $F$  da equação 1”. O subscrito  $A$  indica o eixo em torno do qual o momento é calculado.

$$M_a = d \times F \quad [1]$$

“Os momentos fazem um corpo adquirir a tendência ao giro. Se um sistema tentar resistir a essa tendência rotacional, surgirá flexão”. (Barry Onouye; Kevin Kane, 2015). Portanto, o Momento influenciará na flexão.

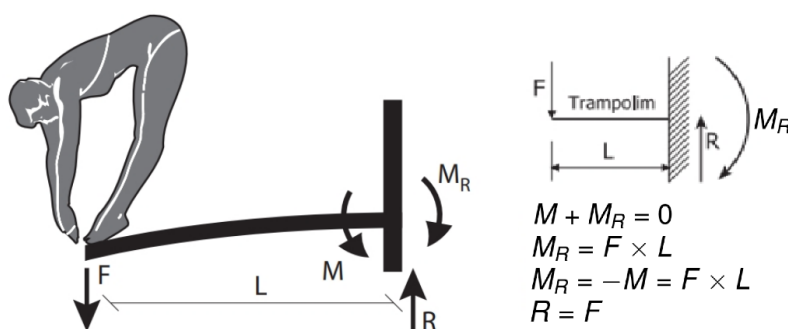
A Figura 13 mostra um trampolim em que ocorre o surgimento desse Momento. O autor ainda demonstrou seus cálculos e sua forma de atuação no elemento. “Uma pessoa empurra para baixo um trampolim. Seguramente, o trampolim se deformará” (BOTELHO, 2008).

A “existência de ações externas, mesmo que equilibradas por reações (...) gera esforços internos que serão resistidos, ou não, pela constituição do corpo.” (BOTELHO, 2008).

A Figura 14 ilustra alguns exemplos de condições de apoio. Elas exibem um comportamento diferente do elemento ao permitir liberdade de movimento em

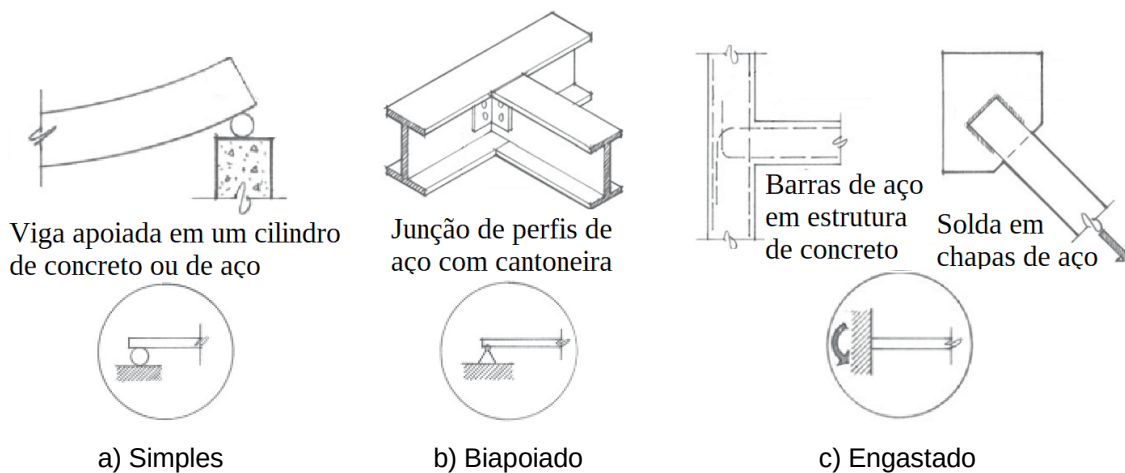
algumas direções. De modo que o elemento analisado pode se deslocar no espaço ou rotacionar no ponto de apoio em questão. Na Figura 14a, a barra pode se deslocar para os lados e girar. Na 14b, há a fixação do apoio permitindo apenas que a barra gire. Na 14c, ela está impedida de se deslocar horizontalmente, verticalmente e girar. Logo, não irá se mover para lados ou rotacionar. Contudo, ela oferece uma desvantagem em outro aspecto: a tensão.

**Figura 13** - Modelos de saltador de trampolim e cálculo da barra em equilíbrio e deformada.



Fonte: Adaptado de Botelho (2008)

**Figura 14** - 3 exemplos de condições de apoio.

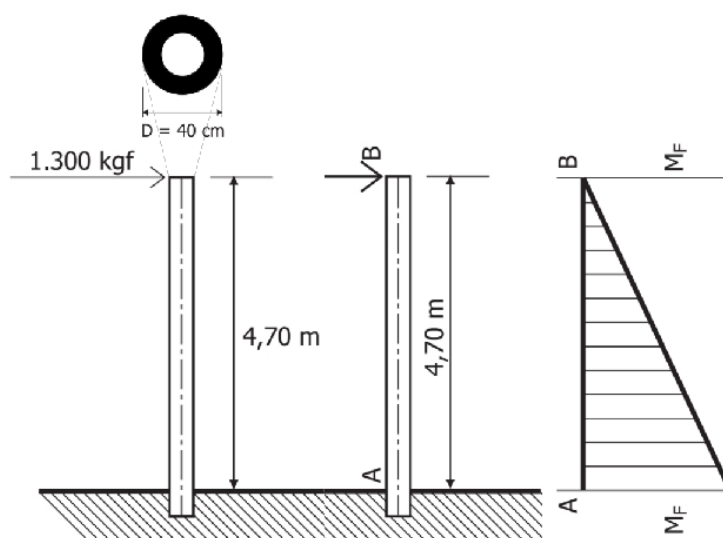


Fonte: Adaptado de Onouye e Kane (2015).

Na Figura 15 alguns elementos gráficos são novos. Um círculo vazado preenchido e um triângulo: são eles a geometria transversal da estrutura e um diagrama mostrando o comportamento do Momento ao longo do comprimento dela. Onouye e Kane (2015) comentam a função desse elemento.

“O projeto de barras exige o conhecimento dos valores (...) dos momentos e informações sobre suas seções transversais. O formato e a relação entre as dimensões da seção transversal de uma barra são muito importantes para manter as tensões de flexão e cisalhamento dentro dos limites admissíveis e controlar a deflexão (deslocamento transversal) que surgirá em decorrência das cargas.” (ONOUYE e KANE, 2015).

**Figura 15** - Exemplos de vigas engastadas com geometria transversal e diagrama.



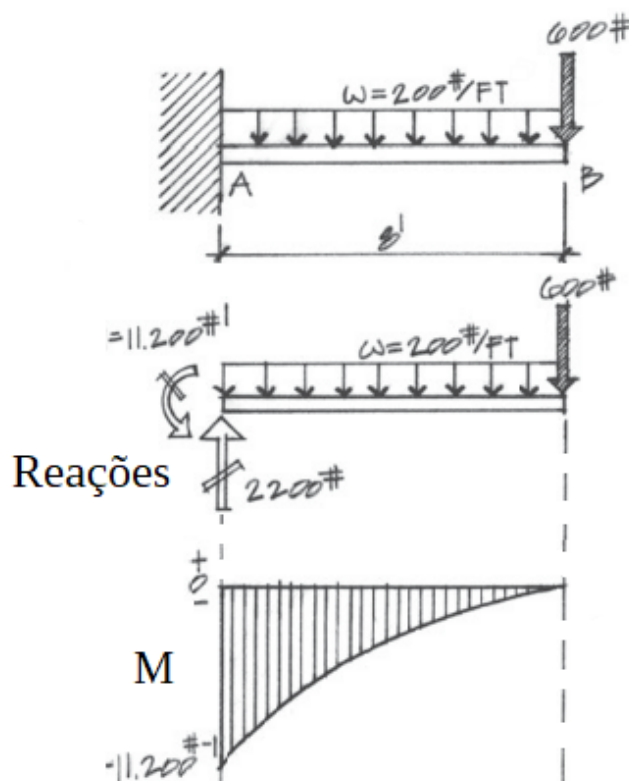
Fonte: Adaptado de Botelho (2008)

“Quando uma viga estiver sujeita a qualquer um dos carregamentos (...) ela deve resistir a essas cargas e permanecer em equilíbrio. (...) deve haver um sistema de forças internas (...) para resistir às forças e aos momentos aplicados. As tensões e os deslocamentos transversais das vigas são funções das reações, das forças e dos momentos internos. Por esse motivo, é conveniente ‘mapear’ essas forças internas e construir diagramas que forneçam uma imagem completa dos módulos e das direções das forças e dos momentos que agem ao longo do comprimento da viga. Esses diagramas são conhecidos como diagramas de carregamento, de esforços cortantes e de momentos fletores.” (Barry Onouye; Kevin Kane, 2015).

Na Figura 16 é possível ver o diagrama de Momento para uma estrutura com cargas concentrada e distribuída. Repare a distribuição de valores ao longo da barra. Como os valores se comportam. Portanto, por meio da Equação 1 apresentada se calcula, variando a distância  $d$ , o Momento ‘M’ e se traça o diagrama.



**Figura 16** - Cálculo e Diagramas de estrutura com cargas concentrada e distribuída.



Fonte: Adaptado de Onouye e Kane (2015).

Em resumo, a partir do cálculo e análise da distribuição dos esforços internos é possível se proceder com análises de resistência do material. E, a partir desses princípios, *softwares* permitem os cálculos de maneira mais ágil e precisa. A Figura 17 apenas ilustra um exemplo de como os *softwares* aplicam estes conceitos de mecânica estrutural, coberto neste capítulo. Ainda nessa figura é necessário apenas notar a presença desses elementos principais (a estrutura em si, diagramas e a forma deformada da estrutura).

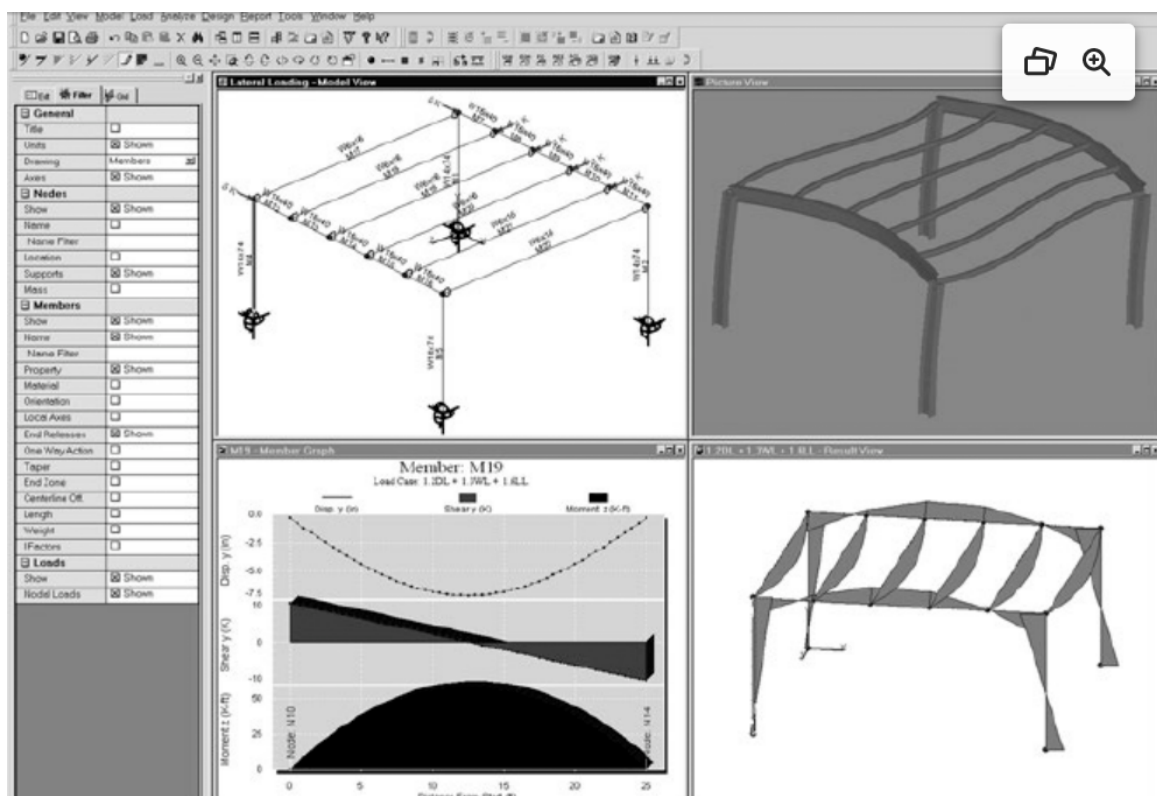
“Uma imensa variedade de materiais é usada atualmente em estruturas arquitetônicas: pedras, tijolos, concreto, aço, madeira, alumínio, plástico etc. Todos apresentam propriedades essenciais que as tornam aplicáveis a uma determinada finalidade em uma estrutura. O critério para seleção, em um nível muito básico, é a capacidade do material de suportar as forças sem deformações excessivas ou falhas estruturais reais.” (ONOUYE e KANE, 2015).

Essa passagem de Onouye e Kane (2015) revela uma característica mais importante dos materiais: sua elasticidade. Cada material possui seu Módulo de



Elasticidade (E) característico que define uma região de comportamento mecânico cujo comportamento é elástico.

**Figura 17** - Diagramas de estrutura ligeiramente mais complexa sendo processada em software.



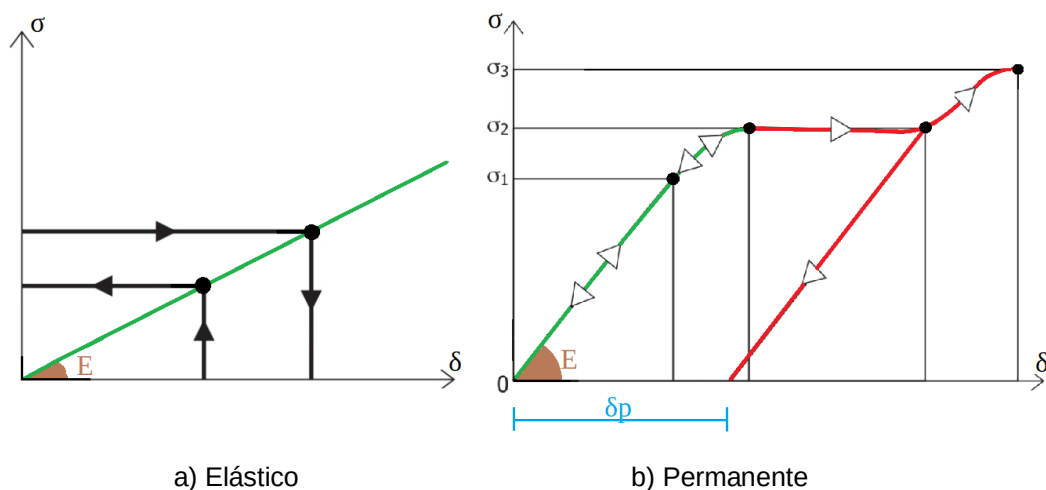
Fonte: Adaptado de Onouye e Kane (2015).

A Figura 18 ilustra o comportamento elástico. Conforme se percorre o eixo horizontal, maior deformação e tensões são desenvolvidas. Na Figura 18a se apresenta a fase elástica e na Fig. 18b um regime inelástico (plástico). Ou seja, na Figura 18b o material se deforma permanentemente (caminho em vermelho) e após a remoção da carga ele não retorna ao seu estado original. É possível identificar os sentidos da deformação através das setas sobre as curvas. Na região vermelha o retorno da deformação é por outro caminho e não o mesmo como na Figura 18a, deixando, nesse caso, uma deformação permanente  $\delta_p$  (em azul). Ainda é possível identificar graficamente a inclinação, e portanto a razão, entre tensão ( $\sigma$ ) e deformação ( $\delta$ ) é o Módulo de Elasticidade (E) em marrom.

“Todos os materiais estruturais são elásticos de alguma maneira. Quando as cargas são aplicadas e acontecem as deformações, elas desaparecerão quando a carga for removida, contanto que um determinado limite não seja superado. Esse

limite é denominado limite de elasticidade. Dentro do limite elástico não acontecem deformações permanentes em consequência da aplicação e da remoção da carga. Entretanto, se esse limite de carregamento for superado, ocorre uma deformação permanente”. (ONOUYE e KANE, 2015)

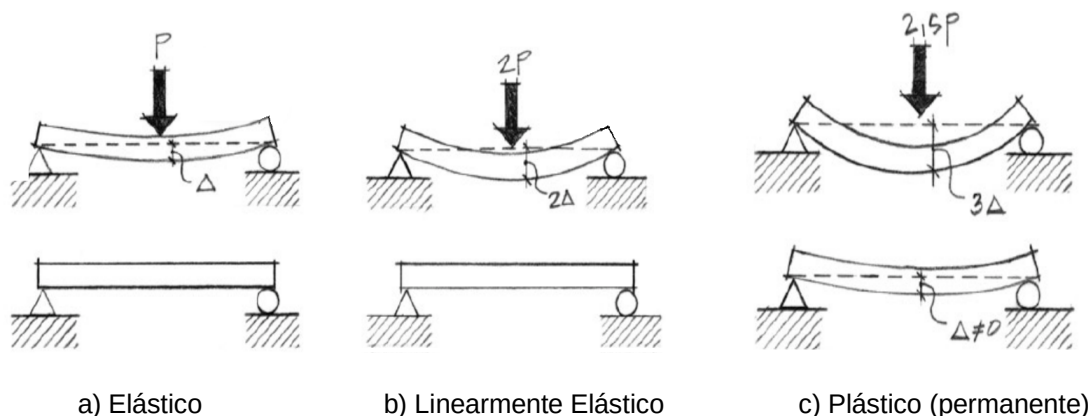
**Figura 18** - Gráficos de comportamentos de materiais em regimes de elasticidade.



Fonte: Adaptado de Botelho (2008)

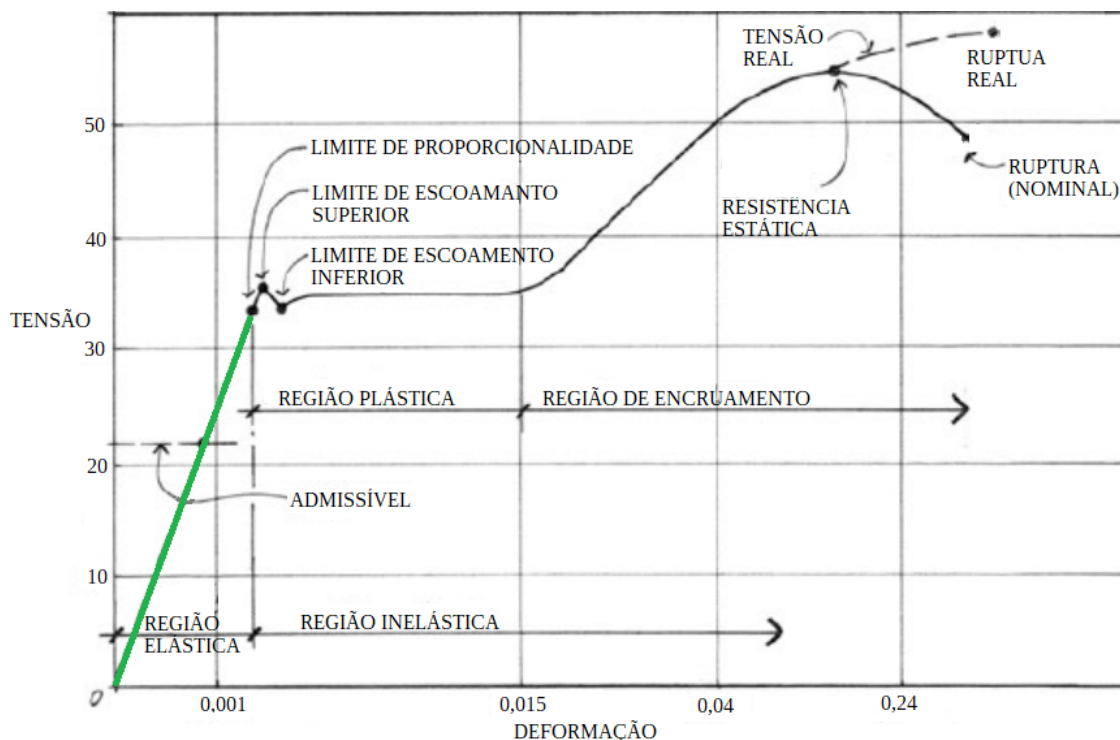
A viga da Figura 19 ilustra casos de deformação. Na Fig. 19a e 19b o caso elástico e inelástico permanente na 19c. Existe, até um limite, uma proporção de carregamento na estrutura. Enquanto esse limite não é atingido na deformação elástica a estrutura volta ao seu estado original. Mas em 19c é possível ver que há a deformação permanente, pois ao ser descarregada a estrutura não retorna ao seu estado original. E a Figura 20 exibe esse comportamento para um material exemplo.

**Figura 19** - Comportamento de viga carregada e descarregada em regimes elástico e plástico.



Fonte: Adaptado de Onouye e Kane (2015).

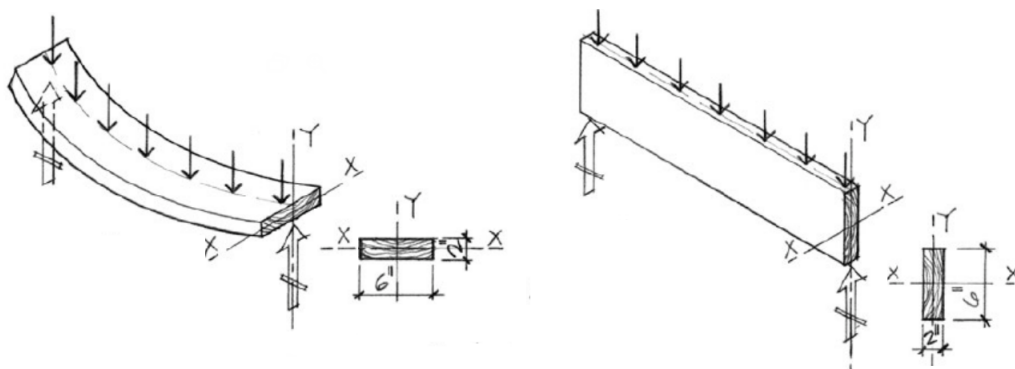
**Figura 20** - Diagrama Tensão-Deformação de um material de exemplo.



Fonte: Adaptado de Onouye e Kane (2015).

Além do material, um outro fator da barra influencia no cálculo de seu deslocamento. A Figura 21 mostra uma viga em duas posições distintas: na Fig. 21a horizontal e na 21b vertical. Nelas é possível ver a seção (corte) em que eixos passam pela mesma. É esperado, como ilustrado na Fig. 21a (seção horizontal), que a flexão em torno do seu Centro de Gravidade produza maiores deslocamentos verticais, comparados a sua mesma seção na posição vertical (Fig. 21b).

**Figura 21** - 2 Posições possíveis em viga.



a) Horizontal

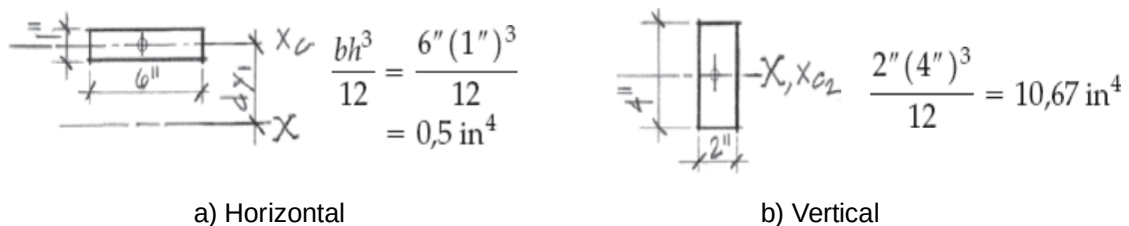
b) Vertical

Fonte: Adaptado de Onouye e Kane (2015).

“Centro de gravidade ou centro de massa se refere a massas ou pesos, e pode ser imaginado como um único ponto no qual o peso pode ser sustentado e estar em equilíbrio em todas as direções. Se o peso ou o objeto for homogêneo, o centro de gravidade e o centróide (centro geométrico da seção) coincidirão”. (ONOUYE e KANE, 2015).

O momento de inércia é uma medida geométrica de distribuição de área no entorno de um eixo (ONOUYE e KANE, 2015). A Figura 22, apresenta um exemplo de cálculo de Momento de Inércia, em que é chamado por  $I$ , para uma viga em diferentes situações. Na Fig. 22a, direção horizontal e na Fig. 22b, vertical. O Momento de Inércia é expressivamente maior para o caso vertical.

**Figura 22** - Cálculos de Momento de Inércia ( $I$ ) para uma viga.



a) Horizontal

b) Vertical

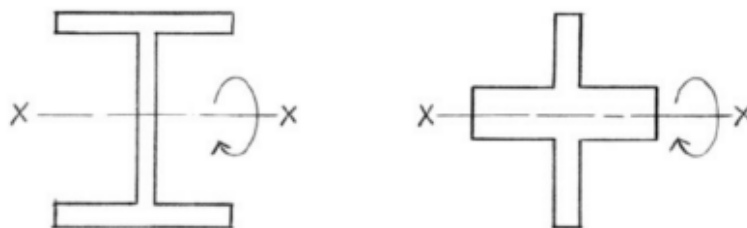
Fonte: Adaptado de Onouye e Kane (2015).

“(…) é um fator de forma que quantifica a localização relativa do material em uma seção transversal em termos de sua eficiência. A seção transversal de uma viga com um grande momento de inércia apresentará menores tensões e deflexões sob a ação de uma determinada carga do que uma seção com momento de inércia menor”. (ONOUYE e KANE, 2015)

Outro exemplo seria o da Figura 23. Na Fig. 23a, o perfil tem um valor esperado maior do que o da Fig. 23b e mais massa longe de seu eixo, comparado com a Fig 23b. Conseqüentemente, maior sua resistência em fletir, mas mais tensão para uma mesma carga.

Onouye e Kane (2015) ainda comparam Momento de Inércia ( $I$ ) com Módulo de Elasticidade ( $E$ ). “O momento de inércia é uma medida da rigidez da seção transversal, ao passo que o módulo de elasticidade (...) é uma medida da rigidez do material.”

**Figura 23** - Perfil (seção) com distribuição de massa em relação ao eixo central.



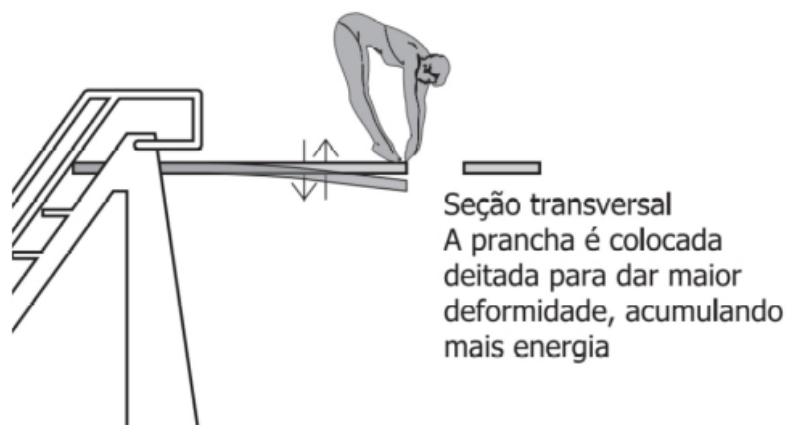
a) Maior distribuição

b) Menor distribuição

Fonte: Adaptado de Onouye e Kane (2015).

Botelho (2008) traz um novo conceito: energia (Figura 24). Nela, o autor enfatiza que mais energia é acumulada ao deformar mais o elemento.

**Figura 24:** Perfil (seção) na horizontal de prancha do saltador acumulando mais energia.

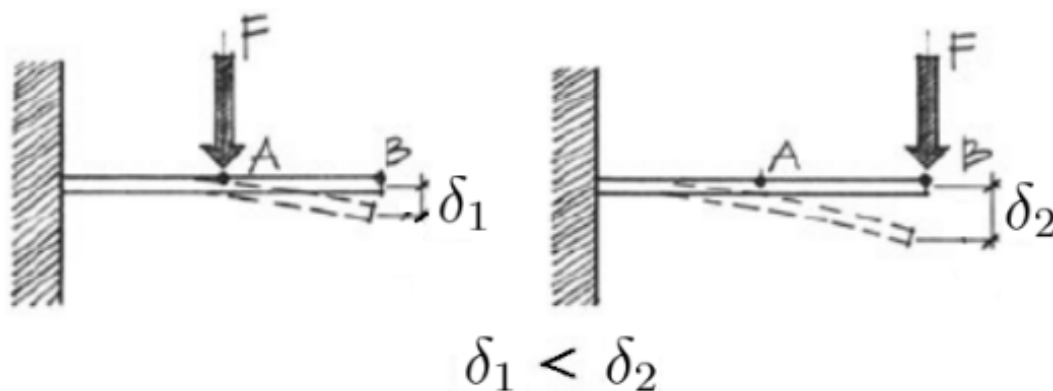


Fonte: Adaptado de Botelho (2008)

A Figura 25 ilustra uma barra submetida a duas diferentes posições de carga aplicada: em 25a, no seu centro; e 25b, na sua extremidade livre. Nitidamente o deslocamento e, logo, sua deformação é maior em 25b (na extremidade livre). A deformação é o deslocamento relativo às dimensões da estrutura

A Figura 26 mostra equações de cálculo de deslocamentos de viga engastada apresentada por Botelho (2008). Tanto para situações de carga aplicada da Fig. 26a quanto distribuída ao longo da viga 26b pode ser calculada por  $\delta_1$ . E quando a posição de cálculo estiver na extremidade livre, por  $\delta_2$ .

**Figura 25** - Viga com diferentes posições de carga aplicada.

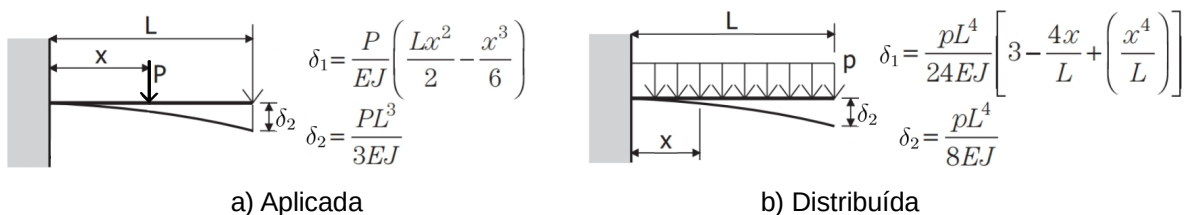


a) Centro

b) Extremidade livre

Fonte: Adaptado de Onouye e Kane (2015).

**Figura 26** - Cálculo de deslocamento de viga engastada com carga:



a) Aplicada

b) Distribuída

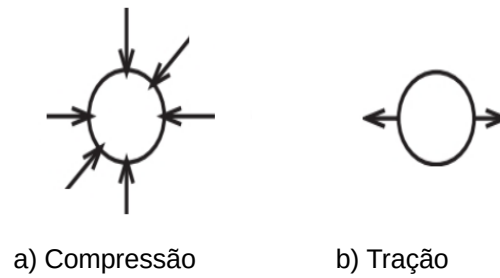
Fonte: Adaptado de Botelho (2008)

Outra consideração na análise de estruturas é verificar os limites de tensão e deformação da estrutura ao ser submetida a carregamentos. Como foi mencionado, se verifica as tensões até o limite de elasticidade – o momento de eminência de se tornar um produto deformado permanentemente. Então é preciso calcular as tensões dos materiais para realizar tal análise.

“Tensão é um termo usado para descrever a intensidade de uma força ... que age em uma ... área. Força, em design estrutural, tem pouco significado até ser conhecido algo a respeito do material resistente, as propriedades da seção transversal e o tamanho do elemento que resiste à força.” (ONOUYE e KANE, 2015). A Figura 27 ilustra como os materiais se comportam perante os casos de tensão aqui utilizados: na Fig. 27a ao se comprimir e Fig. 27b tracionar.

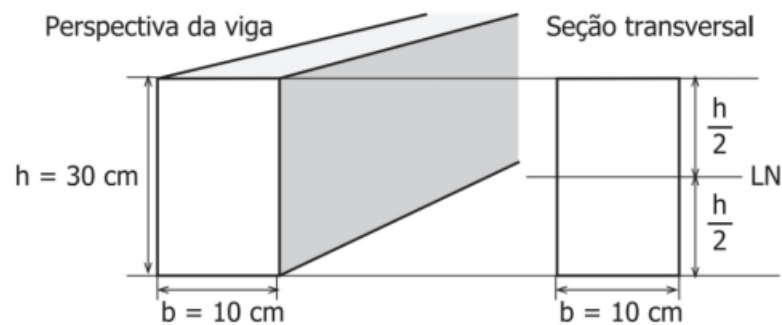
Na Figura 28, é apresentada por Botelho (2008) uma situação de Tensão de Flexão. Considere que a viga foi cortada e o corte (seção) possui suas dimensões geométricas (base e altura) conforme ilustração.

**Figura 27** - Tipos de Tensões.



Fonte: Adaptado de Botelho (2008)

**Figura 28** - Barra em corte para o Cálculo de Tensão de Flexão.



Fonte: Botelho (2008)

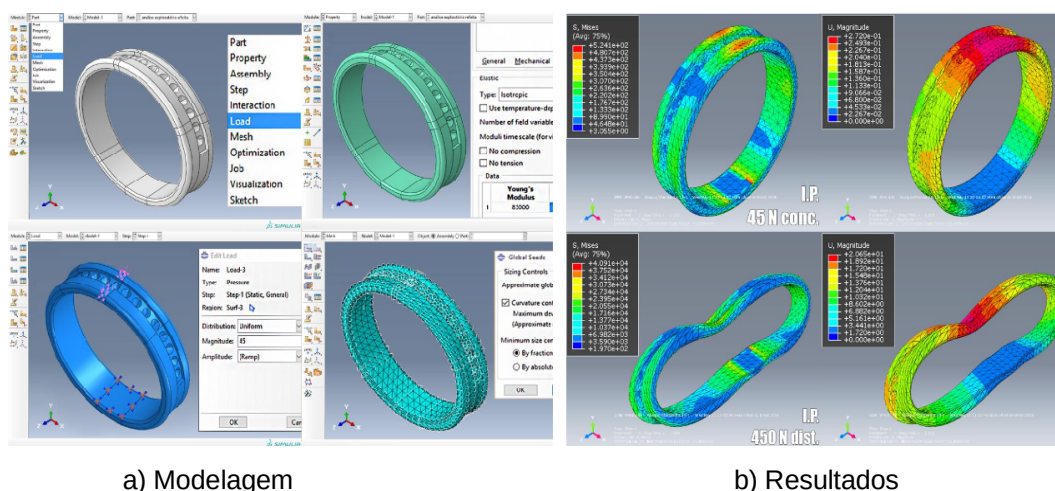
### 2.3.2 Aplicação: O software Abaqus

Uma forma de se simular aplicações, condições e verificar capacidades mecânicas de objetos é através de métodos computacionais, por meio de simulações numéricas. Um exemplo de *software* capaz de realizar tais simulações é o Abaqus, que utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF) para solução numérica do problema mecânico. Tais *softwares* podem ser utilizados para análises e cálculo de tensões, deslocamentos e energia aplicando cargas estáticas e dinâmicas, fadiga, impacto, entre outros.

Schwab (2016) utilizou a ferramenta em “Mecânica Das Jóias: Estudo Estrutural Aplicado À Concepção E Ao Desenvolvimento”. No estudo o autor o empregou para estudar “joalheria e as principais cravações utilizadas para o engaste das gemas”. Na Figura 29 é apresentada a modelagem do problema. Na Fig. 29a, seu modelo estrutural no *software* e na Fig. 29b, seus resultados de tensões e deslocamentos.



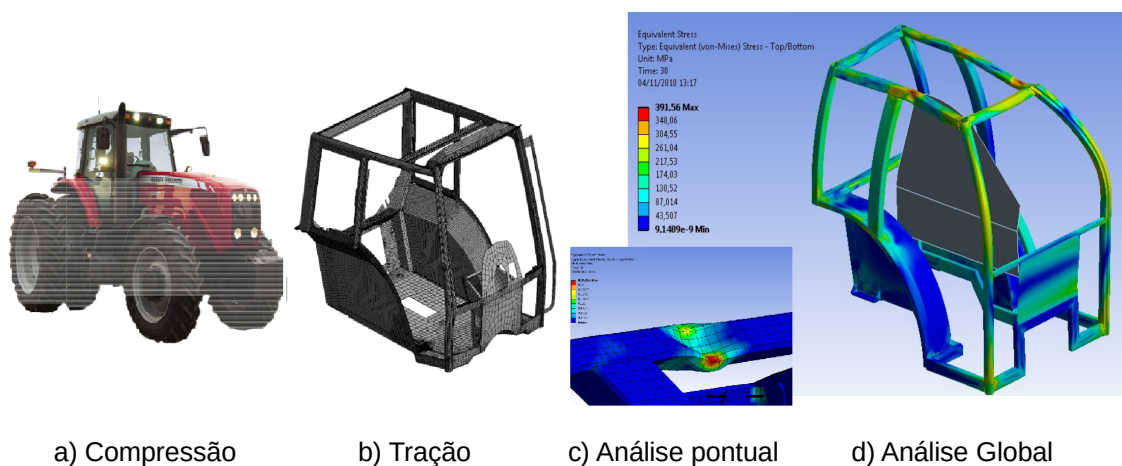
**Figura 29 - Aplicações do Abaqus à joalheria.**



Fonte: Adaptado de Schwab (2016)

Já Cesa (2010), analisou uma situação de uma cabine de máquina agrícola submetida ao capotamento. A Figura 30a ilustra a máquina, a Fig. 30b o modelo estrutural da cabine, a Fig. 30c uma análise pontual dos resultados e a Fig. 30d uma análise global dos mesmos.

**Figura 30 - Aplicações do Abaqus a uma máquina agrícola.**



Fonte: Adaptado de Cesa (2010)

### 2.3.3 Aplicação: O plugin Karamba3D do Rhinoceros

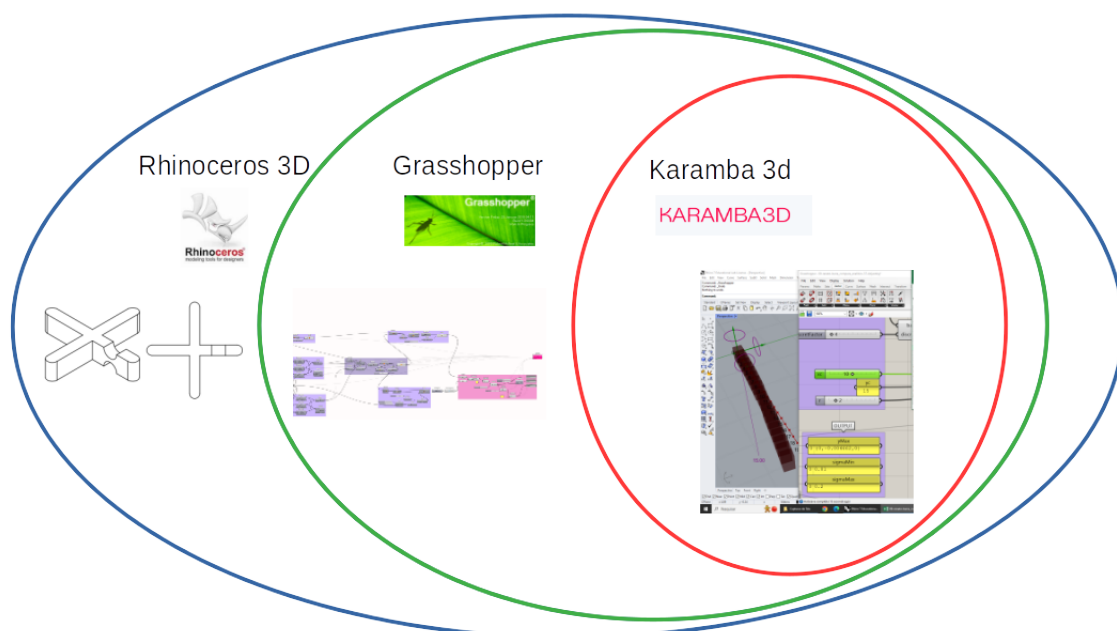
Como visto no item anterior (2.2) sobre Modelagem Geométrica, o Rhinoceros e seu principal plugin de parametrização (Grasshopper) auxiliam em tarefas



realizadas nos modelos por outros plugins não cobertos neste trabalho. Entretanto, é preciso também conhecer o funcionamento de um plugin essencial para a realização das análises estruturais deste trabalho: o Karamba 3d.

Inicialmente, é necessário entender a relação de cada ferramenta, frente às suas respectivas funcionalidades. A Figura 31 ilustra essa relação em forma de diagrama. O Rhinoceros é responsável pela simples modelagem dos objetos; o Grasshopper é o agente parametrizador que auxilia vários outros plugins e manipula os objetos; e, por último, o Karamba3d utiliza o ambiente do Grasshopper para realizar cálculos mecânicos.

**Figura 31** – Diagrama da relação Rhinoceros 3D, Grasshopper e Karamba3D.



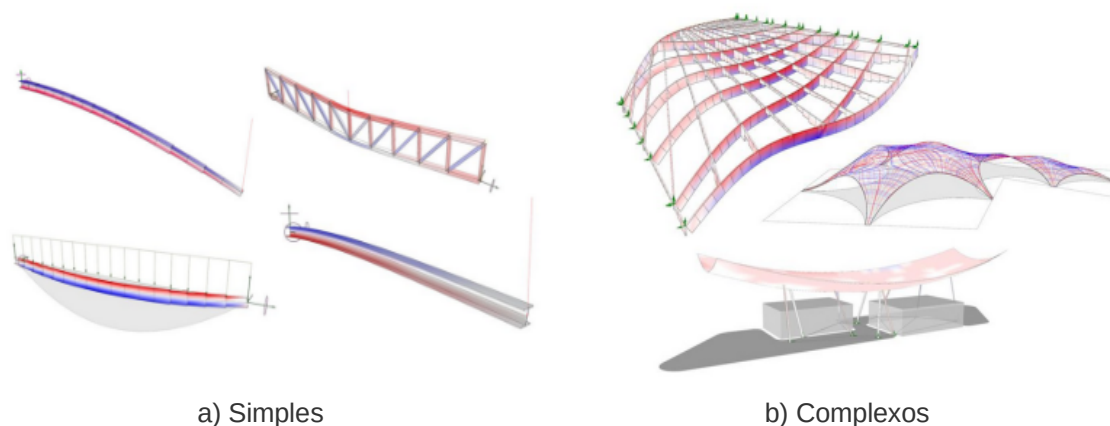
Fonte: Autor (2024)

Portanto, ainda considerando o diagrama da Figura 31, o Rhino promove, essencialmente, a criação dos objetos (desenhos 2d ou sólidos). Por outro lado, o Grasshopper fornece o ambiente de linguagem de programação visual. Tal ambiente é composto por componentes e conexões arame, as quais conectam esses componentes garantindo funcionalidades mais complexas. Por último, o Karamba3d é responsável por trazer componentes próprios, dentro do Grasshopper, os quais aumentam as funcionalidades desse ambiente. Nesse caso, as funcionalidades trazidas pelo Karamba3d são de análises mecânicas.

O plugin é uma ferramenta de engenharia paramétrica e interativa que permite realizar rápida e precisa análise de elementos finitos (ou seja, análises mecânicas) (KARAMBA, 2024).

Alguns de seus exemplos mais simples de aplicação podem ser vistos na Figura 32a. Na Fig. 32b, alguns mais complexos: de vigas e treliças engastadas à gridshells e cascas. Entretanto, não será abordado neste trabalho tais estruturas mais complexas. O presente estudo se limitou à contribuição de análises de uma viga simplesmente engastada, baseada na fundamentação vista no presente item sobre princípios mecânicos elementares das estruturas.

**Figura 32** - Exemplos do plugin Karamba3D.



Fonte: Adaptado de Karamba3d (2024)

Na documentação do manual do software, Preisinger (2013), há referências específicas de cada componente bem como diversos exemplos de fluxos de trabalho e alguma teoria das propriedades dos materiais.

Matos (2021) investigou o desempenho estrutural com padrões de malha de uma estrutura *gridshell* (casca discretizada em elementos lineares formando uma grelha).

Outro estudo, aqui apresentado, também utilizou o Karamba3D para simulação de comportamentos estruturais. “Visando minimizar os impactos ambientais gerados pela construção civil, há a necessidade de implementar-se – em larga escala – a utilização de materiais sustentáveis”. A autora, Ruggiero (2021), estudou o bambu laminado como alternativa de material aliado a um sistema construtivo de estrutura reticulada. A Figura 33 ilustra a aplicação do plugin na confecção do estudo da autora. Ainda que a mesma figura não mostre os detalhes

de cada etapa, ela contribui para o entendimento de como a ferramenta foi utilizada e sua interface gráfica.

**Figura 33** - Aplicação nacional: estudo de gridshells em estruturas reticuladas.

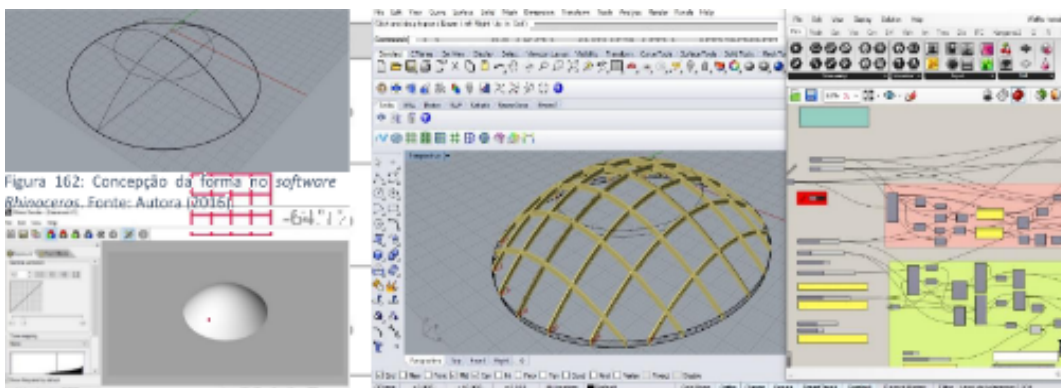


Figura 162: Concepção da forma no software

Rhinoceros. Fonte: Autora (2016).

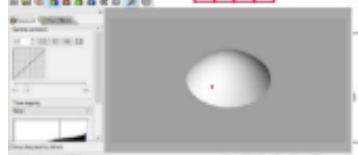
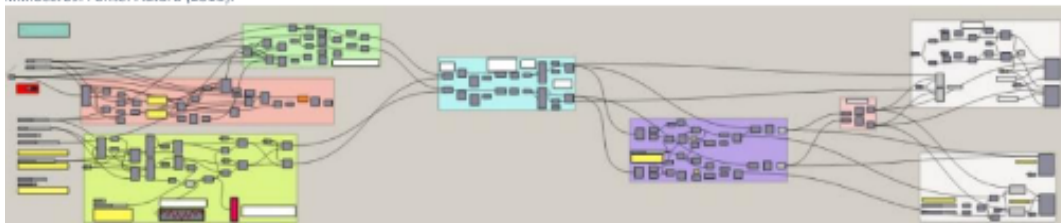


Figura 163: Concepção da forma no software

Rhinoceros. Fonte: Autora (2016).

Figura 164: Definição da malha reticulada no plug-in Grasshopper. Fonte: Autora (2016).



Fonte: Ruggiero (2021)

### 3. METODOLOGIA

Este capítulo explicará como foram as configurações e valores adotados para a elaboração das simulações estruturais do produto SAC contendo a estrição modelado no software Rhinoceros 3D e seus plugins Grasshopper e Karamba3d. Portanto, todas as explicações detalhadas dos procedimentos até a obtenção de resultados se encontra nos próximos itens e subitens deste capítulo.

Todas as imagens produzidas a partir daqui são de autoria do presente autor.

#### 3.1 Modelagem do produto

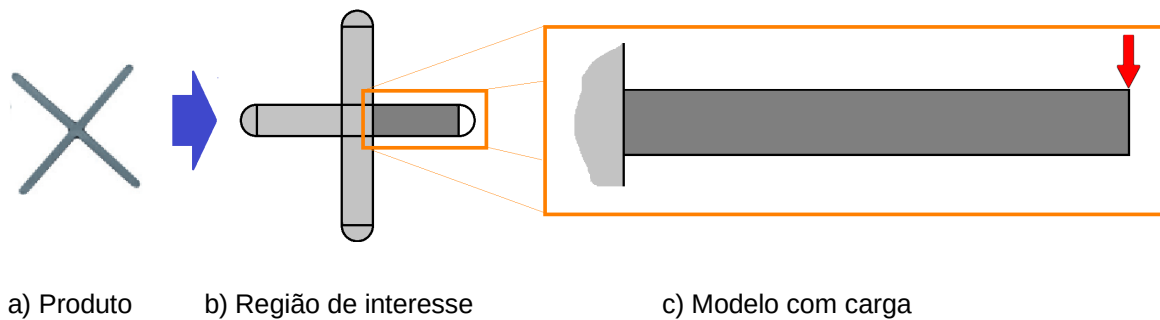
Inicialmente, foi necessário escolher uma região de interesse do produto para idealizá-lo como o modelo estrutural das simulações: o braço do produto. Em seguida, se estabeleceu os parâmetros da estrição para que fosse acoplada ao modelo:  $X_c$  (posição) e  $R$  (tamanho). Também foram convencionadas direções de atuação dessas estrições no braço do produto. Por último, valores para os parâmetros foram também convencionados de modo a permitir a simulação pelo software.

Nos subitens a seguir essas quatro fases preliminares à simulação, propriamente dita, são explicadas.

##### 3.1.1 Região de interesse do modelo estrutural

O modelo de simulação foi estabelecido e a Figura 34 ilustra como o produto foi analisado. Na Fig. 34a, o produto original é apresentado em vista de topo. Na Fig. 34b, é possível ver que a região de interesse para o modelo de cálculo é um dos braços do produto. Para efeitos do modelo, a ponta arredondada foi desconsiderada. E na Fig. 34c, é destacada a região de interesse e onde, no braço do produto, uma carga foi aplicada (na ponta do braço do produto).

**Figura 34** - Modelo de simulação do produto.



a) Produto

b) Região de interesse

c) Modelo com carga

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1.2 Parâmetros da estricção: $X_c$ e $R$

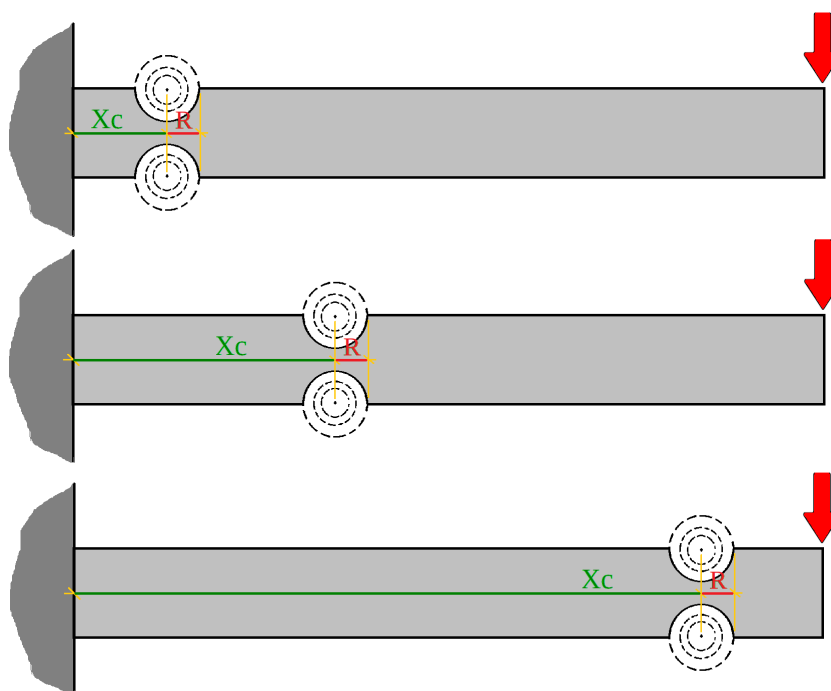
Para atender ao primeiro dos objetivos secundários propostos (posição e tamanho das estricções), as seguintes variáveis foram definidas:

1. Distâncias  $X_c$  do início do braço ao centro das estricções circulares no eixo  $x$ ;
2. Raio ( $R$ ) dessas estricções circulares.

Durante as simulações tanto a variação do raio quanto do  $x$  do centro (o ' $x_c$ ') das circunferências da estricção sofreram mudanças em módulo. Ou seja, tanto o tamanho quanto posição do centro da circunferência, com relação ao início da barra se alteraram durante as simulações. E isso foi, aqui denominado, progressão da estricção ao longo do braço do produto.

A Figura 35 ilustra como se realizou a progressão da estricção ao longo do comprimento do braço do SAC. Essa progressão, como mencionado, indica a circunferência percorrendo o braço do produto e aumentando de tamanho. A variação do comprimento  $X_c$  é indicada na cor verde. Ou seja, a distância horizontal em que a estricção circular se projeta na viga ou braço do produto. E em vermelho, na mesma figura, a variação de  $r$ , ou seja, do raio e, por consequência, tamanho da estricção. Na ponta do braço foi utilizada uma carga aplicada de teste de 30 N. Ela foi tomada como referência para as direções de simulação e sempre é ilustrada em vermelho para fins de melhor representação. É importante ressaltar que essa progressão, para a simulação do estudo, ocorreu em três situações de duas possíveis direções de atuação. Os próximos subitens mostram esses três casos.

**Figura 35** - Modelo da estrição circular ao longo do braço do SAC.

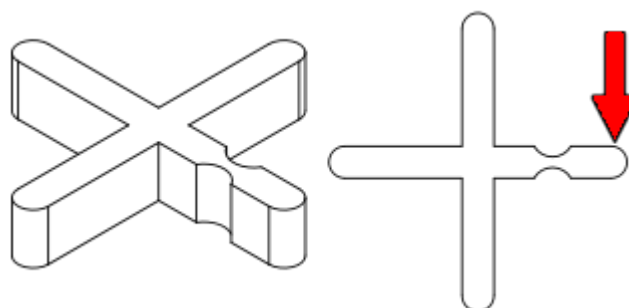


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1.3 Casos de direções das estrições

Três foram os casos de direções de análise das estrições para as simulações. A Figura 36 mostra o caso que considera a estrição inserida unicamente na direção da altura da barra constituída pelo braço do produto. Com relação a posição e direção da carga aplicada (em vermelho na mesma figura) a altura da seção da viga é reduzida, na região da estrição, tendo seu volume reduzido.

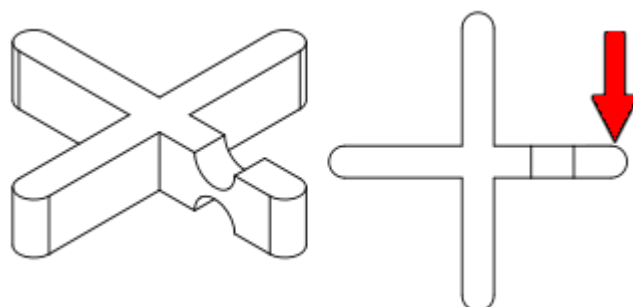
**Figura 36** - Caso da estrição na direção da altura



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 37 mostra o caso na direção da largura. Ou seja, com relação a mesma carga aplicada a largura da seção da viga é reduzida em volume.

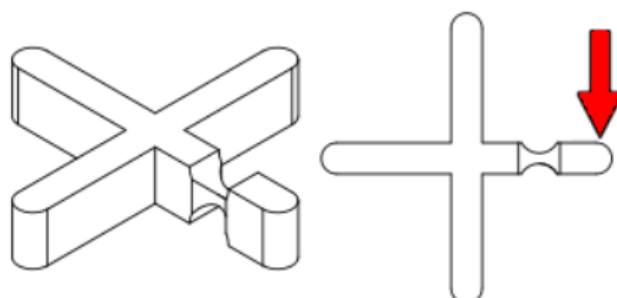
**Figura 37** - Caso da estricção na direção da largura



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por último, A Figura 38 mostra o caso em que a estricção ocorre numa combinação de direções da altura e da largura. Logo, com relação a mesma carga aplicada, tanto a altura quanto a largura são reduzidas em volume.

**Figura 38** - Caso da estricção na direção de ambas a altura e largura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, a partir dessa convenção, se procedeu às atribuições de valores das variáveis e às simulações propriamente ditas.

#### 3.1.4 Os valores dos parâmetros de entradas

Neste subitem será detalhado os valores dos parâmetros utilizados, mas toda a implementação da simulação no Rhino e seus plugins Grasshopper e Karamba3d somente constará no próximo item.

O Grasshopper foi utilizado como ferramenta para assegurar a parametrização, o que permitiu ajustes sensíveis nos resultados diante de qualquer modificação nas condições iniciais.

Das entradas, foram adotadas as seguintes variáveis:

1. Comprimento de 11 mm;
2. Largura de 5 mm;
3. Altura correspondente ao dobro da meia altura, onde estaria o centro da estrição. Como a meia altura foi de 1,5 mm, a altura do braço do SAC foi de 3,0 mm;
4. O número de seções (a discretização) da barra de 20 unidades;
5. Módulo de Elasticidade (E) de 130 kN/cm<sup>2</sup> (conversão de 1300 Mpa ou 1,3 Gpa), compatível com materiais de polipropileno;
6. Força aplicada (F) de 30 N na ponta do braço.

As entradas que sofreram variações foram:

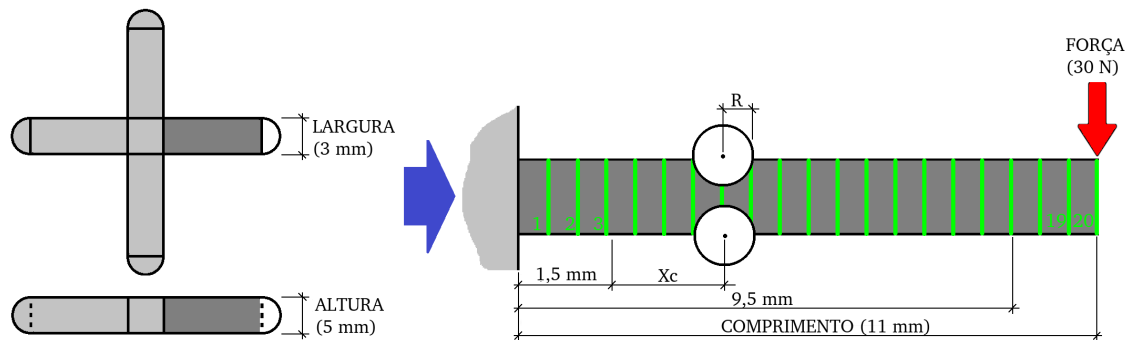
1. Posição em x da estrição em relação ao início da barra variando de 1,5 até 9,5 mm. Ou seja,  $x_c$  poderia variar entre 1,5 e 9,5 mm;
2. Raio das circunferências variando entre 0 (sem estrição) até 1,4 mm. Este valor de 1,4 mm seria um limite esbelecido, pois se o raio valesse 1,5 seria igual a meia altura e como são duas circunferências essa soma seria 3,0 mm o que desprenderia a ponta do braço do SAC.

A Figura 39 ilustra esses parâmetros. Nela é possível ver a largura de 3 mm, altura de 5 mm, comprimento de 11 mm, a força aplicada de 30 N na ponta e as 20 seções transversais igualmente espaçadas em verde na figura. Além disso, é possível identificar a região limite em que  $X_c$  pode progredir (entre 1,5 mm e 9,5 mm do comprimento). Por último, o raio da circunferência da estrição também é representado. E esse parâmetro, como mencionado, ficou limitado entre 0 mm (sem estrição) e 1,4 mm (0,1 mm a menos do que 1,5, o qual seria a metade da altura da viga).

Logo, ainda analisando a Figura 39, é possível perceber que a progressão em um dos braços do produto se deu da esquerda para a direita a um intervalo de aproximadamente 1,5 mm a 9,5 mm do braço do produto. Esse intervalo impediu que a estrição tocasse tanto o centro do produto todo quanto na força F aplicada.



**Figura 39** - Valores dos parâmetros básicos do modelo na viga.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2 Implementação da simulação com o Rhinoceros 3d

Após todas as definições dos parâmetros, se procedeu à implementação nas ferramentas de design mencionadas.

A Figura 40 mostra como os valores dos parâmetros de entrada foram inseridos no Grasshopper. As variáveis vistas nessa figura são:

- **barLength**: o comprimento da barra (o braço do produto desconsiderando a ponta arredondada), medido em mm. O valor utilizado foi de 11 mm.
- **discretiz**: a quantidade discretizada de seções ao longo da barra, sem unidade de medida. O valor utilizado foi de 20.
- **F**: a força aplicada na ponta da barra, medida em N. O valor utilizado foi de 30 N. O sinal negativo indica que a mesma é aplicada, na simulação, no sentido para baixo.
- **BarWidth**: a largura da barra, medida em mm. O valor utilizado foi de 5 mm.
- **Xc**: a posição da estrição ao longo do comprimento da barra. O valor utilizado variou entre 1,5 mm e 9,5 mm. Este foi um dos parâmetros avaliados pelos objetivos secundários.
- **Yc**: a posição em y da estrição com relação a altura do braço, medida em mm. O valor utilizado foi de 1,5 mm.
- **r**: o raio da estrição na barra. O valor utilizado variou entre 0 (sem raio e, por consequência, sem estrição) e 1,4 mm. O limite de 1,4 mm foi imposto e teve o propósito de evitar que o segmento de barra após a estrição fosse desacoplada da barra. Se adquirisse o valor de 1,5 mm isso ocorreria, afinal a estrição é composta de duas circunferências e estas, com raios de 1,5 mm,

somariam ambas 3,0 mm (a mesma altura convencional da barra). Este foi o outro dos parâmetros avaliados pelos objetivos secundários.

- barE: O módulo de elasticidade do material da barra: 130 kN/cm<sup>2</sup> para polipropileno.

**Figura 40** - Inputs no Grasshopper: geometria da barra.



Fonte: Elaborado pelo autor.

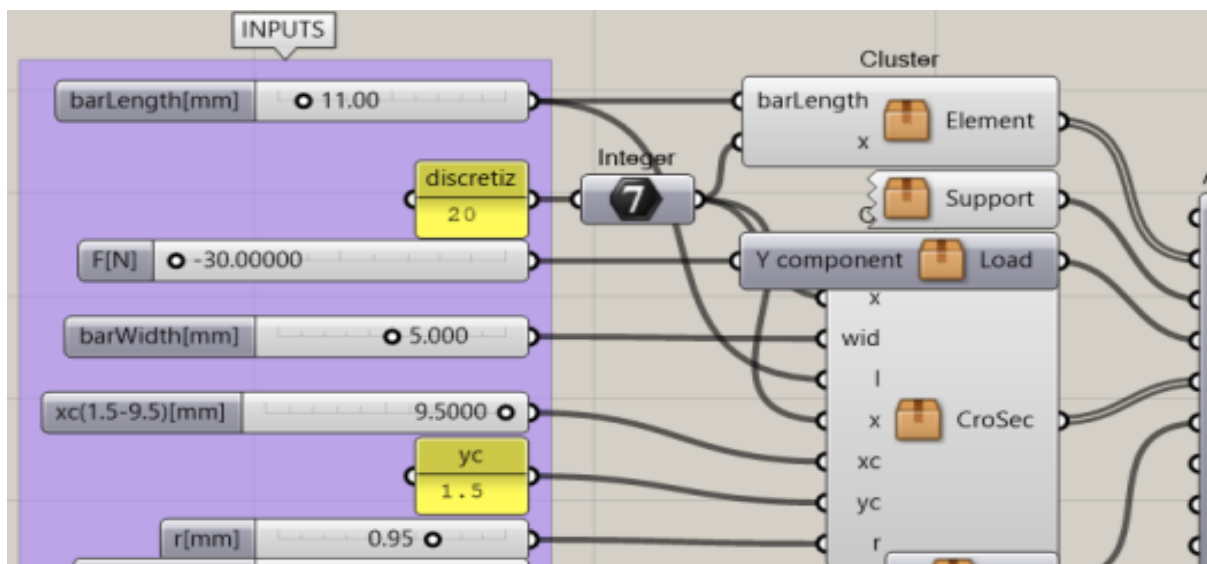
Em seguida, se procedeu ao pré-processamento (fase anterior aos cálculos mecânicos) no Karamba3D. Para a fase do processamento, alguns parâmetros importantes deveriam ser construídos para que essa fase pudesse fornecer os resultados das análises. Nesse sentido, anteriormente aos cálculos, foram construídos cinco parâmetros que o analisador do Karamba3d precisaria. Esses parâmetros de base, foram:

1. Geometria;
2. Condições de Suporte;
3. Carregamento;
4. Seção Transversal;
5. Material da barra.

Mais à direita, na Figura 41, ilustra-se a colocação e conexão desses componentes no plugin com os parâmetros de entrada iniciais. Cada um deles

guarda internamente mais componentes, o que torna o espaço de trabalho, como visto na figura, mais enxuto e de fácil visualização e manipulação.

**Figura 41** - Entradas e componentes dos parâmetros de base para o plugin Karamba3D.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os parágrafos seguintes explicam, de modo preliminar, os componentes novos mencionados anteriormente e vistos da Figura 41.

O componente cuja saída retornou 'Element' forneceu os elementos para a fase de montagem e, posteriormente, processamento. Foram 20 barras lineares conectadas da posição de início (0) até o comprimento final da barra idealizada no estudo (contendo 11 mm). Essas 20 barras foram, aqui, consideradas barras internas, caracterizadas como secções da barra global. Portanto, o componente necessitou dos valores das entradas de comprimento e quantidade de secções para a discretização (variáveis 'barLength' e 'discretiz', respectivamente).

O componente cuja saída retornou 'Support' forneceu as condições de restrições de movimentação (translação e rotação) dos pontos de início e fim da barra global. Sua função foi tornar a barra engastada. Esse componente não admitiu entradas, pois elas foram definidas no interior do componente e serão abordadas nos subitens mais adiante.

O componente cuja saída retornou 'Load' forneceu as condições de carregamento. Ele foi responsável por aplicar a carga de 30 N na ponta da barra. Por isso, o componente recebeu a entrada 'F' de -30 N.

O componente cuja saída retornou 'CroSec' forneceu as condições da seção transversal da barra. Ele foi responsável por criar a variação nas dimensões transversais das barras internas, perfis diferentes em tamanhos. Ou seja, foi nesse item que houve a construção da estriçção. Por isso, o componente precisou de todos os parâmetros de entrada à exceção da força aplicada e do Módulo de Elasticidade da barra. Foram eles:

1. O comprimento da barra 'barLength', cumprindo a função de limitar a posição da estriçção;
2. A quantidade de seções de discretização 'discretiz', permitindo a variação das dimensões da barra dependente de cada uma das 20 seções;
3. A largura da barra 'barWidth', necessária para se calcular a Inércia e variar o tamanho da estriçção no caso da estriçção na direção da largura;
4. A posição da estriçção ao longo do comprimento da barra 'xc', respeitando os limites estabelecidos anteriormente;
5. A meia altura máxima que a barra poderia assumir 'yc', visto que o dobro dessa meia altura resultaria na própria altura da barra;
6. E o raio 'r' da estriçção, garantindo a variação do tamanho da mesma dentro dos limites estabelecidos anteriormente.

E, por último, o componente cuja saída retornou 'Mat' forneceu as condições de elasticidade ao material da barra. O componente recebeu a entrada 'barE' de 130 kN/cm<sup>2</sup>.

Após essa fase, todos os parâmetros desses componentes compostos foram atribuídos aos componentes das próximas fases da simulação com o Karamba3D:

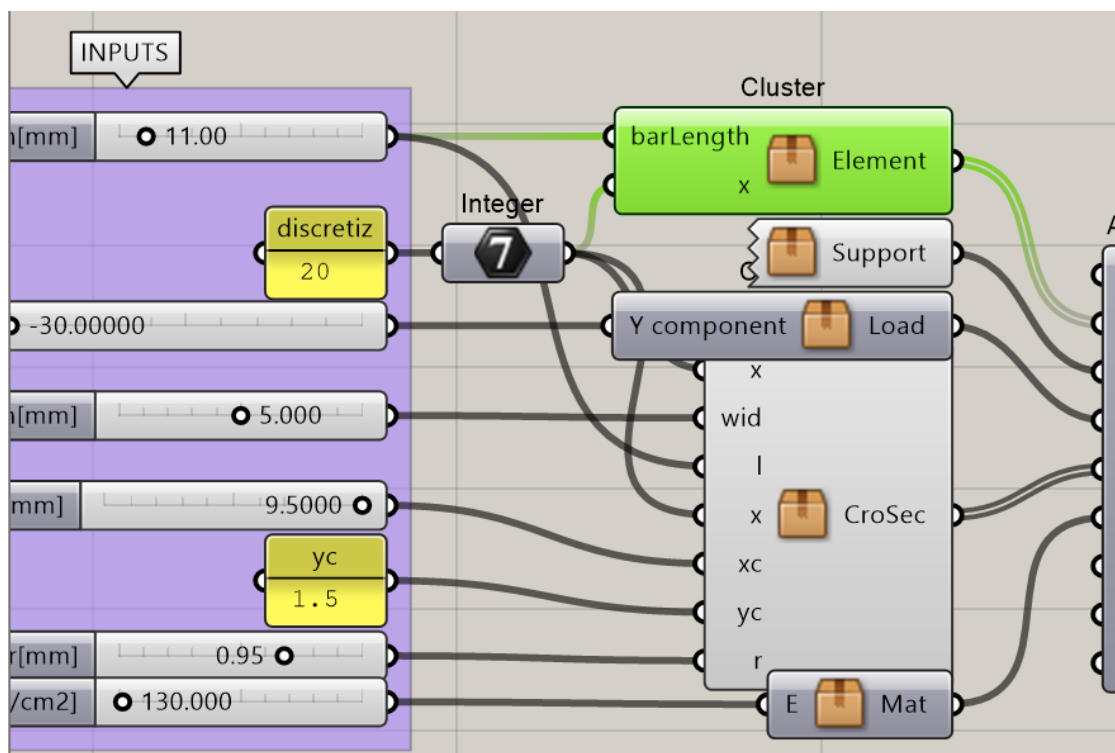
1. O componente de montagem 'Assemble Model', o qual reuniu todas as informações e construiu o modelo estrutural compreensível ao Karamba3D para as simulações;
2. O componente que retornou 'Solution' com a solução de processamento da simulação;
3. E o componente 'Beam Displacements' que retornou o resultado escolhido para a análise da simulação estrutural deste estudo.

Os seis subitens a seguir explicarão com mais detalhes como essas novas fases da simulação procederam. Ou seja, neles se verá os detalhes do interior de cada um dos cinco componentes compostos e das etapas de montagem e simulação.

### 3.2.1 Elementos

Primeiramente, se começou confeccionando a barra pelo *cluster* (aglomerado/grupo) Geometria (componente em verde da Figura 42), baseado no comprimento da barra de 11 mm e número de seções de 20. Contudo a barra foi segmentada, com o intuito de gerar segmentos com valores diferentes de geometria (altura, largura ou ambas essas dimensões). Nesse sentido, pontos de início e fim foram gerados ao longo de seu comprimento. E cada um dos segmentos foram gerados e conectados a partir desses pontos. Para as 20 seções geométricas diferentes necessárias, 21 pontos internos foram coletados e o segmento subdividido em 20 novos pequenos segmentos. Em seguida, o Karamba3D promoveu esses segmentos a elementos de barra, os quais são constituintes nativos do plugin e necessários para rodar a simulação.

Figura 42 - O componente de base Geometria em verde.



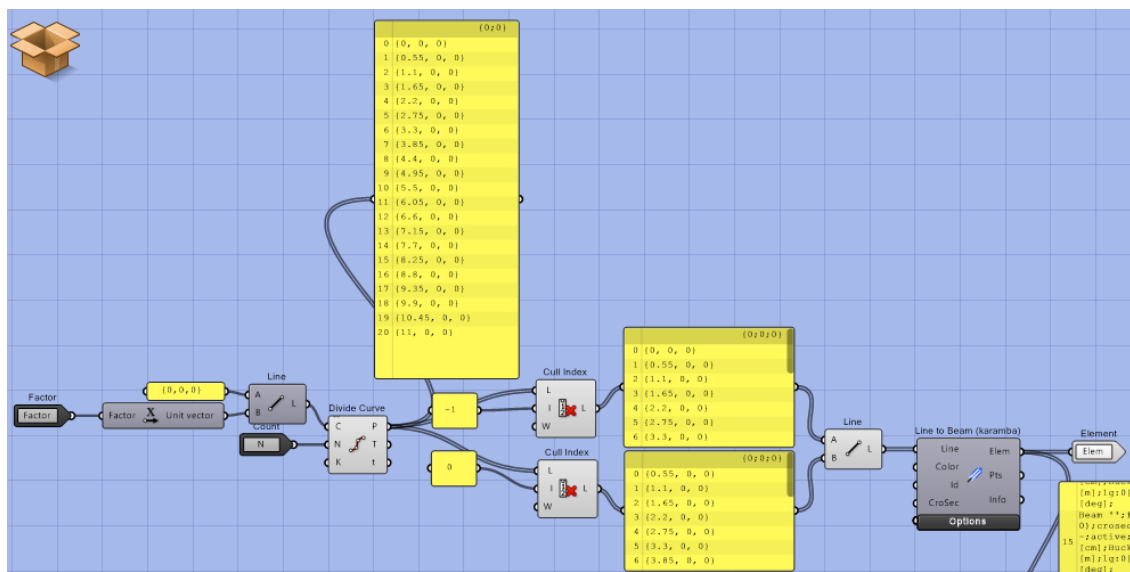
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 43 ilustra de forma global (macroscópica) o interior do componente responsável pela confecção da geometria da barra. Ou seja, acessando-se o interior

do componente, que aparece em verde na Figura 42, chega-se ao canva (espaço de trabalho) visto na Figura 43.

Os próximos parágrafos analisam em etapas, notando-se os detalhes do interior desse componente.

**Figura 43** - O interior do componente Geometria.



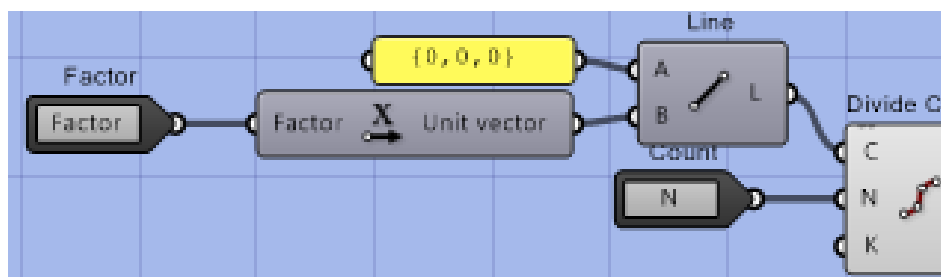
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 44 ilustra que o parâmetro de entrada 'Factor' é o equivalente, nesse espaço de trabalho interno desse componente composto, à sua entrada externa (visto na Figura 42) 'barLength' de valor 11. 'Factor' foi entrado em um componente gerador de vetor de direção em x, resultando no vetor (11,0,0) (ou, ainda, {11,0,0}). Aliado ao ponto (0,0,0), ambos são entradas a um componente gerador de uma geometria: a linha. Portanto, se obteve uma linha de coordenada de início (0,0,0) e fim (11,0,0). Um outro parâmetro interno de entrada 'N' é o equivalente ao externo 'x', provindo do número de discretização 'discretiz' de valor 20. Juntos, a linha e o 'N', são a entrada de um componente segmentador de curvas, o qual quebra a linha em 20 linhas e, atribuído a elas, 21 pontos no total.

Na Figura 45: as coordenadas de cada um dos 21 pontos (com índice de 0 a 20), são vistas no painel localizado no canto superior esquerdo da mesma figura. Essas coordenadas têm em comum serem todas distribuídas ao longo de x e terem valores em x como frações de 11. Em seguida, as coordenadas de início e fim de cada um dos 20 segmentos são separadas por dois componentes 'Cull Index'. No

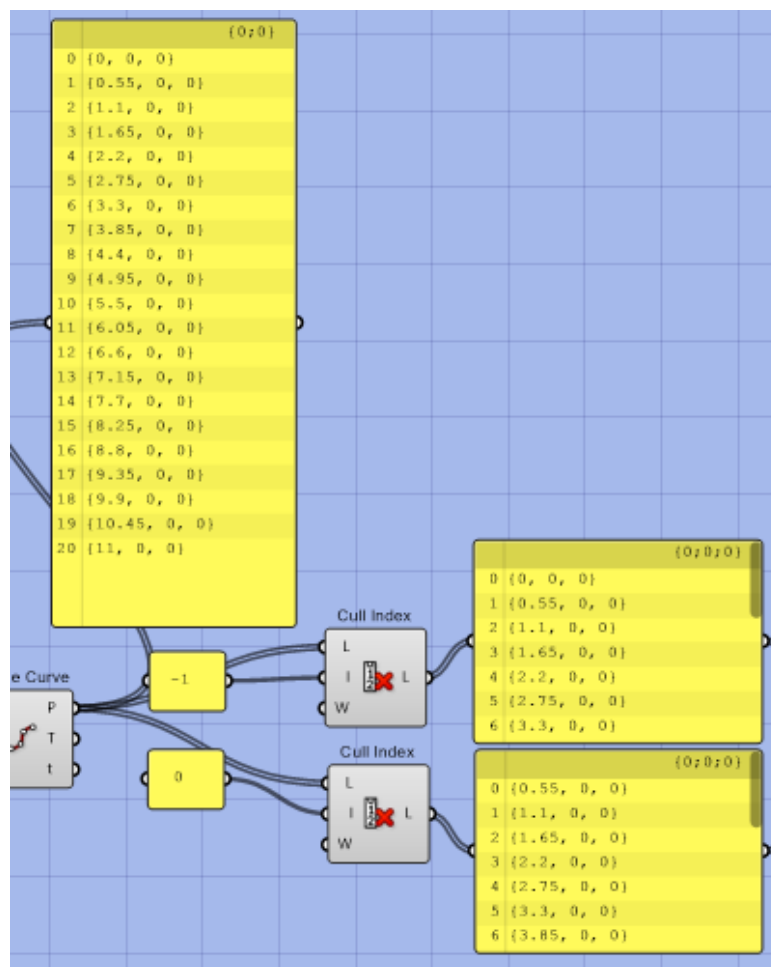
canto inferior direito da mesma figura é possível ver que para cada índice de geometria há coordenadas de início e fim, separadas em dois painéis distintos. Por exemplo, o segmento de índice 0 possui, em um painel, coordenada (0,0,0) enquanto em outro (0.55, 0, 0). Esses valores, como mencionado, estão em mm.

**Figura 44** - O interior do componente Geometria (primeira parte).



Fonte: Elaborado pelo autor.

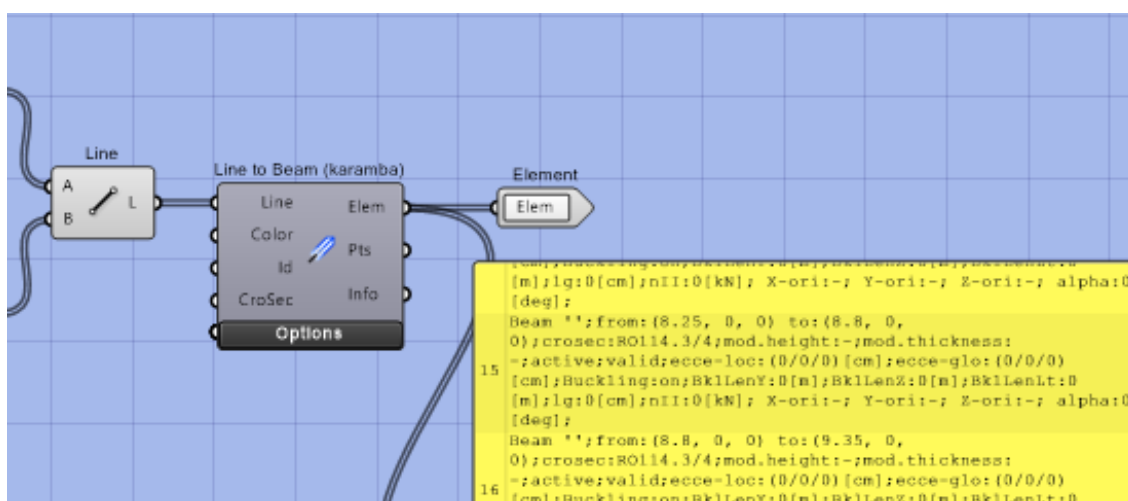
**Figura 45** - O interior do componente Geometria (segunda parte).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por último, na Figura 46: essas duas séries de coordenadas servem de entradas para a geração de linhas independentes e são entradas para o componente gerador de viga 'Line to Beam' do Karamba3d. O componente composto, cuja saída retorna 'Elem' forneceu as geometrias (barras) que, ao sair desse componente, é equivalente a saída 'Element' mencionada. Nota-se, no painel do canto inferior direito da mesma figura, a forma característica como o Karamba3d entende suas geometrias e, desse modo, pode realizar as simulações.

**Figura 46** - O interior do componente Geometria (última parte).



Fonte: Elaborado pelo autor.

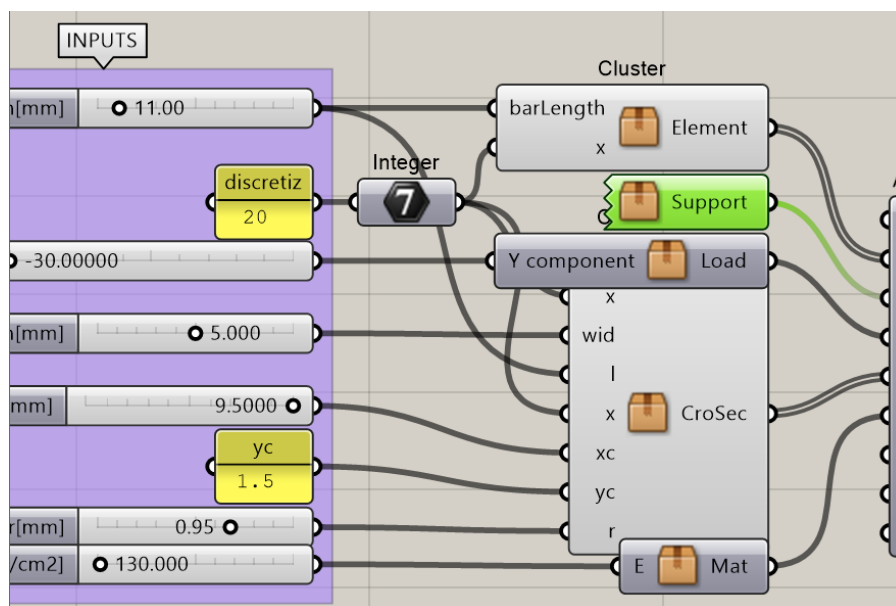
Os próximos subitens das próximas fases tiveram o mesmo tipo de padrão de elaboração desse componente e serão explicados da mesma forma como foi, nesse subitem, explicado: abordando a equivalência de suas entradas e saídas de parâmetros nos seus ambientes externos e internos.

### 3.2.2 Condições de suporte

Em um segundo momento, se procedeu às condições de suporte (componente em verde da Figura 47). No interior do *cluster* (Figura 48) é possível visualizar que, no componente 'Support' do Karamba3d, a restrição de movimento na posição esquerda da barra (entrada de valor 0 conectada ao 'Pos|Ind') está sendo aplicada para todas as direções da mesma barra. Ou seja, para todos os casos de direção da estrição a barra sempre estaria presa no início e livre na ponta.

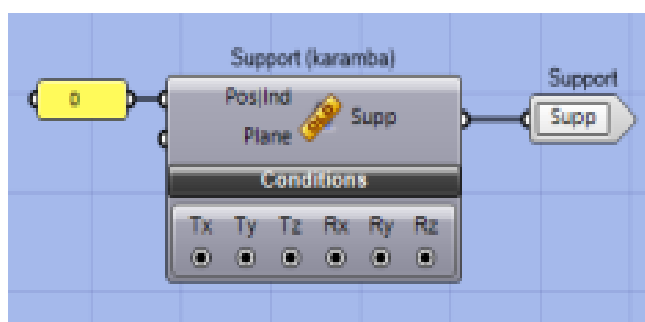


**Figura 47** - O componente de base Condições de Suporte.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 48** - O interior do componente Condições de Suporte.



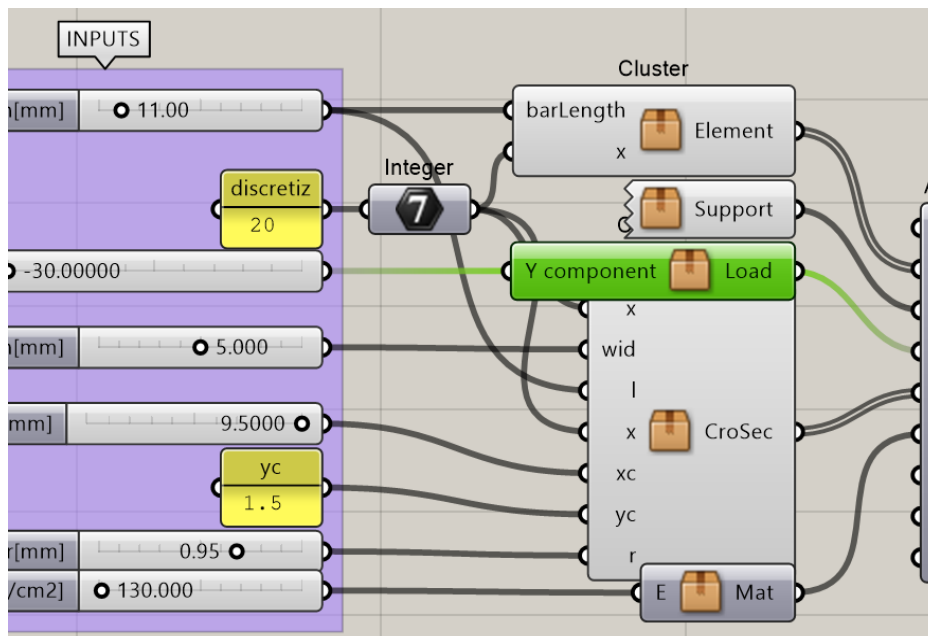
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.3 Carregamento

Em um terceiro momento, o *cluster* de Carregamento foi gerado (Figura 49). Na Figura 50, será explicado que o valor de -30 N é aplicado por um componente que gera o vetor da força na posição de fim da barra global (em sua última seção: de índice 20).

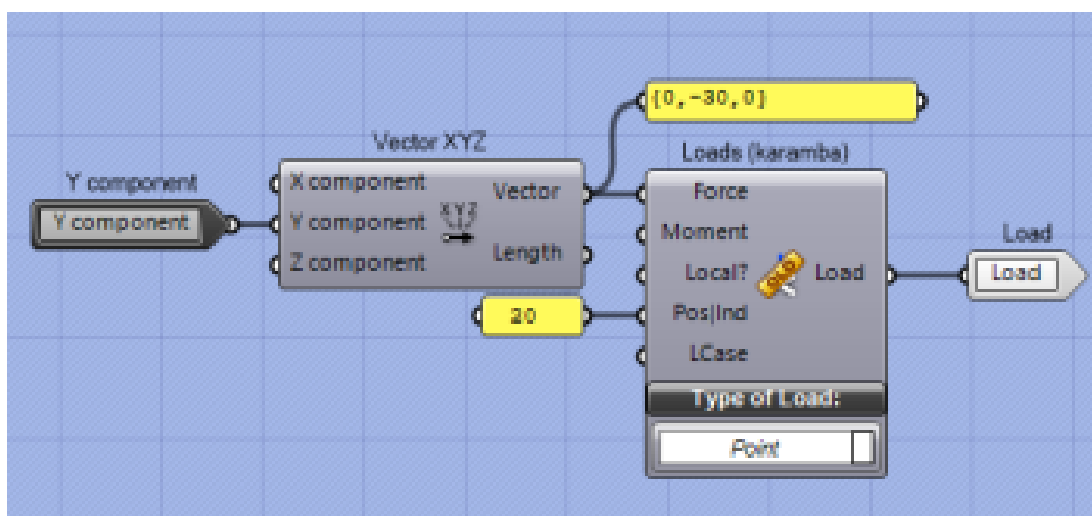
Nesse ambiente interno ao componente composto, ainda na Figura 50, o componente 'Vector XYZ' do Grasshopper gera o vetor (0, -30, 0) e esse é aplicado ao componente 'Loads' do Karamba3d pela entrada 'Force'.

Figura 49 - O componente de base Carregamento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 50 - O interior do componente Carregamento.



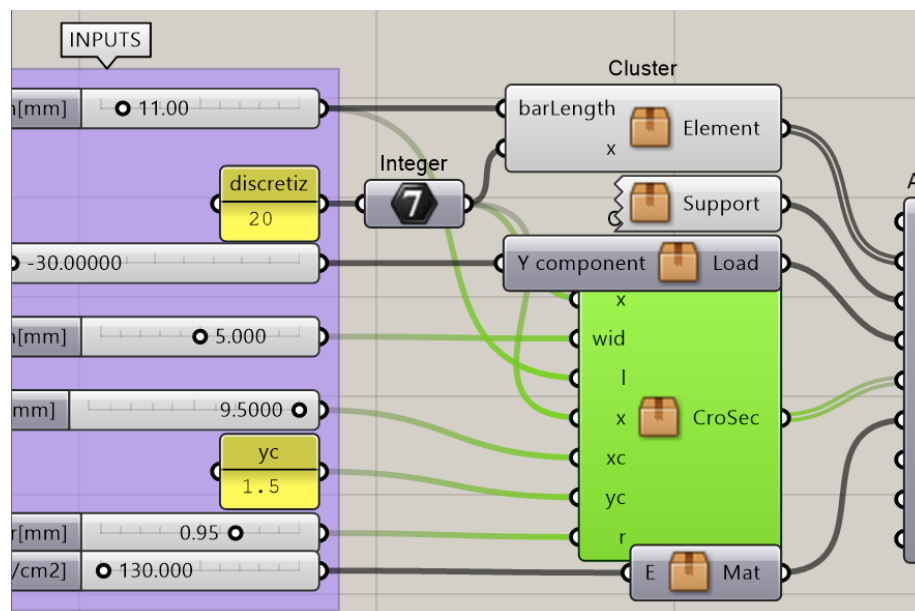
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.4 Seção Transversal

O quarto *cluster*, a Seção Transversal (Figura 51) é onde define-se a manipulação geométrica da estricção no produto. A concepção da estricção dependeria da viabilidade em ser reproduzida a estricção de tal maneira que pudesse se deslocar ao longo do comprimento de toda a barra. Além disso, deveria

conter a lógica de variação da altura (e/ou largura) das bordas de análise na região da estricção.

**Figura 51** - O componente de base Seção Transversal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

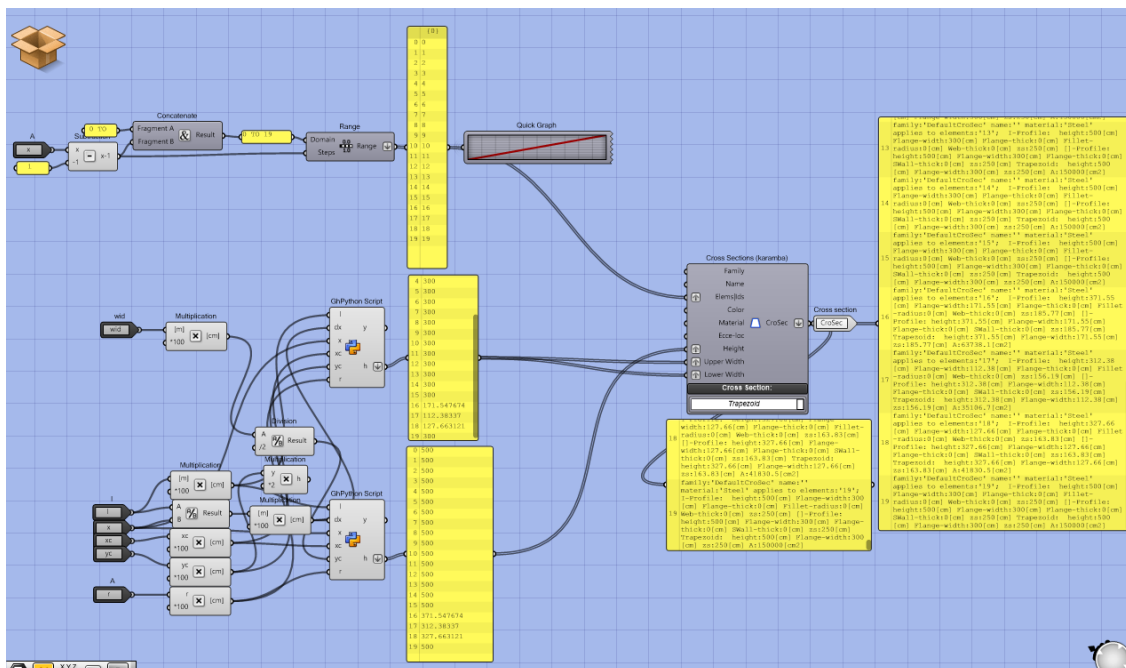
A Figura 52 ilustra o interior desse componente composto. O canvas do Grasshopper é apresentado, de forma global, apenas para ser observado a presença dos componentes e, também, para que as conexões sejam entendidas de maneira preliminar.

Essencialmente, os painéis mais ao centro, ainda da Figura 52, apenas preveem a necessidade de elaboração de três sequências numéricas:

1. Uma série de 20 elementos, de 0 a 19, que denotaram os índices dos segmentos da barra;
2. Uma segunda série contendo os valores das alturas da barra, sendo, no caso desse estudo, de 3 mm;
3. E uma terceira série contendo os valores das larguras da barra, sendo, no caso desse estudo, de 5 mm.

Os próximos parágrafos analisam em etapas, notando-se os detalhes do interior desse componente.

Figura 52 - O interior do componente Seção Transversal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 53 é apresentado como foi construída a primeira série, considerando que a mesma figura possui zonas de ampliação (em verde e laranja) para melhor visualização dos componentes. O parâmetro de entrada 'x' é o equivalente, nesse espaço de trabalho interno desse componente composto, à sua entrada externa 'discretiz' (visto na Figura 51) de valor 20. 'x', portanto, foi entrado em um componente de subtração do Grasshopper assumindo o valor de 19 e, em conjunto com um componente de texto 'O TO ', ambos foram entrados em outro componente de texto 'Concatenate' juntando o texto para o valor '0 TO 19'. Esse texto, entrado como 'Domain', e junto com o valor de 19 da subtração, entrado como 'Steps', foram as entradas no componente 'Range' do Grasshopper. O resultado foi uma lista de 20 valores de 0 a 19 visto no painel ainda da mesma figura.

Na Figura 54, é possível ver mais parâmetros entrados no interior desse componente. São eles:

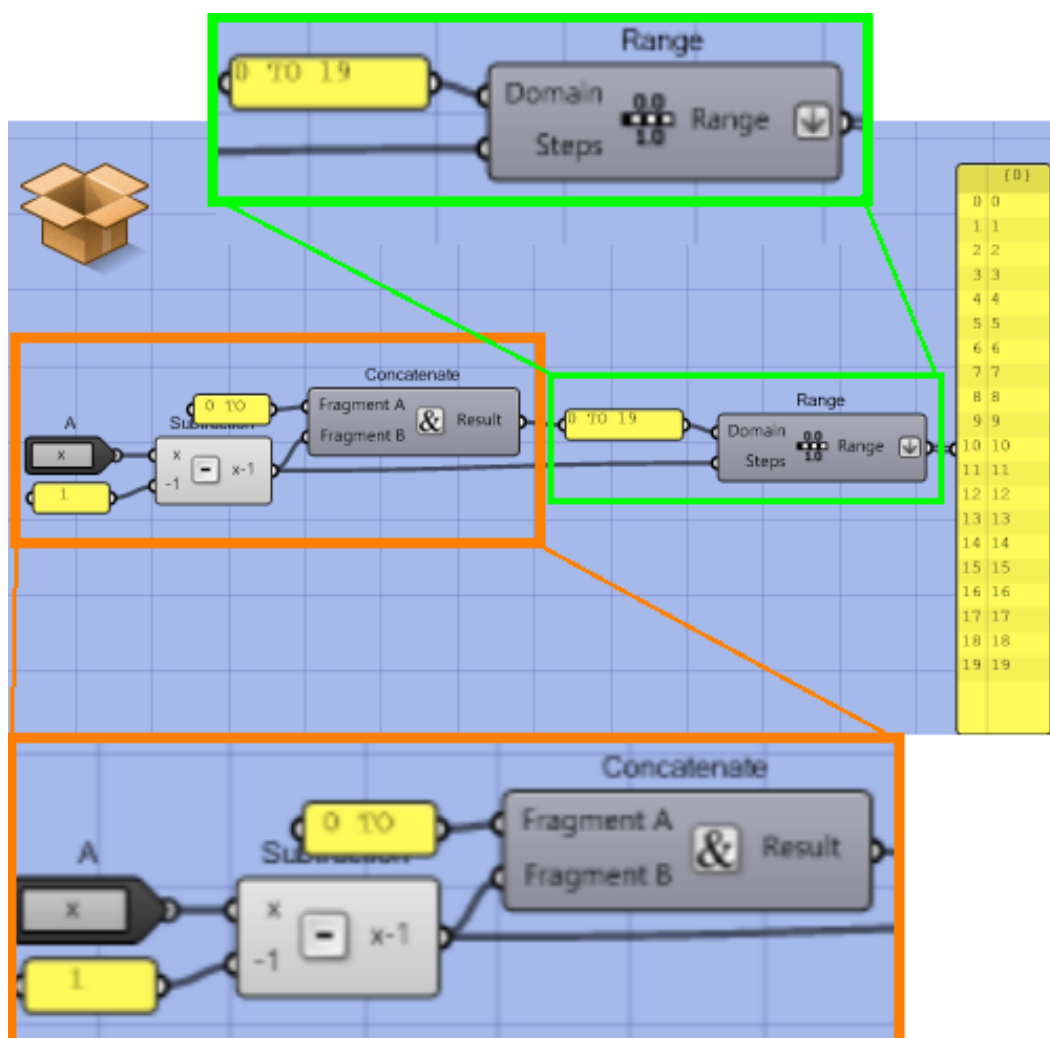
1. O parâmetro de entrada 'wid' é o equivalente, nesse espaço de trabalho interno desse componente composto, à sua entrada externa também 'wid' que se conecta em 'barWidth' de valor 5. Como mencionado, esse parâmetro denota a largura da barra.

2. O parâmetro de entrada 'l' é o equivalente, nesse espaço de trabalho interno desse componente composto, à sua entrada externa também 'l' que se conecta em 'barLength' de valor 11. Como mencionado, esse parâmetro denota o comprimento da barra.

E o mesmo se segue para os demais parâmetros:

3. 'x', o qual se conecta com 'discretiz' de valor 20;
4. 'xc', o qual se conecta com 'xc' de valor variável entre 1,5 mm e 9,5 mm;
5. 'yc', o qual se conecta com 'yc' de valor 1,5 mm;
6. E 'r', o qual se conecta com 'r' também de valor variável entre 0 e 1,4 mm.

Figura 53 - O interior do componente Seção Transversal (primeira parte).

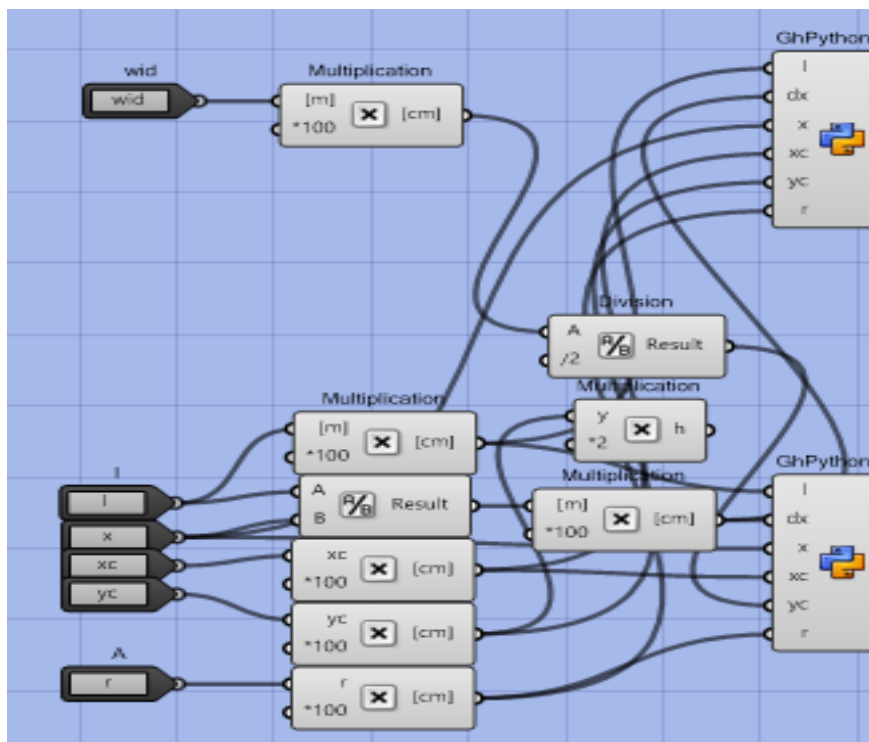


Fonte: Elaborado pelo autor.

Todos esses parâmetros internos foram entrados em componentes 'Multiplication' e 'Division'. Isso foi necessário para que fossem multiplicados ou

divididos, assumindo valores adequados para serem calculadas nos componentes posteriores. Esses multiplicadores e divisores são vistos ao centro ainda na Figura 54.

**Figura 54** - O interior do componente Seção Transversal (segunda parte).



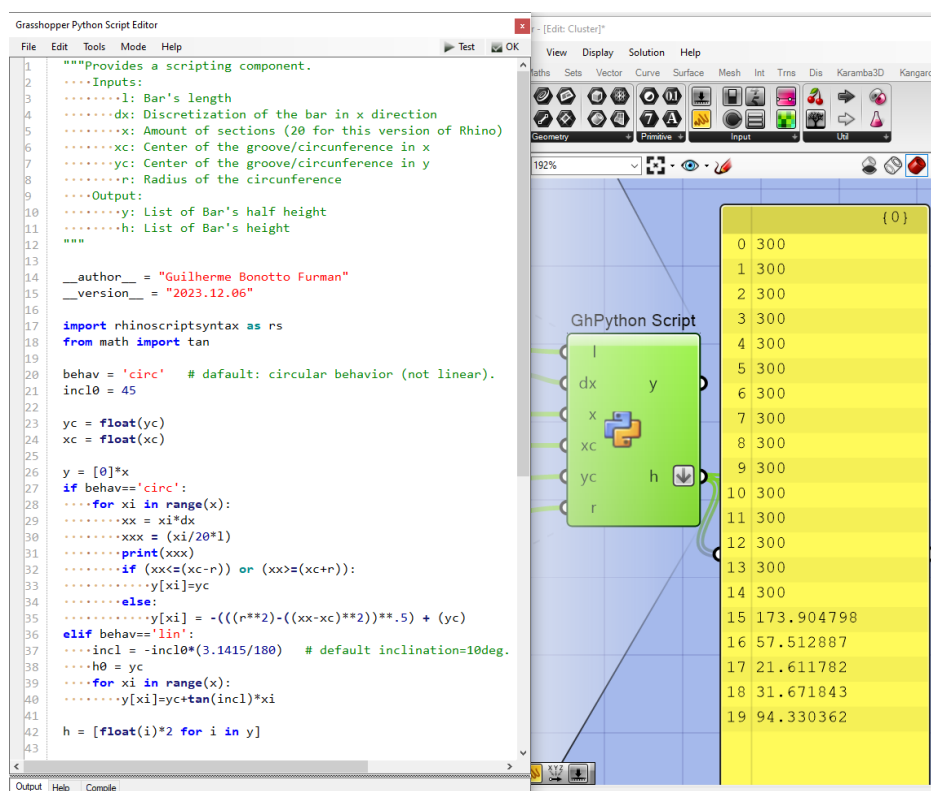
Fonte: Elaborado pelo autor.

Essas entradas serviram de base para um componente especial que realizou a mudança de seções transversais em algumas barras da viga. Ele reproduziu as circunferências que seriam a estrição. Seu nome é 'GhPython Script'. Com ele foi possível criar um algoritmo na linguagem Python, o qual possuiu a lógica matemática de geração das alturas correspondentes aos elementos específicos que iriam ser testados.

A Figura 55 mostra como o componente se apresenta no Grasshopper. Nela é possível notar o algoritmo à esquerda, o componente e um painel com resultados. O algoritmo contempla uma condição de teste de posições em  $x$  em que a altura da barra é quase sempre constante (linhas de código 32 e 33, vistas na mesma figura). Na região da estrição os testes condicionais, vistos nas linhas de código 34 e 35, impõem uma altura variável ao longo do comprimento do produto, assumindo valores de padrão de circunferências. E à direita estão os resultados produzidos:

percebe-se que até uma posição específica o valor da altura é constante, mas estando Xc dentro da região da estrição (mais próximo do fim do painel amarelo e, por consequência, do fim da barra) a altura varia segundo uma circunferência. Além disso, no cabeçalho do algoritmo se encontram as entradas/variáveis e suas definições para o espaço de trabalho do mesmo. E, ao final, na linha 42 ele traz a variável de saída: as alturas discretizadas da viga. Esses valores aparecem no painel.

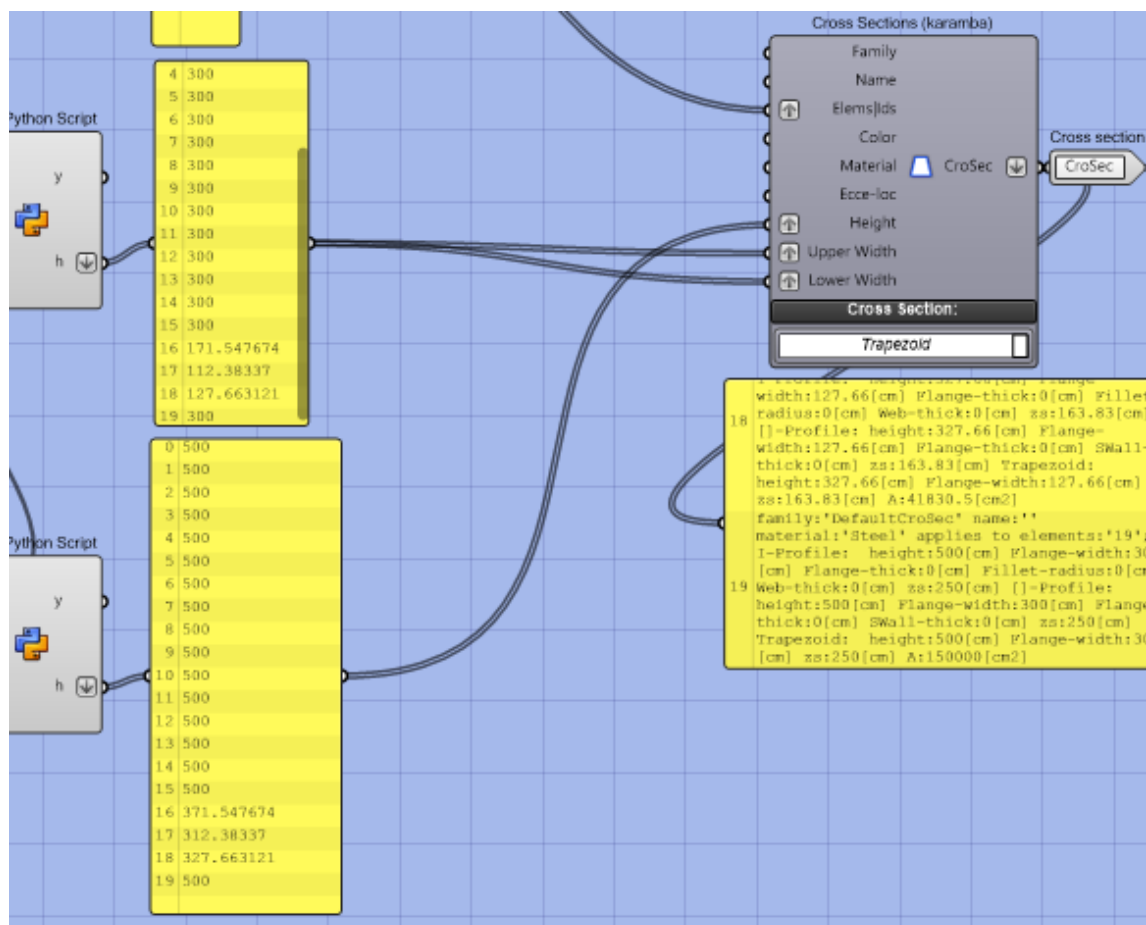
**Figura 55** - O interior do componente Seção Transversal (terceira parte): a) ênfase em algoritmo, vista e painel de resultados e b) ênfase em algoritmo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 56 ilustra o resultado das listas de valores de seções transversais variáveis geradas. As listas são vistas no canto esquerdo da mesma figura e são conectadas às entradas de um componente do Karamba3d chamado 'Cross Sections', visto no canto superior direito da mesma figura. Também é possível notar, no painel do canto inferior direito da mesma figura, o padrão de dados relativos às seções transversais que serão aceitos nas próximas fases (de análise e processamento do modelo) pelo Karamba3d.

Figura 56 - O interior do componente Seção Transversal (última parte).



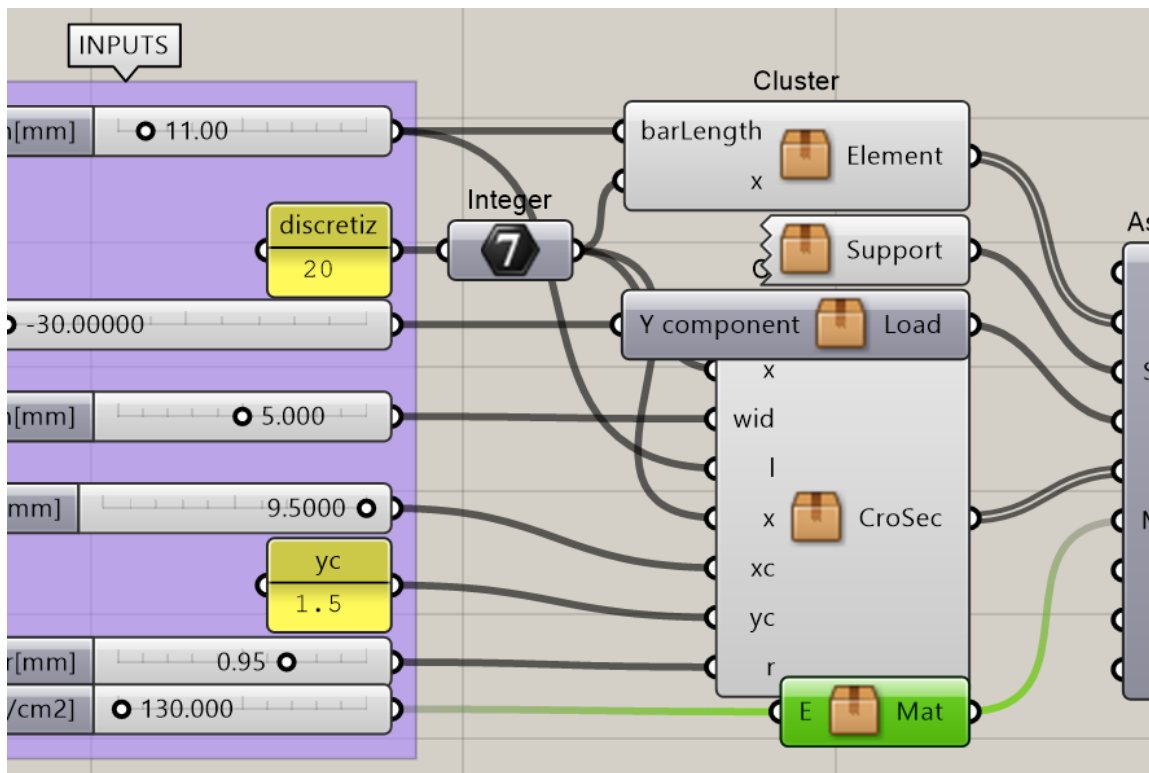
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.5 Material

O quinto, e último, *cluster* promovido foi o Material da barra (Figura 57). Ele recebeu o valor de 130 kN/cm<sup>2</sup> de Módulo de Elasticidade, característico de um polipropileno. Na Figura 58, no interior do componente, nota-se que o mesmo valor de elasticidade foi passado a um componente multiplicador que multiplicou o valor por 0,4 e atribuiu a entrada do módulo de elasticidade transversal da geometria 'G12'. E o valor de 0,01 foi atribuído ao 'gamma'. Esses últimos parâmetros foram inseridos apenas para servirem como sugestão de evitar erros de falta de parâmetros pelo próprio Karamaba3d e, ao final, obteve-se dados do material da barra.

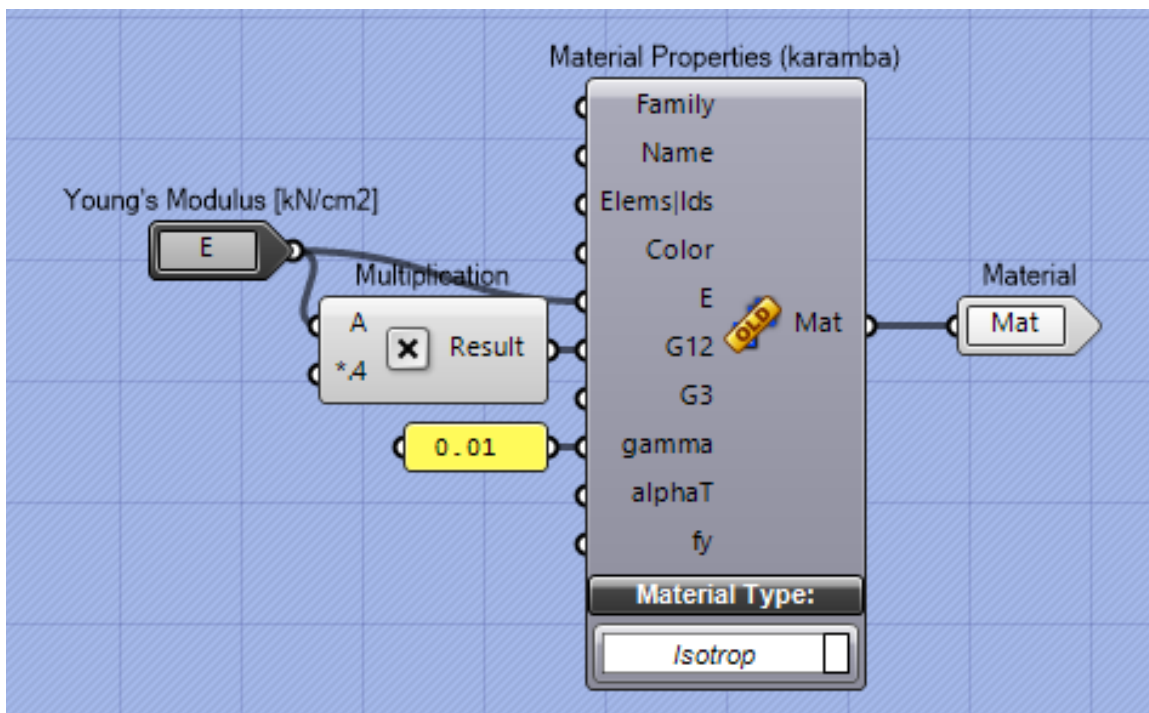


Figura 57 - O componente de base Material da Barra



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 58 - O interior do componente Material da Barra.

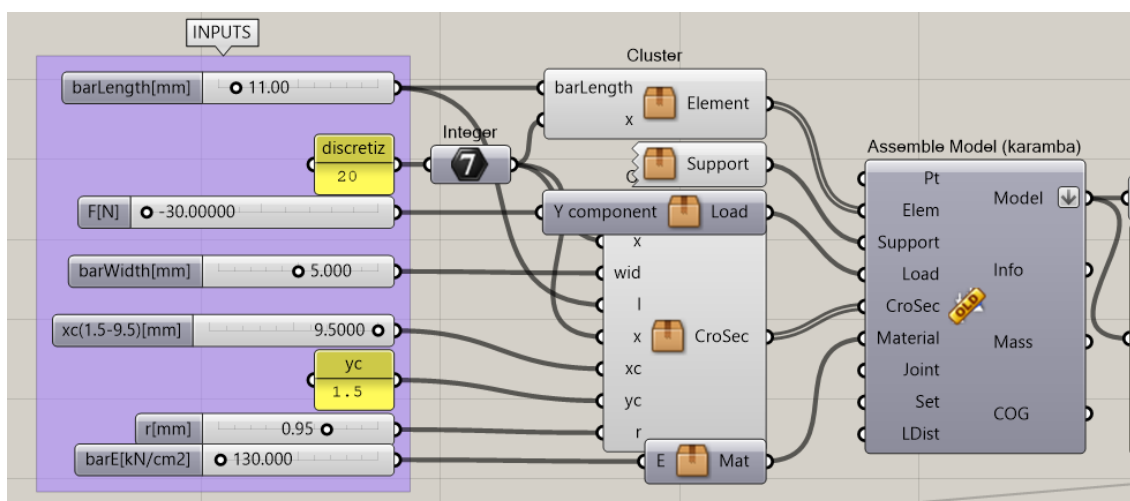


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.6 Montagem e Solução

A partir de todos esses cinco *clusters* mencionados foi possível executar o componente de montagem do Grasshopper (Figura 59). Ele se chama 'Assemble Model', visto no canto direito da mesma figura, e produziu, portanto, o modelo com os parâmetros a serem processados nos próximos componentes.

**Figura 59** - Componentes das entrada até os de montagem do Karamba3D.

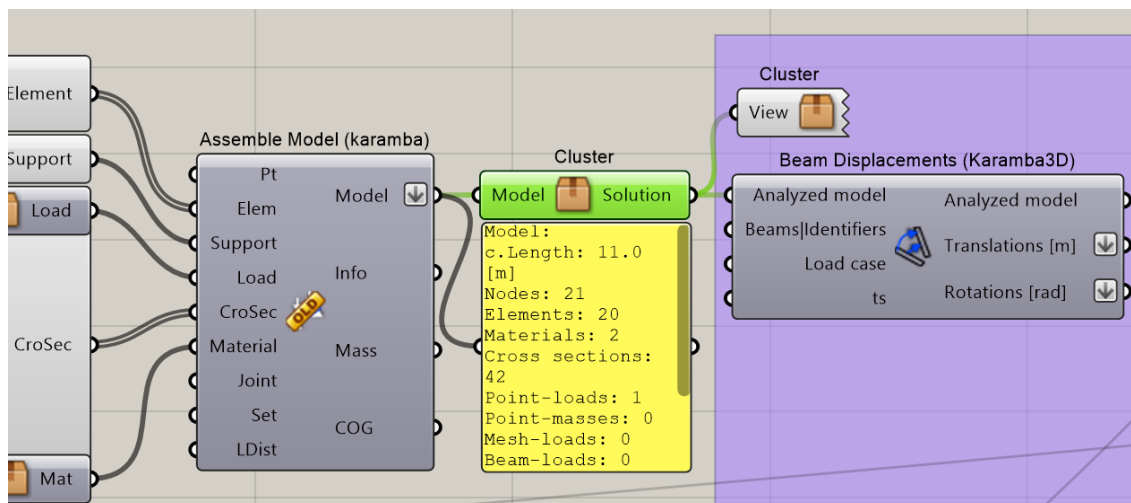


Fonte: Elaborado pelo autor.

Contudo, mais um componente composto, um analisador, foi construído. Na Figura 60 ilustra-se o seu exterior e na Figura 61, o seu interior. Na Figura 61 o 'AnalyzeTh1' do Karamaba3d promoveu a análise do modelo e, portanto, a solução da análise estrutural da simulação. Na mesma figura, é possível notar que uma das saídas do componente é o resultado de deslocamentos 'Disp'. Para esse trabalho, como mencionado, esse seria um parâmetro de análise dos resultados. Seu valor teve que ser 1 mm, observado pelo autor do estudo, para que os valores de 'xc' e 'r' fossem coletados para todos os três casos de análises da direção de inserção da estricção (na altura, largura e em ambas).

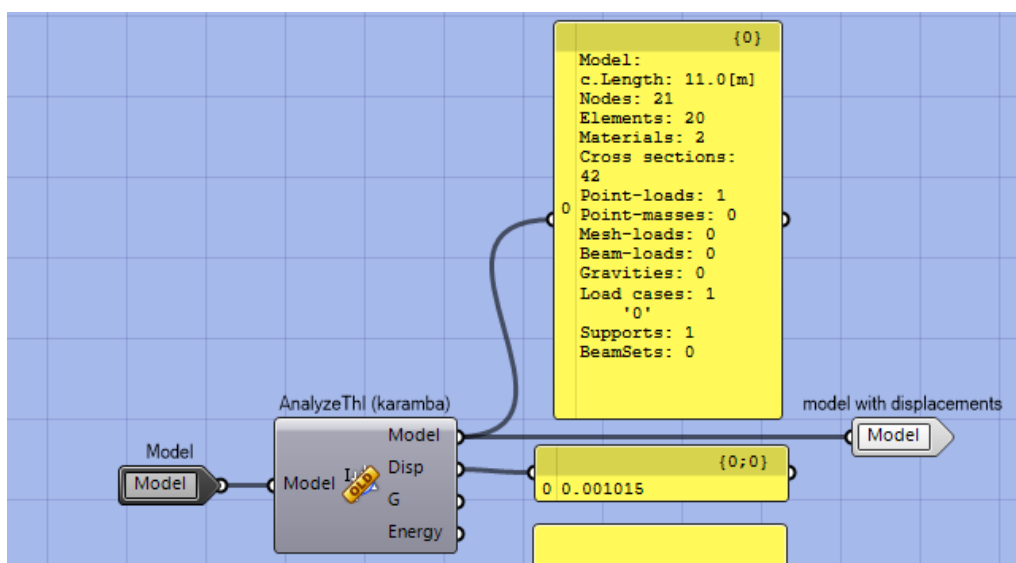
Por último, e ainda comentando a Figura 60, é possível notar que o componente 'Beam Displacements' possui três saídas de parâmetros. A mais importante para esse estudo foi a 'Translations'. Contudo, se notará, mais adiante, que seu valor é equivalente ao resultado de deslocamento (saída 'Disp') do componente 'AnalyzeTh1' mencionado da Figura 61.

Figura 60 - O componente de base do analisador.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 61 - O interior do componente analisador.



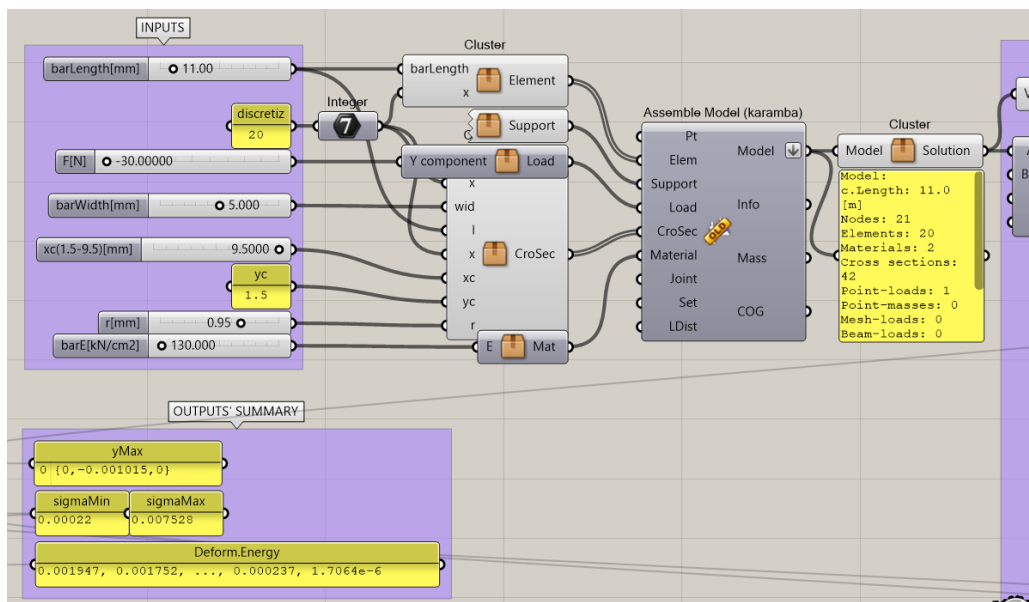
Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, na Figura 62 é apresentado como o canva do Grasshopper permaneceu, o que auxilia no entendimento de como todos os componentes foram posicionados e se conectaram. No canto inferior esquerdo da mesma figura é possível ver alguns parâmetros de resultados (OUTPUT'S SUMMARY).

Os resultados mencionados são mostrados separadamente na Figura 63 e o mais importante para a elaboração desse estudo foi o primeiro: o 'yMax'. Esse parâmetro tem, como exposto na mesma figura, seu valor como um vetor (0, -

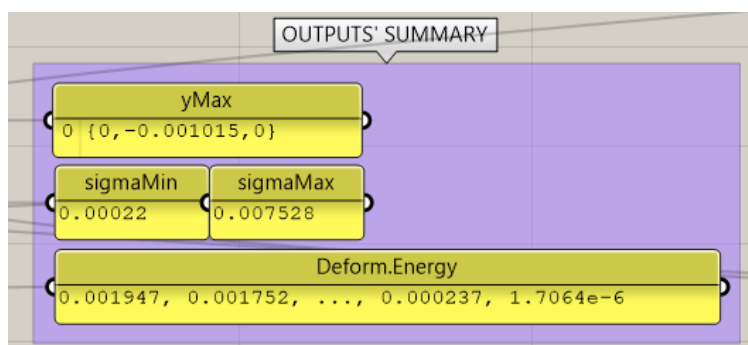
0.001015, 0) de unidades em m. Ou seja, apenas possui valor de 0.001015 no sentido negativo da coordenada y. A unidade é metros. Portanto, ainda nessa figura, o valor analisado é o de 1,015 mm como o deslocamento da ponta da viga.

**Figura 62** - Vista completa do canvas de trabalho do Grasshopper.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 63** - Resultados contendo o parâmetro de análise yMax.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Contudo, o que é visto na Figura 63, é o resultado de apenas uma simulação. Como estipulado nesse trabalho, se variou manualmente 'xc' e 'r' nas entradas inúmeras vezes se verificando para que em todas elas esse resultado de 'yMax' fosse, conforme estabelecido, de 1 mm. Ou seja, dessa forma a parametrização havia sido aproveitada do Grasshopper: mudanças nas entradas recalculavam

automaticamente a saída e as diversas entradas testadas para a mesma saída (1 mm de 'yMax') eram coletadas.

Além disso, como estipulado, três casos de direções de estrições foram testadas. Ou seja, essa série de mudanças e coletas foram realizadas três vezes e os valores de 'xc' e 'r' sempre anotados (contando que o deslocamento na ponta da barra 'yMax' estivesse com o valor de 1 mm).

A Tabela 1 ilustra como foi realizada a coleta. Inicialmente, se estabeleceu que 'r' deveria variar de 0,25 mm até 1,4 mm a cada 0,05 mm. Para cada valor de 'r', 'xc' (também em mm) deveria ser coletado para cada um dos três casos de direções analisadas. Portanto, a mesma tabela ilustra caracteres de interrogações, mostrando os dados a serem preenchidos para a análise deste estudo. Todas as entradas testadas e coletas serão apresentadas no próximo capítulo de resultados.

**Tabela 1** - xc (a coletar) em função de r.

r [mm]	xc [mm]		
	altura	largura	ambas
0,25	?	??	???
0,3	?	??	???
0,35	?	??	???
0,4	?	??	???
0,45	?	??	???
0,5	?	??	???
0,55	?	??	???
0,6	?	??	???
0,65	?	??	???
0,7	?	??	???
0,75	?	??	???
0,8	?	??	???
0,85	?	??	???
0,9	?	??	???
0,95	?	??	???
1	?	??	???
1,05	?	??	???
1,1	?	??	???
1,15	?	??	???
1,2	?	??	???
1,25	?	??	???
1,3	?	??	???
1,35	?	??	???
1,4	?	??	???

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Serão, neste capítulo, apresentadas as progressões da estrição nas três direções: altura, largura e ambas. Como mencionado anteriormente, as progressões referem-se às variações progressivas de 'xc' e 'r' ao longo do braço do produto.

No canto esquerdo de cada uma das próximas figuras, se verá o produto em múltiplas vistas de visualização. No canto superior direito, serão mostradas as entradas e no inferior direito serão mostradas as saídas. As entradas variáveis e coletadas para a análise desse estudo serão sempre 'xc' e 'r' e das saídas apenas 'yMax', como mencionado anteriormente.

Entretanto, as figuras não mostram todos os casos coletados. Apenas os *frames* (capturas de tela pontuais) mais importantes são exibidos para um melhor entendimento da fase de coleta das simulações. Ao final do capítulo, todos os dados coletados (incluindo os não foram dispostos em figuras) serão apresentados em tabela (completando a Tabela 1). Além disso, um gráfico mostrará o comportamento dos valores para que seja mostrada a análise.

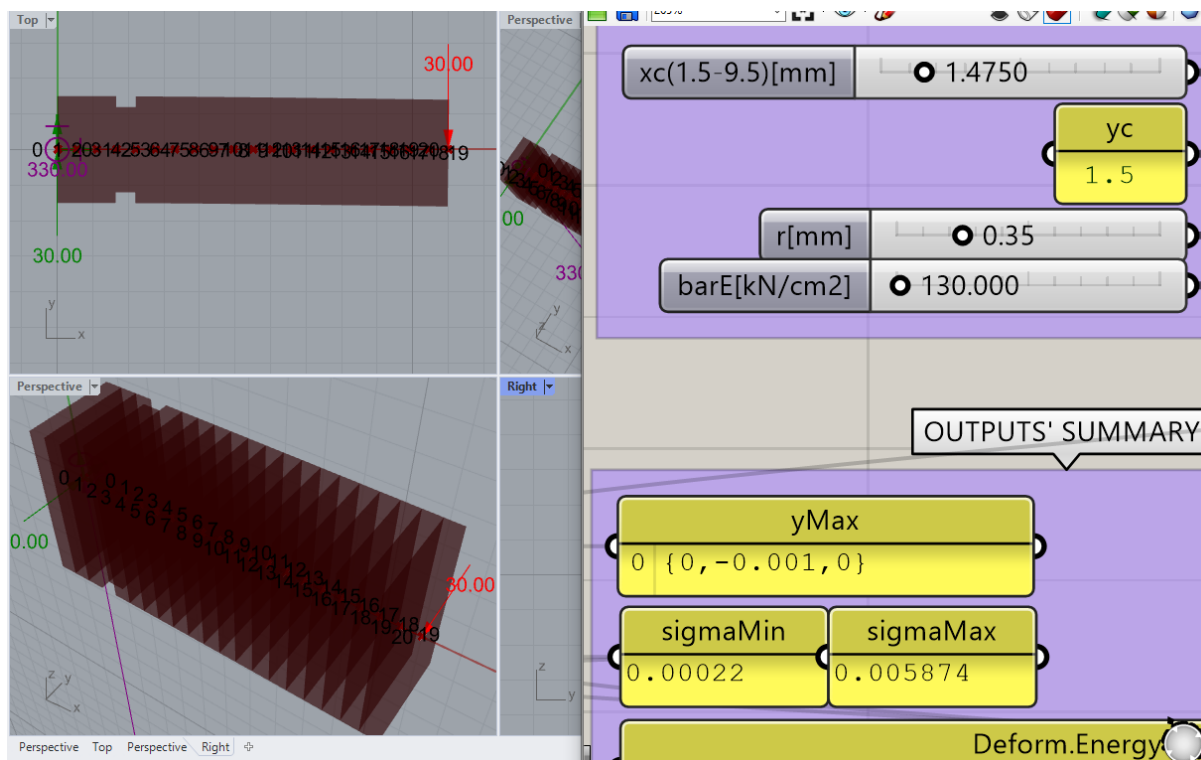
### 4.1 Estrição na direção da altura

Em um primeiro momento, foi analisada a estrição unicamente ao longo da altura da viga. Ou seja, com relação a carga aplicada na ponta do braço de -30 N em cor vermelha, conforme se visualiza na Figura 58, a viga teve redução de material nas bordas superior e inferior.

A série de quatro figuras (Figura 64 até a Figura 67) ilustra apenas quatro *frames* de parâmetros coletados. Na Figura 64, para um 'r' de 0,35 mm, o 'xc' foi de 1,475 mm; na Figura 65, para um 'r' de 0,40 mm, o 'xc' foi de 4,077 mm; na Figura 66, para um 'r' de 0,65, o 'xc' foi de 7,238 mm; e na Figura 67, para um 'r' de 0.90 mm, o 'xc' foi de 9.034 mm.

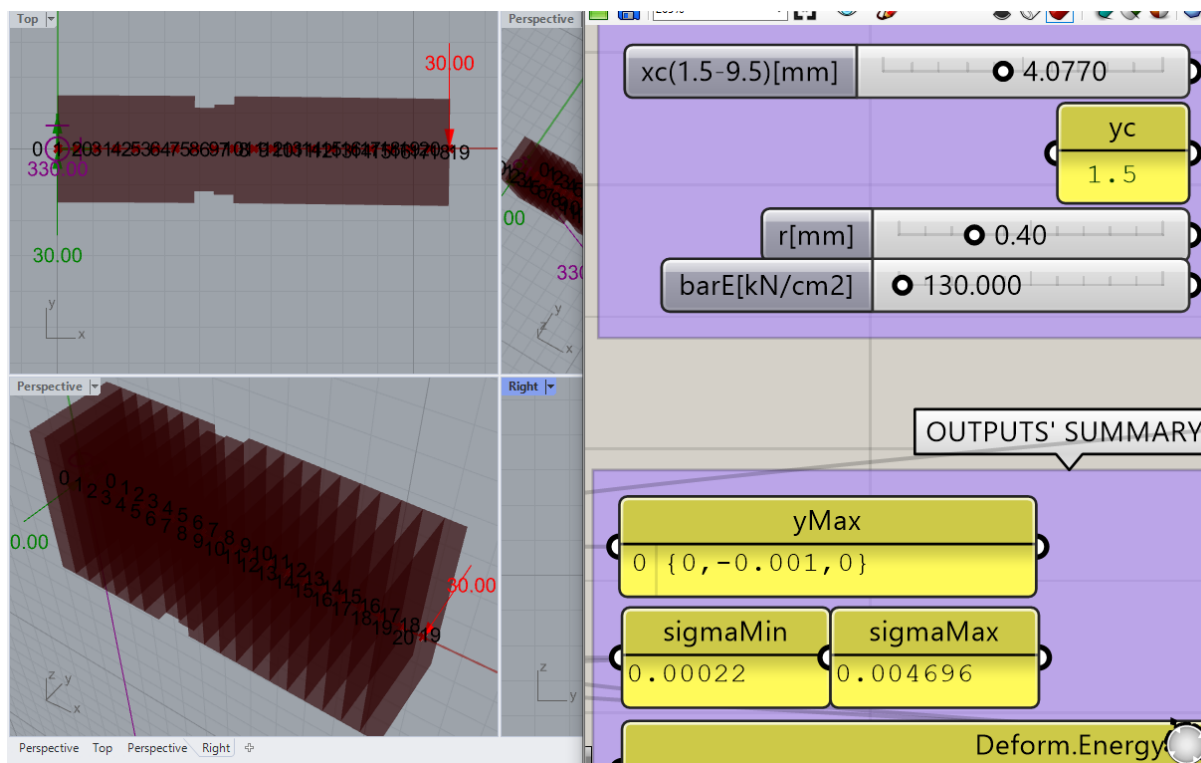
Visivelmente, no lado esquerdo das Figuras 64 até a Figura 67, se nota que o raio, ao longo do comprimento da barra, tendeu a aumentar. E os valores vistos no canto direito das mesmas figuras (xc e r) confirmam essa inferência. Ressaltando que o deslocamento permaneceu sempre o mesmo (-0,001 m, ou 1 mm para baixo).

**Figura 64** - Frame de simulação em ' $r=0,35$  e ' $xc=1,475$  com estricção na direção da altura.



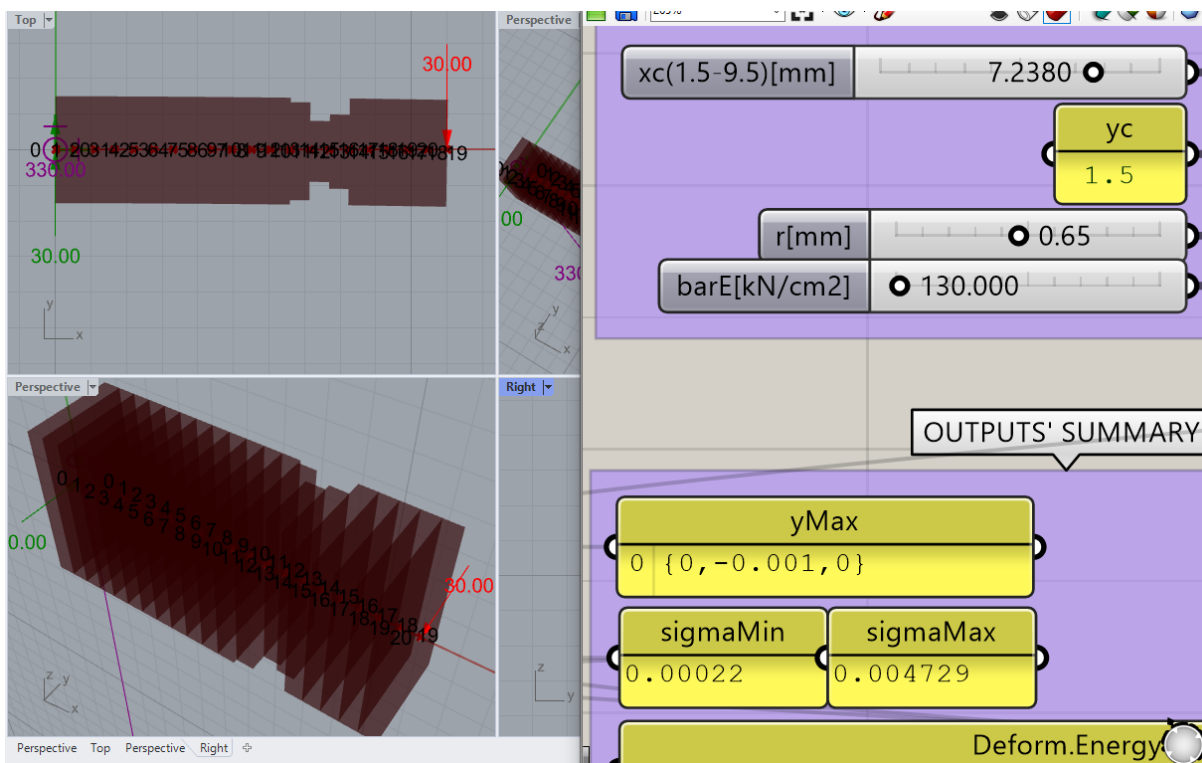
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 65** - Frame de simulação em ' $r=0,40$  e ' $xc=4,077$  com estricção na direção da altura.



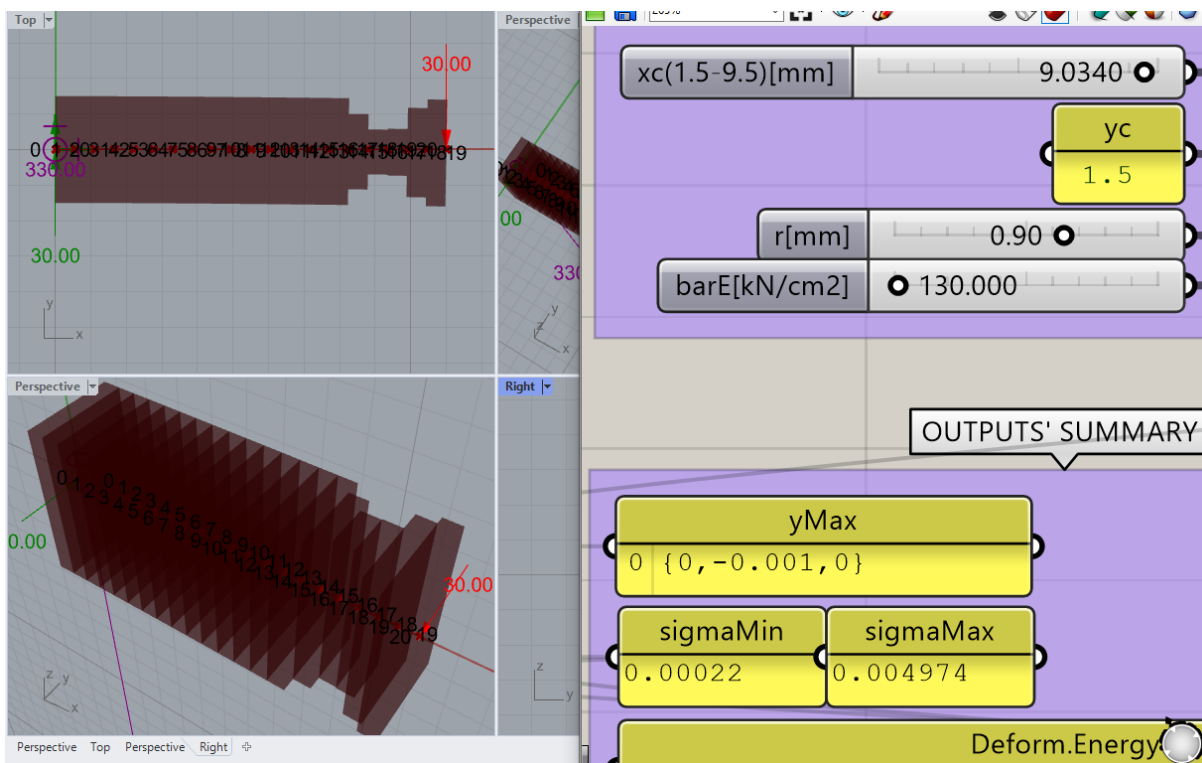
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 66** - Frame de simulação em ' $r=0,65$  e ' $xc=7,238$  com estricção na direção da altura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 67** - Frame de simulação em ' $r=0,90$  e ' $xc=9,034$  com estricção na direção da altura.



Fonte: Elaborado pelo autor.



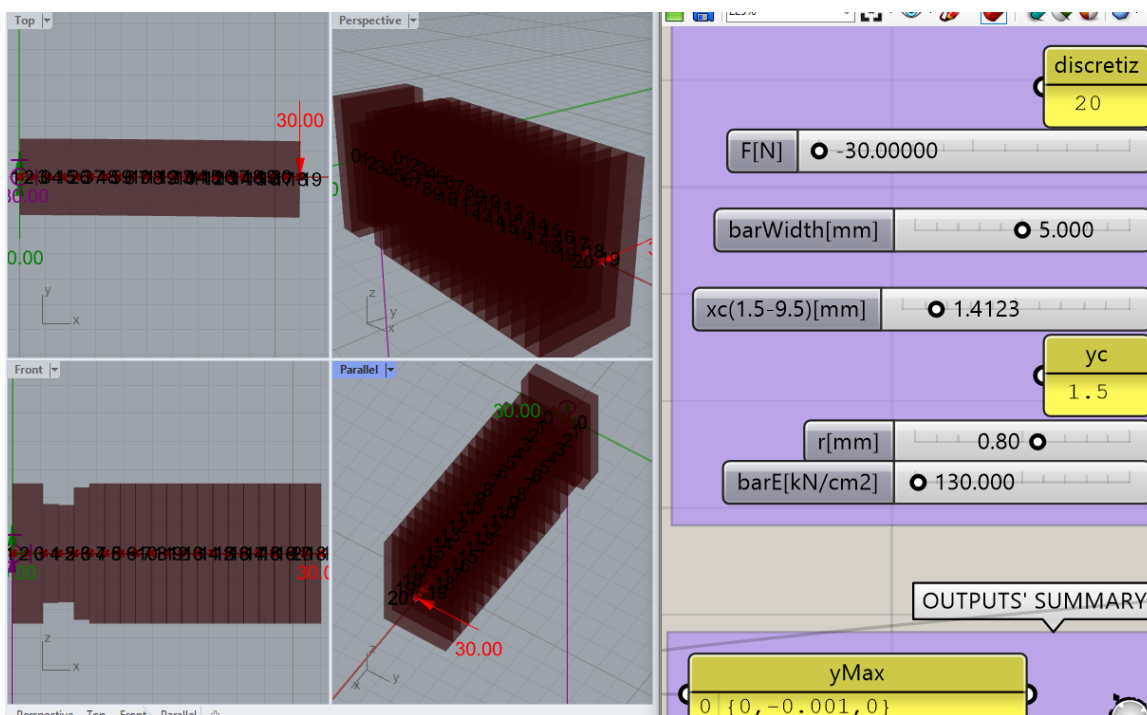
## 4.2 Estricção na direção da largura

Em um segundo momento, a estricção foi considerada unicamente ao longo da altura da viga. Ou seja, com relação a carga aplicada na ponta do braço de -30 N em cor vermelha, conforme se visualiza ainda na Figura 58, a viga teve redução de material nas bordas superior e inferior.

A série de quatro figuras (Figura 68 até a Figura 71) ilustra apenas quatro *frames* de parâmetros coletados. Na Figura 68, para um 'r' de 0,80 mm, o 'xc' foi de 1,412 mm; na Figura 69, para um 'r' de 0,90 mm, o 'xc' foi de 3,075 mm; na Figura 70, para um 'r' de 1,20, o 'xc' foi de 5,506 mm; e na Figura 71, para um 'r' de 1,40 mm, o 'xc' foi de 6,538 mm.

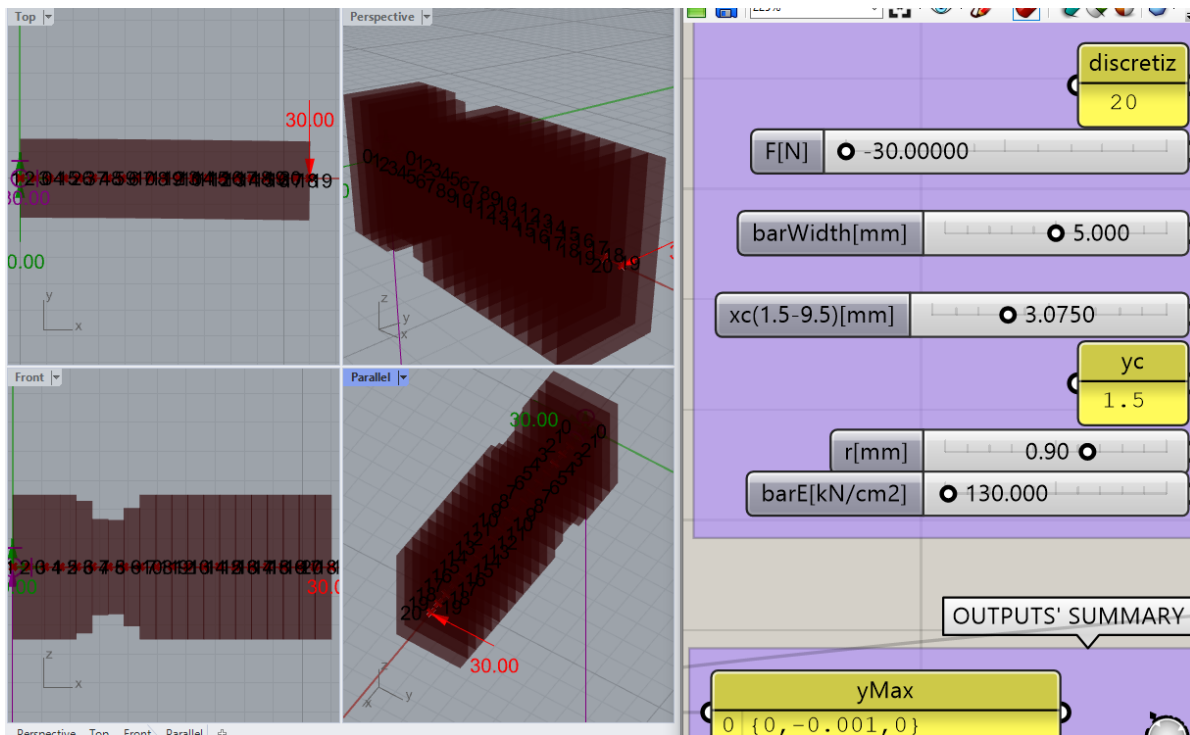
Novamente, no lado esquerdo das Figuras 68 até a Figura 71, se nota que o raio, ao longo do comprimento da barra, tendeu a aumentar. E os valores vistos no canto direito das mesmas figuras (xc e r) confirmam essa inferência. O mesmo deslocamento de 1 mm para baixo se manteve. Mas, os raios para esses casos são evidentemente maiores comparados com os raios do caso do item anterior (de estricção na direção da altura).

**Figura 68** - *Frame* de simulação em 'r'=0,80 e 'xc'=1,412 com estricção na direção da largura.



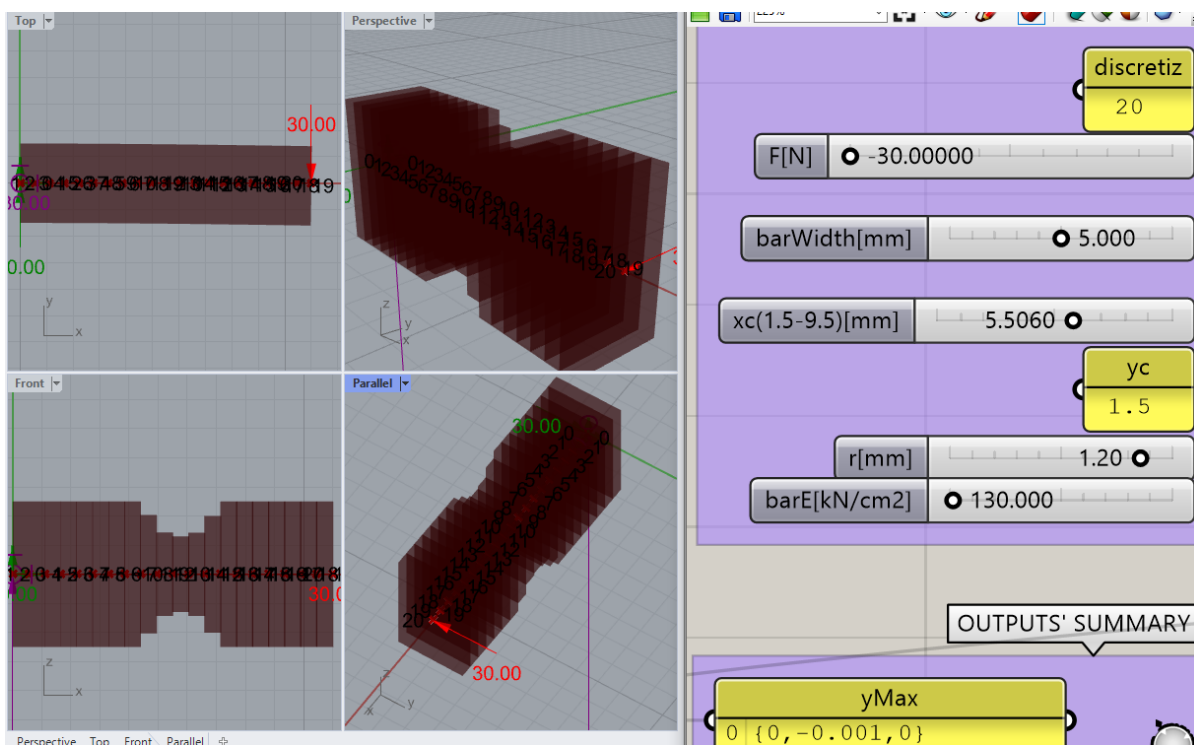
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 69** - Frame de simulação em ' $r=0,90$  e ' $x_c=3,075$  com estricção na direção da largura.



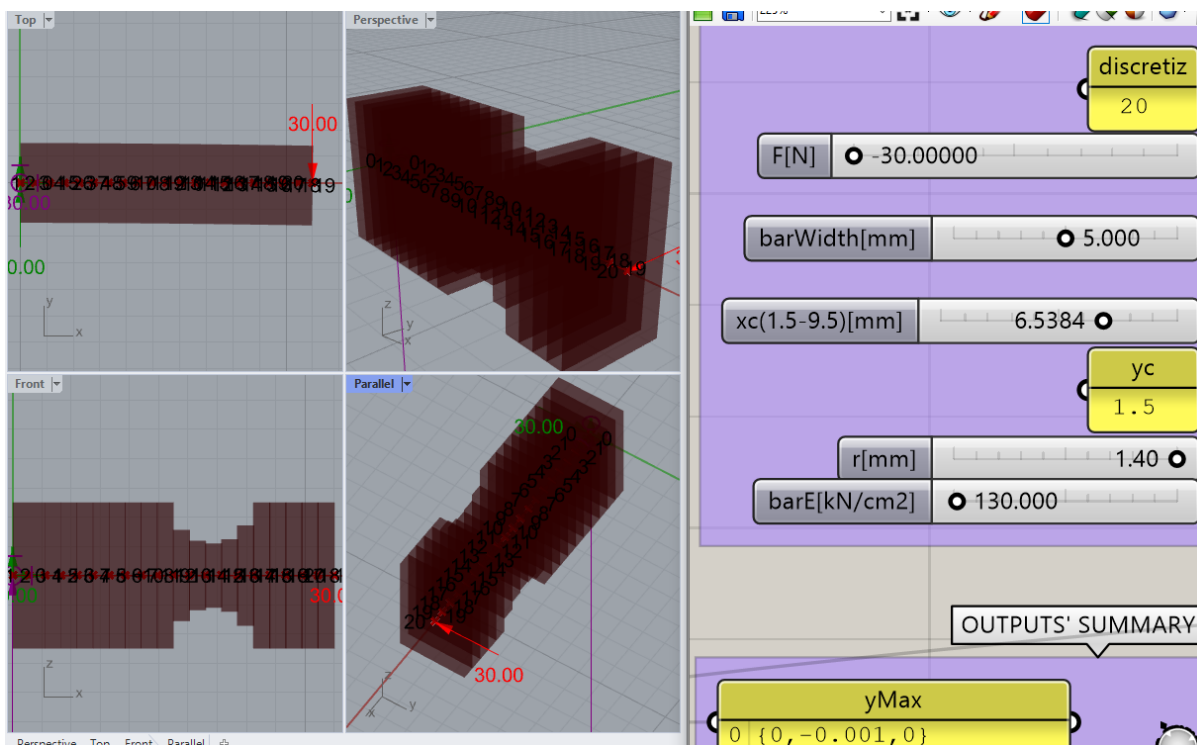
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 70** - Frame de simulação em ' $r=1,20$  e ' $x_c=5,506$  com estricção na direção da largura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 71** - Frame de simulação em ' $r=1.40$  e ' $xc=6.538$  com estricção na direção da largura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

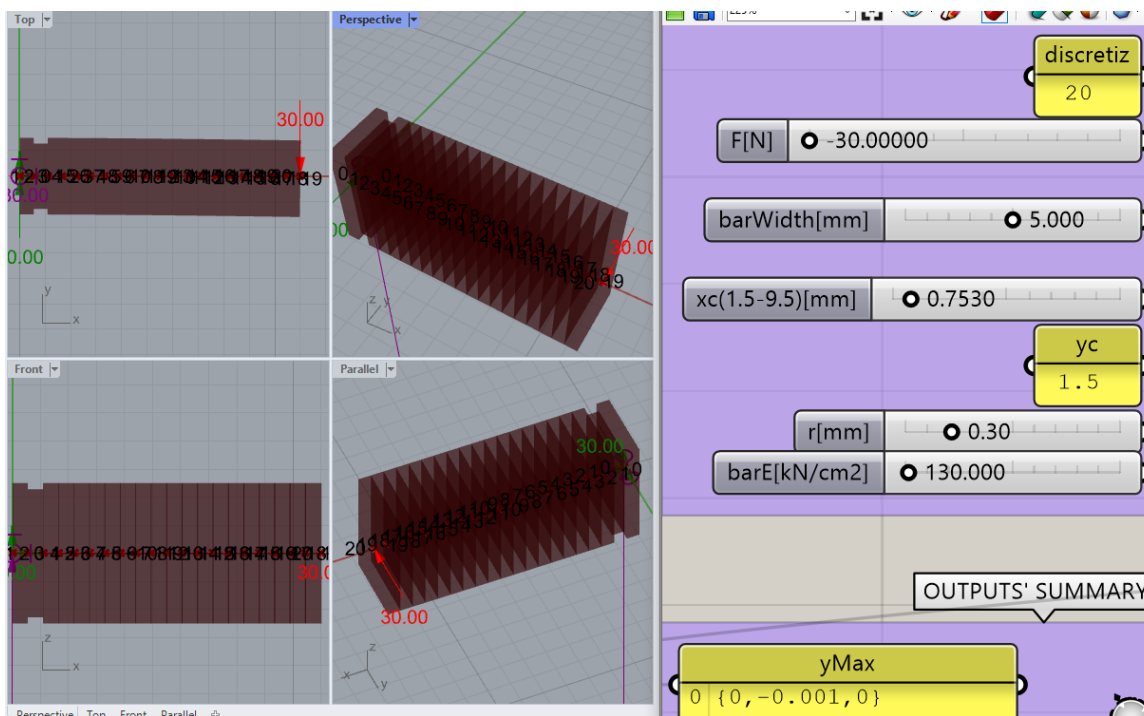
### 4.3 Estricção em ambas as direções

Em um terceiro momento, e por último, foram consideradas ambas as direções na viga: altura e largura (Figura 58). A variação de volume do produto ocorreu nas quatro bordas das seções da mesma (superior, inferior e laterais) e exatamente com a utilização da mesma técnica de progressão.

A série de três figuras (Figura 72 até a Figura 74) ilustra apenas três *frames* de parâmetros coletados. Na Figura 72, para um ' $r$ ' de 0,30 mm, o ' $xc$ ' foi de 0,753 mm; na Figura 73, para um ' $r$ ' de 0,40 mm, o ' $xc$ ' foi de 4,74 mm e na Figura 74, para um ' $r$ ' de 0,65, o ' $xc$ ' foi de 7,78 mm.

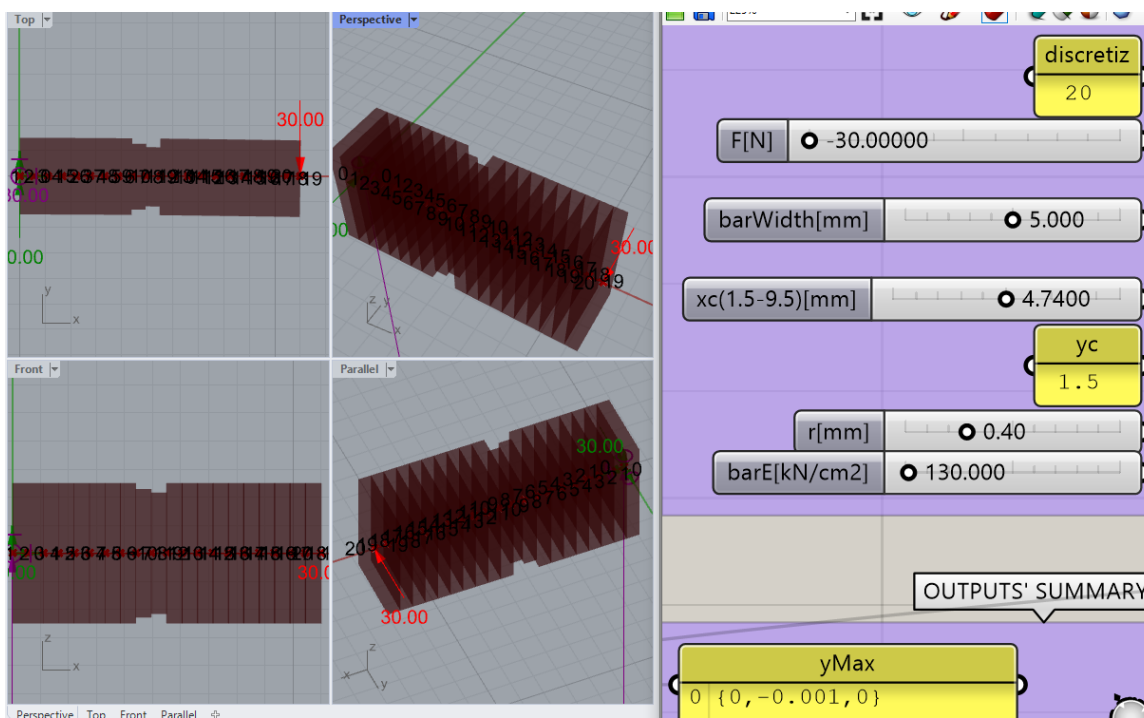
Pela terceira vez, no lado esquerdo das Figuras 72 até a Figura 74, se nota que o raio, ao longo do comprimento da barra, tendeu a aumentar. E os valores vistos no canto direito das mesmas figuras ( $xc$  e  $r$ ) confirmam essa inferência. O mesmo deslocamento de 1 mm para baixo se manteve. Mas, os raios para esses casos são claramente menores comparados com os raios dos itens anteriores (de estricção na direção da altura e estricção na direção da largura).

**Figura 72** - Frame de simulação em ' $r=0.30$  e ' $x_c=0.753$  com estricção em ambas as direções



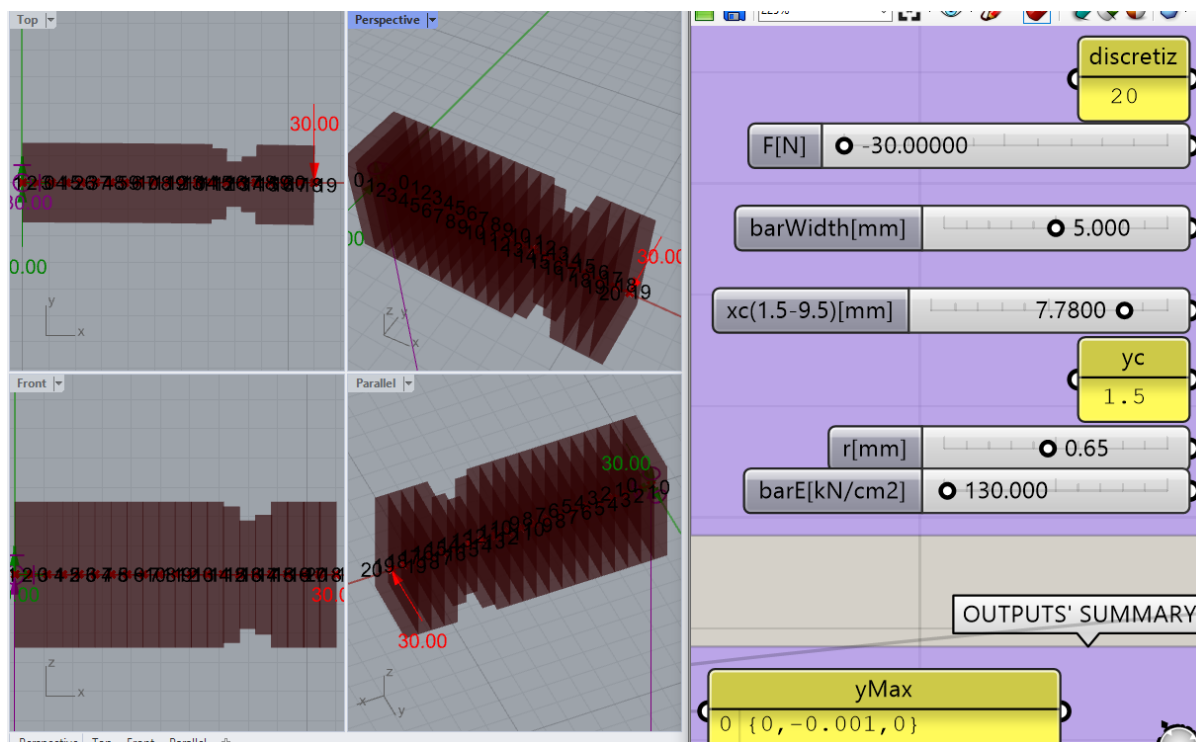
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 73** - Frame de simulação em ' $r=0.40$  e ' $x_c=4.74$  com estricção em ambas as direções.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 74** - Frame de simulação em ' $r=0.65$  e ' $xc=7.78$  com estricção em ambas as direções.



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.4 Avaliação dos resultados

Portanto, realizando as simulações e coletando ' $xc$ ' em função de ' $r$ ' para cada um dos três casos de direções obteve-se os resultados. Esses resultados foram plotados na Tabela 2, a qual apresenta ' $xc$ ' em função de ' $r$ ' e da direção da estricção. Ou seja, completou-se a Tabela 1 com os valores encontrados das simulações. As unidades estão em mm. Da mesma tabela foi plotado um gráfico com os mesmos valores (Figura 75). No eixo horizontal, encontra-se a série de ' $r$ ' e no vertical a série de ' $xc$ '. Cada caso de direção de estricção se encontra em sua curva separada das demais.

Esses resultados indicam algumas considerações:

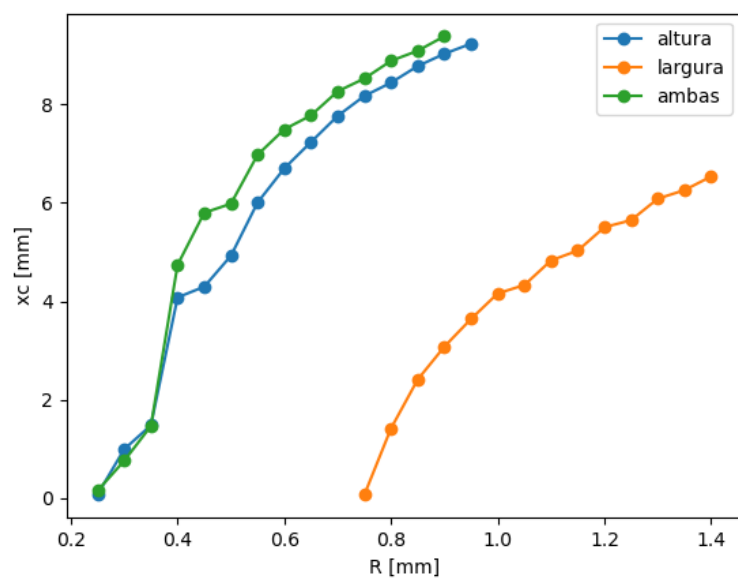
1. Graficamente, a estricção na largura apresenta uma defasagem muito grande, comparada com as demais, relativo ao raio. Ou seja, a curva laranja apareceu bem afastada das outras duas (verde a azul). Isso confirmou a possibilidade de se poder começar desde o início da progressão na viga adicionando raios maiores de estricção na largura, comparados com nas outras direções;

2. A estrição em ambas as direções (curva verde) apresentou uma tendência de ser limitada pela direção na altura. Ou seja, a curva verde raramente esteve à direita da azul. E isso confirmou o fato de a verde ser uma composição da azul e laranja, o que implica que o cenário com menores raios foi, certamente, o dessa composição de direções;
3. As direções que não conseguiram obter um raio grande, como na direção da altura e em ambas (curvas azul e verde), ainda obtiveram valores maiores para  $x_c$  (9,24 e 9,39 mm). Ou seja, conseguiram avançar mais ao longo da viga, comparados com os testes na largura (apenas 6,538 mm). Isso confirma os limitadores de cada caso. Os dados nas direções altura e a composição de ambas foram limitadas pela posição no comprimento da viga ( $x_c$ ). Por outro lado, testes na largura mostraram que essa foi limitada pelo tamanho do raio (não passando de 1,4 mm).

**Tabela 2** - ' $x_c$ ' em função de ' $r$ ' e direção de estrição em mm.

r [mm]	xc [mm]		
	altura	largura	ambas
0,25	0,068	-	0,145
0,3	0,989	-	0,753
0,35	1,475	-	1,46
0,4	4,077	-	4,74
0,45	4,295	-	5,8
0,5	4,925	-	5,983
0,55	6,009	-	6,98
0,6	6,703	-	7,497
0,65	7,238	-	7,78
0,7	7,77	-	8,27
0,75	8,176	0,06	8,53
0,8	8,446	1,412	8,89
0,85	8,784	2,406	9,095
0,9	9,034	3,075	9,39
0,95	9,24	3,64	-
1	-	4,157	-
1,05	-	4,329	-
1,1	-	4,83	-
1,15	-	5,029	-
1,2	-	5,506	-
1,25	-	5,648	-
1,3	-	6,085	-
1,35	-	6,26	-
1,4	-	6,538	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 75 - Curvas dos dados da Tabela 1**

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5. CONCLUSÕES

O trabalho teve como objetivo estudar a resposta mecânica de um produto da construção civil, o Separador de Azulejo em formato Cruzeta (SAC), ao ser submetido a uma estrição circular em um de seus braços. Além disso, se dispôs a avaliar como o Rhinoceros 3d e seus plugins podem auxiliar nessa análise do produto.

As estrições foram consideradas ao longo de um dos braços do produto se avaliando sua resposta de deslocamento. Duas foram as variáveis principais de análise da simulação com a estrição: posição e tamanho das circunferências da estrição. Contudo, três casos de direções nos braços foram verificados para os testes: altura, largura e em ambas as direções da largura e altura. Uma carga aplicada na ponta do produto, e um deslocamento imposto de 1 mm foram as condições impostas à simulação. Além do material como sendo característico de um polipropileno. O modelo estrutural foi tomado como uma viga engastada simples.

Foi utilizado o software de design Rhinoceros em conjunto com alguns de seus plugins: o Grasshopper, o qual possibilitou a parametrização da geometria do produto, e o Karamba3D, o qual proporcionou a simulação mecânica para que sua estrutura fosse testada frente às condições de carregamento e suporte.

Os resultados apontam para a conclusão de que as bordas laterais puderam assumir tamanhos maiores de estrição. Ademais, para os 3 casos de direções de simulação houve limitadores. Para os testes de estrição na direção da altura e para os testes que compuseram ambas, altura e largura, apenas pequenos raios foram permitidos e o limitador foi o comprimento. O contrário aconteceu para testes na largura. Nesse caso, raios grandes puderam estar presente desde o início do braço da viga sendo preciso limitá-lo impedindo que o encontro das circunferências da estrição rompessem o braço.

Ao final desta pesquisa, foi possível destacar que a combinação de modelagem paramétrica com simulações mecânicas utilizando o software Rhinoceros 3D e seus plugins Grasshopper e Karamba 3D mostraram-se eficazes na análise da resposta mecânica de um produto sujeito a estrições geométricas. Através da parametrização do modelo, foi possível explorar livremente as dimensões do produto e avaliar sua resposta estrutural. No entanto, é importante ressaltar que



algumas limitações foram identificadas durante o estudo, como a falta de consideração de certos aspectos da fabricação do produto e a necessidade de aprimoramento na modelagem da geometria das estrições e da própria viga. Portanto, sugere-se que pesquisas futuras investiguem essas questões com mais detalhes, visando aprimorar ainda mais a metodologia proposta e sua aplicação em diferentes contextos industriais.

O presente estudo poderia trazer algumas discussões para estudos futuros:

- O aspecto da simulação com o produto sendo modelado como uma barra não se mostrou eficiente. Os resultados apresentaram, em termos de precisão, valores pouco confiáveis e apenas em termos de comportamento eles foram satisfatórios. Logo, resultados melhores poderiam ser obtidos ao se simular chapas planas ou sólidos. Ou seja, para uma precisão melhor nos valores da tabela e gráfico dos resultados sugere-se utilizar geometrias em 2d ou 3d. Mesmo assim, a forma de desenvolvimento possibilitou cumprir os objetivos de análises deste estudo: determinar apenas o comportamento da estrição para os casos testados.
- O plugin Karamba 3d apresentou dificuldades no estabelecimento de ordens de grandeza de unidades. A própria escala do produto teve que ser ajustada utilizando multiplicadores e divisores para que os valores se mostrassem condizentes, apesar de ainda ter sido possível a análise. Contudo, ressalta-se que o presente autor não tinha significativa experiência com o software e, nesse sentido, a mesma dificuldade de elaboração seja recorrente aos usuários com pouca experiência com o mesmo.
- Outros pesquisadores poderiam explorar este trabalho no sentido de testar diferentes condições de simulações, utilizando softwares alternativos ou aplicando métodos diversos para expandir ainda mais o conhecimento nessa área. Poderia ser possível considerar mudar o tipo de geometria de estrição; usar direções de estrição fora dos planos regulares (altura e largura); estabelecer mais estrições ao longo do comprimento; testar diversos métodos numéricos, não numéricos e se utilizar de mais parâmetros mecânicos como tensão e energia.

As contribuições do presente trabalho poderiam ir não somente no sentido acadêmico, mas também como forma de auxiliar a indústria. Um projetista de

produto poderia ler esse estudo e analisar em seus projetos de que maneira poderia reduzir material.

Viu-se, na contextualização do produto presente na Introdução deste trabalho, que separadores cruzeta já vêm sendo fabricados dessa maneira. Mas que outros produtos também poderiam aportar esse pensamento enxuto de projeto? De quais artifícios poderia se utilizar para que sua fabricação pudesse ser aprimorada. Seja para produtos poliméricos, como o SAC, em que suas fabricações se utilizam de moldes de injeção de polímeros; ou seja na construção civil, em que as formas de concretagem poderiam se utilizar desses artifícios para injetar menos concreto e formar peças com estrições; ou na fabricação de vigas metálicas, em que se poderia considerar a existência da estrição ao invés dos comuns furos. Qual seria a próxima área industrial a buscar mais estrições? E, além disso, com qual tipo de fabricação? Moldado *in loco*, injetado em molde, extrudado, impresso ou cortado a laser.

Diversas poderiam ser as áreas de aplicação de estudos como o do presente. Tanto as que utilizam produtos de pequeno porte, como um separador de azulejo, até os produtos de grande porte como vigas de pontes, de estádios, edifícios ou aviões. E presente estudo mostrou que otimizações estrutural-geométrica, baseada em relações similares vistas no presente estudo, têm potencial para oferecer alternativas de projetos mais enxutos, ao se reduzir materiais de seus produtos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELHAMID, Tariq; EL-GAFY, M.A; SALEM, Ossama. Lean Construction: fundamentals and principles. **The American Professional Constructor**, [s. l.], v. 32, p. 8-19, 2008. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/289380759\\_Lean\\_construction\\_Fundamentals\\_and\\_principles](https://www.researchgate.net/publication/289380759_Lean_construction_Fundamentals_and_principles). Acesso em: 01 abr. 2024.

ACUFLOOR. **Honey Comb Spacers**. 2024. Disponível em: <https://acufloor.com/collections/honeycomb-spacers-leave-in-convertible>. Acesso em: 09 mar. 2024.

BOTELHO, Manoel Henrique C. **Resistência dos materiais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2013. *E-book*. ISBN 9788521207504.

BOXX. **Rhinceros**. 2023. Disponível em: <https://boxx.com/solutions/architecture-engineering-and-construction/rhino>. Acesso em: 13 jul. 2024.

BUGIN, Luis A. K. *et al.* Exploration of data-driven midsole algorithm design based in biomechanics data and Voronoi 3D to digital manufacturing. **Revista Design & Tecnologia**, Porto Alegre, v. 10, n. 21, p. 1-10, 2020.

CADEMY. **Rhinceros LIVE Masterclass**. 2023. Disponível em: <https://www.cademy.xyz/rhino>. Acesso em: 13 jul. 2024.

CESA, Tiago Rodrigues. **Design de uma estrutura de proteção contra capotamento para tratores agrícolas utilizando simulação computacional**. 2010. 115 f. Dissertação (Mestrado em Design) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

CORTAG. **Catálogo 2020**. Mogi Mirim: CORTAG. 2020. Disponível em: [www.cortag.com.br](http://www.cortag.com.br).

DIMCIC, Milos. **Structural optimization of grid shells based on genetic algorithms**. 2011. 215 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Planejamento Urbano) – Universität Stuttgart, Stuttgart, 2011.

FAGUNDES, Cristian Vinicius Machado. **Sistema generativo como ferramenta de otimização do processo exploratório do Design de Produto**. 2019. 118 f. Dissertação (Mestrado em Design) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

KARAMBA3D. **Home Page**. 2024. Disponível em: <https://karamba3d.com/>. Acesso em: 25 jan. 2024.

MATOS, Elisa Bomtempo. **Desenvolvimento De Estrutura Gridshell Em Processo Generativo Baseado No Desempenho Estrutural**. 2021. 96 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2021.

NEXTFAB. **Rhinoceros I**. 2024. Disponível em: <https://nextfab.com/class/rhinoceros-i/>. Acesso em: 13 jul. 2024.

ONOUYE, Barry; KANE, Kevin. **Estática e resistência dos materiais para arquitetura e construção de edificações**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015. *E-book* 9788521627630.

PREISINGER, Clemens. Linking Structure and Parametric Geometry. **Architectural Design**, [s. l.], v. 83, n. 2, p. 110-113, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ad.1564>. Acesso em: 13 jul. 2024.

RUGGIERO, Mirella Nass. **Estruturas reticuladas de bambu laminado: uma reflexão sobre o emprego da fabricação digital na arquitetura contemporânea**. 2021. 297 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo), São Paulo, 2021.

SCHWAB, Felipe André. **Mecânica Das Joias: Estudo Estrutural Aplicado À Concepção E Ao Desenvolvimento**. 2016. 102 f. Dissertação (Mestrado em Design) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

SIGMA. **Tiling Supplies Direct**. 2024. Disponível em: <https://www.tilingsuppliesdirect.co.uk/product/sigma-t-tile-spacers>. Acesso em: 09 mar. 2024.

WALMART. **SuperiorBilt 3/16 in. Regular Long Tile Spacers**. 2023. Disponível em: <https://www.walmart.com/ip/SuperiorBilt-3-16-in-Regular-Long-Tile-Spacers-650-Pieces-per-Box/656268636>. Acesso em: 13 jul. 2024