

# Integração entre otimização topológica 3D com análise estrutural 2D usando pixelização de malha

**Palavras-Chave:** Otimização Topológica, análise estrutural, SIMP

**Autores(as):**

**Guilherme Marcelo, FECFAU – UNICAMP**

**Prof. Dr. Thomaz Eduardo Teixeira Buttignol, FECFAU – UNICAMP**

---

## INTRODUÇÃO:

A utilização de insumos de origem natural é amplamente utilizada na engenharia, a construção civil tem papel fundamental nesse questionamento já que consome entre 20 e 50% dos recursos de origem natural do planeta, causando impacto altamente significativo [3]. Por isso se busca formulação de propostas que consomem menos recursos. Com materiais que tenham mais eficiência e gerem menos resíduos. A análise topológica está presente otimizando esses recursos escassos [9].

Dois métodos dentro da otimização topológica se destacam, o primeiro deles o Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP) é baseado na densidade do material estrutural. Esta técnica assume que as equações diferenciais que governam o problema pode ser discretizado usando o método dos elementos finitos e atribuindo densidades locais ( $\rho$ ) para representar a presença ( $\rho=1$ ) ou ausência ( $\rho=0$ ) de material constitutivo. Isto permite que o material seja removido em regiões que não estão sob altos níveis de estresse, e o material pode ser adicionado em áreas com alta demanda por forças internas, levando a um projeto compatível sem perder sua funcionalidade inicial.

O Evolutionary Structural Optimization (ESO) é um método nos quais as variáveis são 0 e 1, e todo elemento que não atende a condição inicial do projeto é eliminado, sem valores intermediários, no entanto a ESO é de difícil exclusão de materiais, abrindo caminho para o segundo método bidirecional, o BESO. Este último considera a exclusão e adição de elementos durante o processo com base em critérios de sensibilidade, modificando a rigidez da estrutura [8].

Seja com SIMP ou BESO, a otimização topológica ganhou maior aceitação como parte das primeiras etapas de um projeto conceitual. Além disso, pode ser empregado simultaneamente com estruturas técnicas de modelagem, para investigar diferentes sistemas.

## METODOLOGIA:

A metodologia foi dividida em dois segmentos, no primeiro deles foi feita uma abordagem comparativa entre os métodos de otimização topológica e os diferentes plugins. No segundo segmento, um método plugin foi escolhido e realizada a análise estrutural.

## Comparativo entre plugins

Para a otimização topológica, foram utilizados os plugins TPos e Millipede do Grasshopper, além do software BESO 2D desenvolvido na RMIT University. O Modelo básico é composto por uma viga bi apoiada retangular em pilares que restringem as movimentações nos eixos, exceto pela rotação, cujo as geometrias estão especificadas na tabela 1.

É aplicada uma carga uniformemente distribuída sobre a superfície. São fixadas as remoções de 30% do material para comparação. Dentro da metodologia SIMP modelo paramétrico foi gerado dentro do programa de modelagem digital Rhinoceros (CAD, Computer-Aided Design) com auxílio do plugin Grasshopper (AAD, Algorithm-Aided Design), seguindo as etapas de trabalho de geometria inicial do sistema, condições de contorno e carregamento.

Para o **tOpos (SIMP)** com otimização de elementos tridimensionais. Foram adotados 30 passos de otimização. Os resultados são apresentados na figura 1. As regiões em amarelo na viga representam seu preenchimento em concreto. A redução de volume é representada pela região em vermelho.

Modelos	(Vão x Largura x Altura) cm
Modelo 1	500x15x25
Modelo 2	500x25x35
Modelo 3	500x35x45

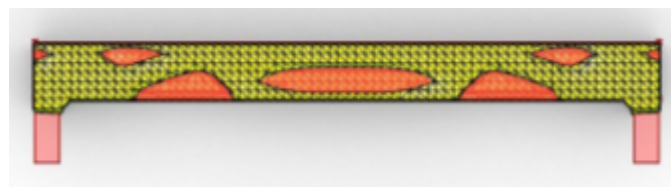


Figura 1 -Otimização no tOpos para seção 35x45cm.



Figura 2 -Otimização no Millipede para seção 35x45cm.

Para o **Millipede (SIMP - 2D)** a otimização foi gerada considerando 10 passos de iteração. Os resultados são mostrados na Figura 2. As regiões hachuradas em branco são representadas pelo preenchimento em concreto, enquanto as regiões em preto demonstram os vazios.

Para o **Millipede (SIMP - 3D)** o modelo considera uma viga tridimensional na figura 3, o preenchimento em concreto está sendo representado por vermelho na viga, e cinza nos apoios que não sofrem variação de volume, já os vazios devido a otimização estão representados justamente pela falta de preenchimento.



Figura 3 -Otimização no Millipede para seção 35x45cm.

Para o **RMIT BESO (BESO - 2D)** foi utilizado o programa de nome BESO 2D feito por Zuo ZH, Xie YM, para as análises bidimensionais. A modelagem da estrutura foi desenvolvida dentro da interface do programa, enquanto a otimização foi feita a partir de um script a partir da análise de elementos finitos. Representado na Figura 4, as cores apresentadas mostram os esforços em MPa, sendo que as cores mais quentes indicam maiores esforços de resistência.

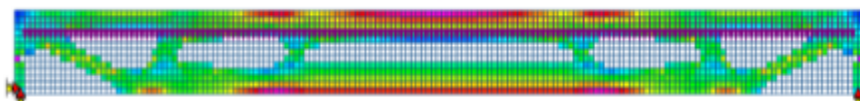


Figura 4 -Otimização no RMIT BESO para seção 35x45cm.

## Análise Estrutural

A análise estrutural da viga de concreto simplesmente apoiada, parametricamente otimizada, foi realizada utilizando o plugin tOpos. As principais vantagens são a integração com Grasshopper, parâmetros personalizáveis, ferramentas de visualização e processo de fabricação iterativo. Foi dividida em 4 etapas principais.

- Construção do elemento estrutural 3D paramétrico aproveitando o software Rhinoceros3D
- Otimização de topologia 3D usando o plugin Topos
- Conversão do modelo 3D otimizado em uma superfície 2D, a malha é pixelizada
- Análise estrutural realizada no plugin Kiwi3D. O plugin usa NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) para representar geometria, proporcionando alta precisão e flexibilidade.

O **modelo paramétrico 3D** da viga, incluindo seus apoios (condições de contorno) e carregamento, foi desenvolvido utilizando Rhinoceros 3D (CAD) com auxílio do Grasshopper (AAD). A Tabela 2 mostra os parâmetros geométricos de entrada para as vigas. Foram analisados 7 modelos, considerando incrementos de altura de 10 cm.

Tabela 2. Parâmetros de Entrada para Viga 3D

Parâmetros	Dimensão
Lados do Pilar Quadrado (Suportes)	0.15 m
Largura da Viga	0.20 m
Vão	5.0 m
Comprimento do Pilar	independente
Altura da Viga	Variável

Na **otimização topológica** o modelo geométrico foi acoplado ao plugin tOpos. As variáveis de entrada do plugin são separadas em parâmetros específicos que variam de acordo com os resultados esperados do projeto. O material será removido de acordo com o Density Value determinado. Para este estudo foi adotado o valor de 0,60. Quanto mais próximo o valor estiver de 1, maior será a quantidade de material concentrado por célula da malha.

O número de iterações foi escolhido experimentalmente. O valor do volume final do elemento estrutural foi fixado para análise em 65%. A variável Penalty é responsável por controlar penalidades em densidades intermediárias, o valor máximo foi adotado para garantir a menor presença de densidades intermediárias na viga. A variável Change controla o quanto a densidade do material pode mudar entre iterações consecutivas. Foi adotado o valor

Tabela 3. Parâmetros de Entrada definidos no plugin tOpos

Parâmetro	Componente	Valor
Density Value	Boundary Domain	0.6
Young Modulus	Boundary Domain	30 GPa
Poisson Ratio	Boundary Domain	0.20
Load	Boundary Conditions	30 kN/m <sup>2</sup>
Iteration	Optimus Parameters	15
Volume Fraction	Optimus Parameters	65%
Penalty	Optimus Parameters	2
Change	Optimus Parameters	0.005
Sensitivity Filter Radius	Optimus Parameters	1,5

que torna o processo mais gradual e com menores riscos de instabilidades. O Sensitivity Filter Radius controla as densidades próximas umas das outras e é responsável por evitar variações bruscas próximas. Os dados na tabela 3.

**Transformação de malha 3D em superfície 2D** a forma da viga 3D foi reparametrizada para obter um elemento 2D semelhante a uma casca. O objetivo é obter uma geometria simplificada, assim criando uma forma mais adequada para aplicações práticas. A estratégia consistiu na projeção 2D da malha 3D. Todos os pontos da malha projetada são identificados, em seguida, a superfície projetada é pixelizada pela criação de retângulos centrados nos pontos pré-definidos. Por último, os retângulos são unidos para criar uma superfície uniforme, conforme demonstrado na figura 5.

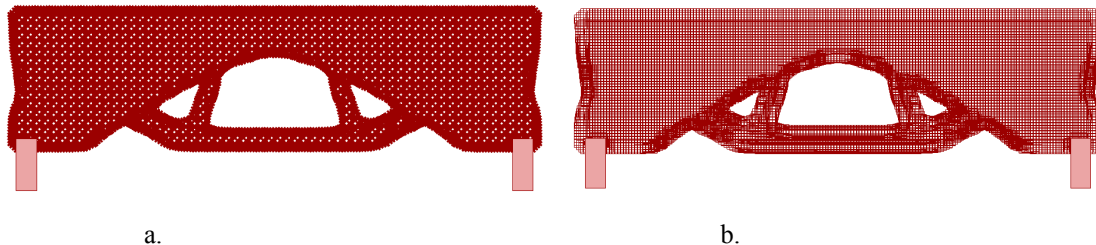


Figura 5. Viga Otimizada projetada no plano, a. Geração dos Pontos, b. pixelização (geração de retângulos).

Para a **análise estrutural** foi adotado o plugin Kiwi3D. O plugin é baseado na análise isogeométrica de elementos finitos (FE), que permite o processamento de geometrias complexas. A característica especial do plugin está na utilização de Non-Uniform Rational B-Splines (NURBS) como funções base para os elementos finitos. O elemento shell gerado no Grasshopper após a otimização da topologia foi inserido no Kiwi3D. Foi estabelecido um ponto no centro da parte inferior da casca para medir os deslocamentos verticais das vigas.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO:

As vigas foram divididas em 7 modelos com as mesmas propriedades, exceto pela altura da seção transversal. A deflexão do vão médio foi medida e os resultados foram comparados considerando a análise estrutural antes e depois da otimização da topologia.

Tabela 4. Comparação das deflexões das vigas.

Modelo	Altura da Viga	Deflexão (antes da otimização)	Deflexão (depois da otimização)
1	0.45 m	0.785 mm	0.439 mm
2	0.55 m	0.472 mm	0.294 mm
3	0.65 m	0.285 mm	0.176 mm
4	0.75 m	0.200 mm	0.134 mm
5	0.85 m	0.141 mm	0.106 mm
6	0.95 m	0.107 mm	0.086 mm
7	1.05 m	0.084 mm	0.059 mm

Da Tabela 4, pode-se notar que à medida que a altura da seção da viga aumenta, o deslocamento é menor. Além disso, o deslocamento da viga otimizada para o mesmo modelo é menor quando comparado ao modelo original sem otimização. Isso pode ser atribuído à mudança do formato da viga, resultando em uma modificação da distribuição de tensões e do comportamento estrutural..

A mudança na geometria das vigas após a otimização pode ser vista na Figura 6. A malha 3D da viga é destacada em amarelo com uma grade de divisões de linhas pretas. A projeção 2D

deformada equivalente da viga é representada no fundo em uma escala ampliada, em verde, amarelo e vermelho de acordo com as respectivas intensidades de deformação.

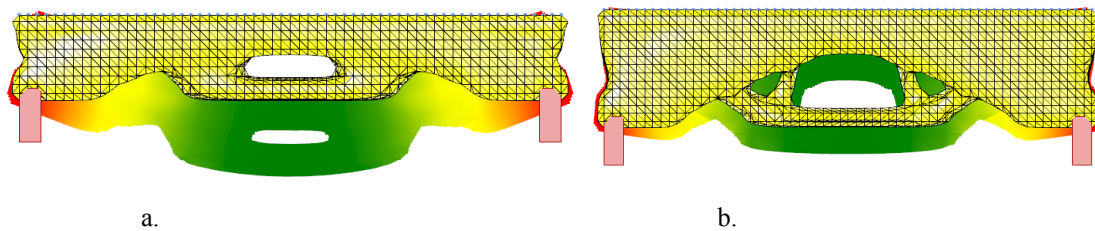


Figura 6. Forma deformada das vigas otimizadas após a análise estruturais: a. Modelo 3, b. Modelo 7

Além disso, o número de ramos tende a se tornar mais numeroso à medida que a altura da seção aumenta, o que está de acordo com a teoria do estudo anterior de Montaute [8]. O formato tende a se aproximar de uma forma de treliça, com regiões de compressão e tração bem definidas. Um fluxo de tensão de compressão mais alto é desenvolvido próximo aos apoios e no topo da viga. Tensões de alta tração surgem no centro do lado inferior da viga, onde há momento de flexão máximo.

## CONCLUSÕES:

Antes da análise estrutural, algumas simplificações geométricas foram introduzidas na viga otimizada para simplificar a forma não convencional e complexa. Neste caso, a malha foi pixelizada usando quadrados para cobrir toda a superfície do elemento. Os pixels foram mesclados para criar a superfície NURBS para análise posterior usando o plugin Kiwi3D. Como resultado, uma diferença foi observada nas medições das deflexões do vão médio. A diferença entre a geometria otimizada 3D e a casca 2D é mais evidente nos modelos com alturas de seção mais baixas, uma vez que eles têm regiões de vazios menores e mais próximas.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Albuquerque A. et al. "Análise da Eficiência dos Sistemas Estruturais para Edifícios em Concreto". Universidade Federal do Ceará, mar 2018.
- [2] Andrawes B.; Sung M. "Topology Optimization of Continuous Precast Prestressed Concrete Bridge Girders Using Shape Memory Alloys". American Society of civil engineering, 2022.
- [3] Brasileiro L.L.; Matos J.M.E. "Reutilização de Resíduos da Construção e Demolição na Indústria da Construção Civil". Universidade Federal do Piauí, 2014.
- [4] Buttignol T.E.T. et al. "Ultra High-Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPRFC): a review of material properties and design procedures". Revista Ibracon de Estrutura e Materiais, v10 p.957-971, 2017
- [5] Carrazedo R. et al. "Numerical Modeling and Design of Precast Prestressed UHPRFC Beams". Universidade de São Paulo, 2021
- [6] Fundação Getúlio Vargas de Projeto. "A Produtividade da Construção Civil Brasileira". Câmara Brasileira da Indústria da Construção, 2012.
- [7] Maiara G. Montaute, Hugo Luiz Oliveira, Thomaz E. T. Buttignol. Comparative Study of Topologically Optimized Bridge Girders Considering Static and Cyclic Loads. Proceedings of the 9th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE 2024). DOI: 10.11159/icsect24.151.
- [8] Selmi M.; Ielrisoy Z.Y. "A comparative Study of Different Grasshopper Plugins for Topology Optimization in Architectural Design". Grazy University 2022.
- [9] Tinarrage R. "Análise Topológica de Dados e suas Aplicações". Instituto de Ciências Matemáticas e Computação, Universidade de São Paulo, 2022.
- [10] Tyflopoulos, E., & Steinert, M. (2022). A Comparative Study of the Application of Different Commercial Software for Topology Optimization.
- [11] Walliston S. F. Estudo de Otimização Topológica em Estruturas 2D Considerando a Não Linearidade Geométrica. Universidade Federal de Ouro Preto, 2013.
- [12] Wang, Y. A Study on Microstructures of Homogenization for Topology Optimization. Victoria University, Australia, 2003
- [13] Zuo ZH, Xie YM. Evolutionary Topology of Continuum Structures. School of Civil, Environmental and Chemical Engineering, RMIT.