

OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA TRIDIMENSIONAL BASEADA EM CONFIABILIDADE ESTRUTURAL UTILIZANDO SESO EM PYTHON

Higor Eduardo Vieira Oliveira Prado ¹; Aline Renata Mateus Madruga ²; Virgil Del Duca Almeida ³; Hélio Luiz Simonetti ⁴;

1 Higor Eduardo Vieira Oliveira Prado, Bolsista (CNPq, IFMG), ECA, IFMG Campus Betim,

2 Aline Renata Mateus Madruga, Bolsista (CNPq, IFMG), ECA, IFMG Campus Betim;

3 Virgil Del Duca Almeida, Professor do IFMG Campus Betim; virgil.almeida@ifmg.edu.br

4 Hélio Luiz Simonetti : Professor do IFMG, Campus Betim; helio.simonetti@ifmg.edu.br

RESUMO

A Otimização Topológica (OT) é um campo de estudo da otimização estrutural que, associado a métodos de análise de confiabilidade estrutural, bem como a técnicas de otimização evolucionária estrutural, podem alcançar estruturas ótimas para projetos de engenharia, levando em consideração a análise probabilística e outras incertezas associadas às variáveis envolvidas no projeto. Neste trabalho, utilizou-se o procedimento evolucionário de OT, Smoothing-ESO (SESO), cuja heurística é bidirecional. Ele permite que elementos da malha cuja contribuição para a rigidez da estrutura é ineficiente sejam removidos durante procedimento de otimização a cada iteração. Dentre esses elementos, os mais próximos de atender a restrição são adicionados, para suavizar o procedimento de otimização da estrutura. O SESO é acoplado ao método de confiabilidade de primeira ordem (FORM) para uma análise de confiabilidade baseada em OT. Para isso, desenvolveu-se um código da técnica SESO na linguagem de programação Matlab e Python baseado em compliance para a determinar as topologias ótimas tridimensionais de uma viga MBB e um Console, os resultados numéricos foram apresentados e já mostram uma boa acurácia com os apresentados na literatura.

INTRODUÇÃO:

A Otimização Topológica (OT) é um campo de pesquisa que tem como objetivo encontrar a distribuição ótima de material do domínio da solução para maximizar um desempenho mecânico sob determinadas restrições. Esta abordagem é considerada um campo importante na Otimização Estrutural (OE), área que atende interesse de projetistas e fabricantes de projetos mecânicos. Possui importantes aplicações práticas nas indústrias automotiva e aeroespacial, e hoje é uma ferramenta mister na Indústria 4.0, com aplicações em Manufatura Aditiva.

Sigmund (2001) desenvolveu um código MatLab conhecido como 99-line para otimização de topologia com base na minimização da compliance, usando critérios de otimização que dependem da sensibilidade de uma função objetivo. Liu e Tovar (2014) desenvolveram um código computacional para a OT de estruturas tridimensionais usando a técnica Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP). Os algoritmos de otimização topológica removem e/ou adicionam seletivamente os elementos para obter uma configuração ótima Tovar et al. (2006). Diferentemente dos métodos tradicionais de otimização, a otimização topológica é capaz de alterar o layout da estrutura original, podendo auxiliar, portanto, no projeto conceitual da estrutura.

Em seu método clássico, o ESO (Evolutionary Structural Optimization, ou Otimização Estrutural Evolucionária) modifica a topologia de uma estrutura mediante a heurística de remoção gradual de elementos finitos de uma malha. Após essa remoção, a estrutura evolui em direção a um ótimo estacionário ideal para o projeto. O método Smoothing Evolutionary Structural Optimization (SESO) é uma suavização do ESO que ocorre na heurística de remoção gradual dos elementos finitos da malha. O SESO é procedimento de suavização que aplica uma ponderação sobre a matriz constitutiva de forma que o elemento que, a priori, seria eliminado do ESO, seja devolvido à estrutura com uma relaxação.

A Otimização Topológica Determinística (DTO), não consegue avaliar incertezas relacionadas às variáveis do projeto durante o procedimento iterativo. Para atender a essas condições, surge a Otimização Topológica Baseada em Confiabilidade (do inglês, Reliability-based Topology Optimization, ou RBTO), que busca encontrar uma topologia ótima sob certas restrições probabilísticas, tendo a capacidade de incorporar essas

variáveis durante o procedimento de otimização, com o objetivo de alcançar um nível de confiabilidade estrutural.

Pesquisadores como Maute e Frangopol (2003); Allen et al. (2004); Kang et al. (2004); Kharmanda et al. (2004); Kim et al. (2006); Guest e Igusa (2008); Rozvany (2008); Lógó et al. (2009); Luo et al. (2009); Chen et al. (2010); Jalalpour et al. (2013) abordaram o RBTO usando o método de confiabilidade de primeira ordem (do inglês, first-order reliability method, ou FORM) com as duas abordagens mais tradicionais: Reliability Index Approach (RIA) e Performance Measure Approach (PMA), sobre diferentes metodologias, em geral, usando loop duplo, loop único ou procedimento híbrido.

A abordagem híbrida foi iniciada por Kharmanda e Olhoff (2004) e consiste em uma sequência de análises de confiabilidade e de otimização determinística. Inicialmente, as variáveis aleatórias escolhidas são modificadas como quantidades determinísticas de acordo com o ponto mais provável de falha (do inglês, most probable failure point, ou MPP) obtido do índice de confiabilidade e da análise de sensibilidade para a função objetivo em relação às variáveis aleatórias. As variáveis aleatórias resultantes são usadas no procedimento de otimização determinístico para obter a topologia ótima.

A análise RBTO para estruturas 3D proposta por Eom et al. (2011) é realizada usando o procedimento de otimização evolucionária BESO e o Stochastic Response Surface Method (SRSM) para determinar as aproximações das funções de estado limite. Chun et al. (2019) em sua pesquisa se concentram no desenvolvimento de uma estrutura de otimização de topologia baseada em confiabilidade que pode ser utilizada para projetar juntas e conexões para construção de aplicativos sob considerações de incerteza.

O procedimento é realizado fazendo a integração do algoritmo de otimização de topologia, análise de confiabilidade, análise de vibração aleatória, fabricação aditiva, simulações por computador e projeto paramétrico. Além disso, propõe investigação do potencial dos materiais híbridos topologicamente otimizados impressos em 3D. López et al. (2018) propõem um método RBTO desacoplado que é implementado em um código computacional interno, combinado com uma otimização externa para avaliar o RBTO. O objetivo é obter da RBTO um novo esquema estrutural com pelo menos a mesma rigidez que a configuração ótima fornecida pela abordagem DTO. Finalmente, ambas as estruturas passam pelo mesmo processo de otimização paramétrica com base na confiabilidade, considerando o índice de confiabilidade alvo do RBTO anterior com as mesmas informações probabilísticas.

Este resumo apresenta a análise RBTO utilizando a nova implementação proposta na linguagem Python acoplada ao método evolucionário SESO usando a abordagem de Kharmanda e Olhoff (2004), onde as variáveis de projeto são a geometria da estrutura, a força e o volume, uma vez que, este é função explícita da geometria. A função de estado limite são o índice de performance da estrutura e o deslocamento máximo admissível. Este deslocamento é obtido usando o teste Kolmogorov-Sminorv e imposta como restrição no procedimento de otimização. Além do uso do método do Gradiente Conjugado Pré-condicionado (PCG) para resolver o sistema linear gerado na equação de equilíbrio.

METODOLOGIA:

Para o desenvolvimento deste trabalho foi aplicada a formulação do método evolucionário SESO, descrito em Simonetti et al. (2014, 2018).

Para modelos de estrutura tridimensionais foi necessário formular a análise de elemento finito em 3D e a implementação de seu cálculo numérico. Isso foi feito tendo como base o trabalho de Torres (2003) e de Liu e Tovar (2014).

A implementação teve como referência o código MatLab desenvolvido inicialmente por Sigmund (2001) e, posteriormente, usado e modificado em Liu et al., (2014) e Simonetti et al., (2014, 2016).

Neste trabalho foi utilizado a linguagem de programação Python e as bibliotecas numéricas NumPy e SciPy. O código construído foi, então, usado em testes com exemplos numéricos. As estruturas encontradas foram plotadas com a ajuda da biblioteca de visualização PyVista.

RESULTADOS E DISCUSSÕES:

Com o uso da linguagem de programação Python e das bibliotecas NumPy e Scipy, foi desenvolvido código para realização da análise topológica de estruturas tridimensionais fazendo-se uso de análise de elementos finitos, da técnica de otimização SESO e de otimização topológica baseada em confiabilidade (RBTO). Com o objetivo de evitar instabilidades numéricas, como, por exemplo, o padrão de "tabuleiro de xadrez" adotou-se, nesta pesquisa, a técnica do filtro de sensibilidade.

O filtro usado é uma função do raio mínimo de influência. Assim, quanto maior o raio, maior o número de elementos, dentro da esfera, que serão suavizados. Para melhor visualização, os resultados das estruturas 3D encontradas foram plotados fazendo-se uso da biblioteca de visualização PyVista (Sullivan et al., 2019). Além disso, utilizou-se o método do Gradiente Conjugado Pré-condicionado (PCG) para resolver o sistema linear gerado na equação de equilíbrio evitando o problema de memória computacional nos problemas e grande escala.

Cada nó na estrutura tem três graus de liberdade correspondentes a deslocamentos lineares nas direções x-y-z (um elemento tem 24 graus de liberdade). Os graus de liberdade são organizados no vetor de deslocamento nodal.

Exemplo 1 – Console

Neste exemplo numérico, as análises foram feitas para uma estrutura de console com raio mínimo de 1,5 e com as seguintes dimensões de comprimento (L_x), altura (L_y) e espessura (L_z):

- $L_x = 20$
- $L_y = 60$
- $L_z = 6$

O domínio de projeto e as condições de contorno para o Console são apresentados na Figura 1.

Figura 1

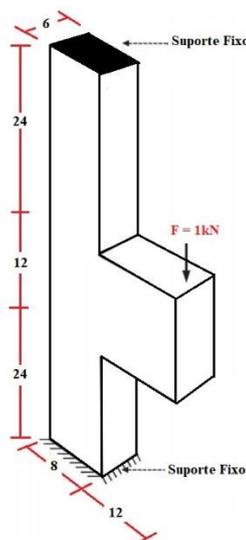


Figura 1 – Domínio de projeto e condições de contorno.

A estrutura ótima encontrada pode ser observada na Figura 2. Para a determinação dessa estrutura foi feito uso da técnica SESO em conjunto com o RBTO.

Figura 2

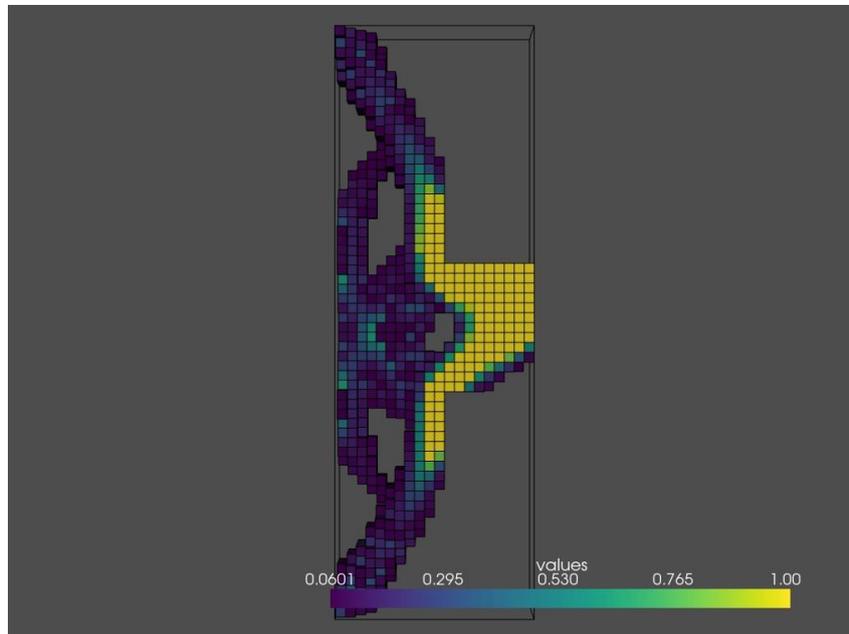


Figura 2 – Configuração ótima para o exemplo Console utilizando SESO_RBTO.

A Figura 3 apresenta o gráfico que mostra a evolução dos valores de *compliance* no decorrer do processo iterativo. A Figura 4 apresenta o gráfico que mostra a variação dos valores do índice de performance a cada iteração.

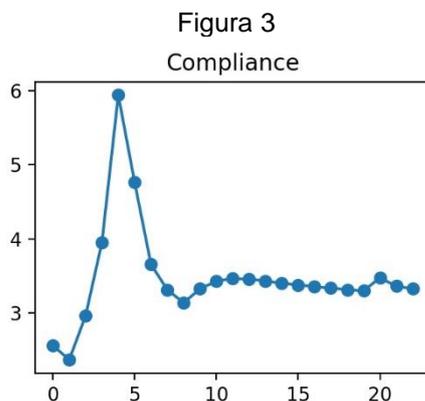


Figura 3 – Gráfico de *compliance* por iteração para o exemplo numérico Console utilizando SESO_RBTO.

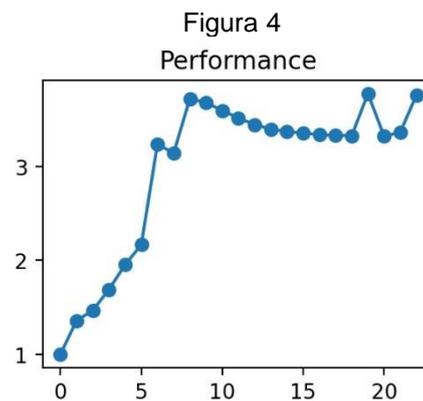


Figura 4 – Gráfico de índice de performance por iteração para o exemplo numérico Console utilizando SESO_RBTO.

Exemplo 2 – Viga MBB

As análises foram realizadas para uma viga MBB (ou viga de Messerschmidt-Bölkow-Blohm) com raio mínimo de 1,5 e com os seguintes valores de comprimento, altura e espessura:

- $L_x = 120$
- $L_y = 20$
- $L_z = 20$

O domínio de projeto e as condições de contorno para a Viga MBB são apresentados na Figura 5.

Figura 5

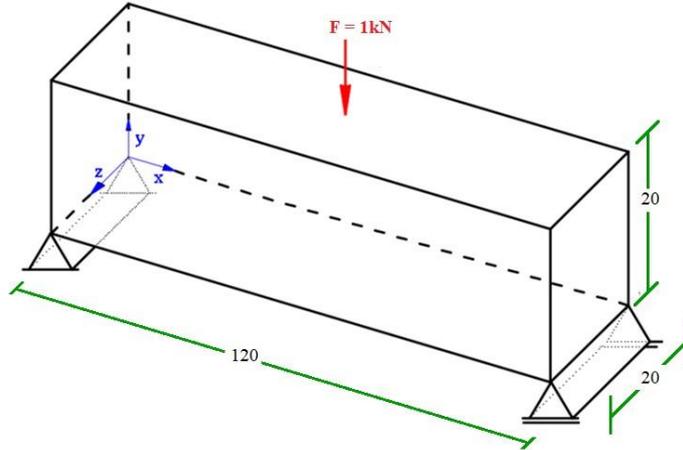


Figura 5 – Domínio de projeto e condições de contorno.

A Figura 6 mostra a topologia ótima encontrada fazendo-se uso do método evolucionários SESO e de otimização baseada em confiabilidade RBTO em uma visão frontal. A figura 7 mostra a mesma estrutura, em perfil.

Figura 6

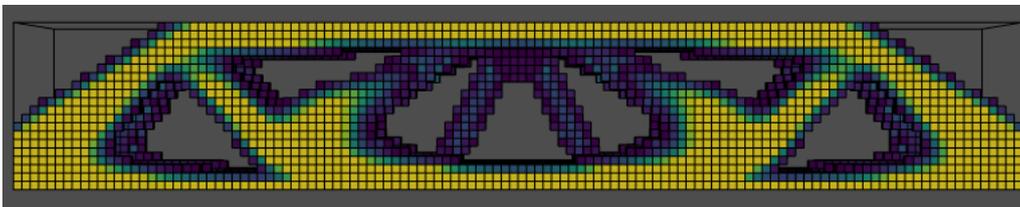


Figura 6 – Configuração ótima para o exemplo Viga MBB utilizando SESO_RBTO, em visão frontal.

Figura 7

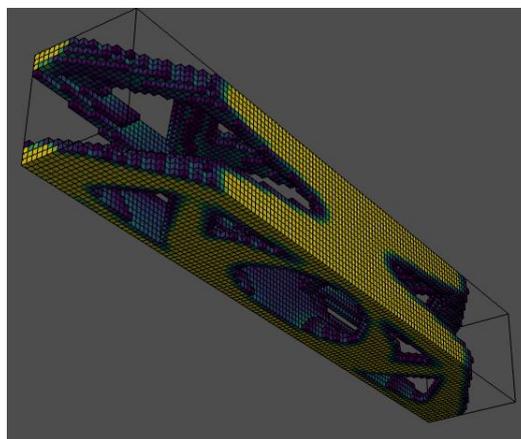


Figura 7 – Configuração ótima para o exemplo Viga MBB utilizando SESO_RBTO, em perfil.

A Figura 8 apresenta o gráfico que exibe a evolução dos valores de *compliance* conforme o número de iterações e a Figura 9 apresenta o gráfico que mostra a variação dos valores de índice de performance conforme o número de iterações.

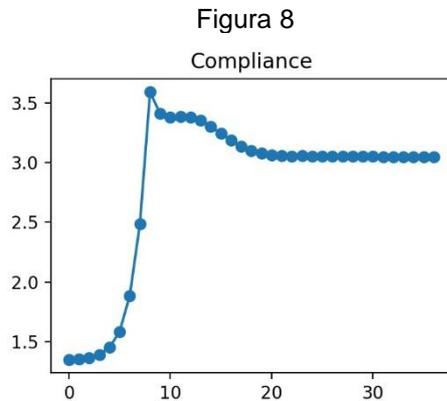


Figura 8 – Gráfico de *compliance* por iteração para o exemplo numérico Viga MBB utilizando SESO_RBTO.

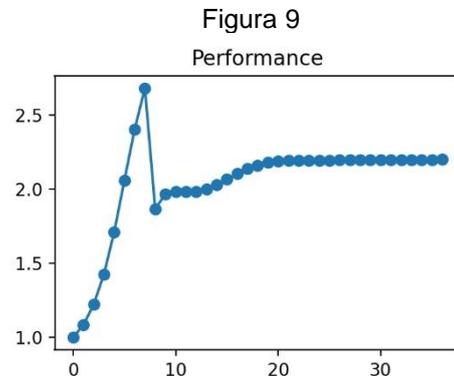


Figura 9 – Gráfico de índice de performance por iteração para o exemplo numérico Viga MBB utilizando SESO_RBTO.

Os resultados obtidos, quando comparados aos observados na literatura, apresentaram bons índices de performance e *compliance*, com as estruturas geradas sendo semelhantes às de referência.

CONCLUSÕES:

Este resumo expandido descreve os resultados obtidos com o uso do método de otimização topológica SESO e de otimização topológica baseada em confiabilidade estrutural RBTO. O método foi implementado fazendo-se uso da linguagem de programação Python e das bibliotecas numéricas NumPy e SciPy. O código construído foi usado na realização de testes com exemplos numéricos e uma análise inicial do resultado foi realizada. Além dos resultados apresentados, pretende-se, realizar mais testes com exemplos numéricos e fazer uma comparação dos resultados obtidos com exemplos da literatura, além da confecção de artigos técnicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- Allen M, Rauli M, Maute K, Frangopol DM (2004) **Reliability-based analysis and design optimization of electrostatically actuated MEMS**. Comp Struc 82(13–14):1007–1020.
- Chen S, Chen W, Lee S (2010) **Level set based robust shape and topology optimization under random field uncertainties**. Struct Multidiscip Optim 41(4):507–524
- Guest JK, Igusa T (2008) **Structural optimization under uncertain loads and nodal locations**. Comput Methods Appl Mech Eng 198(1):116–124
- Kang J, Kim C, Wang S (2004) **Reliability-based topology optimization for electromagnetic systems**. COMPEL: Int J Comput Math Elec Electron Eng 23(3):715–723.
- Kharmanda, G., Olhoff, N., Mohamed A. and Lemaire M., **Reliability-based topology optimization**, Struct. Multidisc. Optim. 26 (2004) 295–307.
- Kim C, Wang S, Rae K, Moon H, Choi KK (2006) **Reliability-based topology optimization with uncertainties**. J Mech Sci Technol 20(4):494–504
- Liu, K., Paulino, G.H. and Gardoni, P., **Reliability-based topology optimization using a new method for sensitivity approximation - application to ground structures**, Struct Multidisc Optim (2016) 54:553–571.

- Liu, Kai, and Andrés Tovar. **An efficient 3D topology optimization code written in Matlab.** Structural and Multidisciplinary Optimization 50.6 (2014): 1175-1196.
- Lógó J, Ghaemi M, Rad MM (2009) **Optimal topologies in case of probabilistic loading: the influence of load correlation.** Mech Based Design Struc Mach 37(3):327–348.
- López, C., Baldomir, A., & Hernández, S. (2018). **The relevance of reliability-based topology optimization in early design stages of aircraft structures.** Structural and Multidisciplinary Optimization, 57(1), 417-439.
- Luo Y, Kang Z, Luo Z, Li A (2009) **Continuum topology optimization with non-probabilistic reliability constraints based on multi-ellipsoid convex model.** Struct Multidiscip Optim 39(3):297–310
- Maute K, Frangopol DM (2003) **Reliability-based design of MEMS mechanisms by topology optimization.** Comp Struct 81(8–11): 813–824
- Millman, K. J. and Aivazis M.; **Python for Scientists and Engineers**, in Computing in Science & Engineering, vol. 13, no. 2, pp. 9-12, March-April 2011, doi: 10.1109/MCSE.2011.36.
- Rozvany GIN (2008) **Exact analytical solutions for benchmark problems in probabilistic topology optimization.** In: EngOpt 2008—international conference on engineering optimization, Rio de Janeiro.
- Sigmund O (2001) **A 99-line topology optimization code written in matlab.** Structural and Multidisciplinary Optimization 21(2):120–127.
- Simonetti, Hélio L.; Almeida, V. S.; Neto, Lutgardes O.; Neves, F. A. **Optimal strut-and-tie models using smooth evolutionary structural optimization.** Revista CIATEC-UPF, v.8, p.34, 2016.
- Simonetti, Hélio L.; Almeida, Valério S.; De Oliveira Neto, Lutgardes. **A smooth evolutionary structural optimization procedure applied to plane stress problem.** Engineering Structures, v. 75, p. 248-258, 2014.
- Simonetti, Hélio Luiz. **Otimização topológica de estruturas elásticas 2D via MEC baseada em uma nova abordagem evolucionária.** 2016. 143 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.
- Simonetti, HL; Almeida, V.S.; De Assis das Neves, Francisco. **Smoothing evolutionary structural optimization for structures with displacement or natural frequency constraints.** Engineering Structures, v. 163, p. 1-10, 2018.
- Sullivan et al., (2019). **PyVista: 3D plotting and mesh analysis through a streamlined interface for the Visualization Toolkit (VTK).** Journal of Open Source Software, 4(37), 1450.
- Torres, I. F. R. (2003). **Desenvolvimento e aplicação do método dos elementos finitos generalizados em análise tridimensional não-linear de sólidos.** Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Tovar et al, **Topology Optimization Using a Hybrid Cellular Automaton Method With Local Control Rules,** Journal of Mechanical Design, Vol. 128, November 2006.
- Xie, Y.M.; Steven, G.P. **A simple evolutionary procedure for structural optimization,** Computers & Structures, Vol. 49, n. 5, p. 885-896, 1993.
- Zhao, Qinghai, et al. **Reliability-based topology optimization using stochastic response surface method with sparse grid design.** Mathematical Problems in Engineering 2015 (2015).

Participação em Congressos, publicações e/ou pedidos de proteção intelectual:

Os resultados desta pesquisa serão submetidos ao congresso internacional CILAMCE-2021 que será realizado no Rio de Janeiro.

Um destaque importante é a inovação relacionada a implementação do método SESO na linguagem Python.