

OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA TRIDIMENSIONAL BASEADA EM CONFIABILIDADE ESTRUTURAL UTILIZANDO ESO EM PYTHON

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

1 Aline Renata Mateus Madruga, Bolsista (CNPq, IFMG), ECA, IFMG Campus Betim;
2 Higor Eduardo Vieira Oliveira Prado, 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

Na área de otimização estrutural, o campo de estudos da otimização topológica pode ser importante na definição de estruturas ótimas para projetos de engenharia. Existem métodos de otimização topológica que levam em conta a análise probabilística e as incertezas associadas às variáveis relacionadas ao projeto, como o método de otimização baseado em confiabilidade (RBTO). Esse método pode ser aplicado antes da utilização do método evolucionário de otimização (ESO), que remove, a cada iteração, elementos que não contribuam para um estado ótimo da estrutura. Este trabalho utilizou os métodos RBTO e ESO no como base para o desenvolvimento de um código em Python para a determinação de exemplos numéricos clássicos (L-Shaped e Plataforma), com apresentação dos valores de compliance e índice de confiabilidade a cada iteração, para cada estrutura, com boa acurácia em relação aos exemplos descritos na literatura.

INTRODUÇÃO:

A Otimização Estrutural (OE) é importante para o design e fabricação de projetos mecânicos. A Otimização Topológica (OT) é um campo de pesquisa da OE que tem como objetivo identificar qual a distribuição ótima de material em uma estrutura de forma a maximizar seu desempenho mecânico, dentro de condições preestabelecidas. A OT tem aplicações práticas relevantes nas indústrias aeroespacial e automotiva, e tem se tornado um método importante na Indústria 4.0 e em Manufatura Aditiva.

Utilizando MatLab, Sigmund (2001) desenvolveu um código para otimização topológica bidimensional que utiliza como filtro loops aninhados, e critérios de otimização sujeitos à sensibilidade de uma função objetivo. O código, conhecido como 99-line, foi considerado por Liu e Tovar (2014) como legível e bem organizado, mas lento para problemas maiores. Assim, apresentaram um código para a otimização topológica de estruturas tridimensionais (3D), utilizando a técnica Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP).

Segundo Liu e Tovar (2014), como a OT gera estruturas sem partir de formas preconcebidas, é um método que encontra layouts estruturais inovadores e de alta performance, contribuindo para o projeto conceitual da estrutura. Assim, além da confiabilidade estrutural, a OT também pode ser útil na criação de design estrutural, o que chama a atenção de engenheiros e matemáticos para os algoritmos de OT (Liu e Tovar, 2014).

A técnica de OT chamada Otimização Estrutural Evolucionária (do inglês, Evolutionary Sctructural Optimization, ou ESO) altera a topologia de uma estrutura por meio da remoção gradual de elementos finitos de uma malha. Após a remoção, a estrutura é avaliada sob determinadas restrições, e a cada iteração a estrutura evolui em direção a um estacionário ideal para o projeto mecânico em questão.

A Otimização Topológica Determinística (do inglês, Deterministic Topological Optimization, ou DTO) não é capaz de avaliar as incertezas relacionadas às variáveis envolvidas no projeto durante o procedimento iterativo. Já a técnica de Otimização Topológica Baseada em Confiabilidade (do inglês, Reliability-based Topological Optimization, ou RBTO) incorpora variáveis relacionadas a restrições probabilísticas no processo de otimização de uma estrutura, bem como suas incertezas com a finalidade 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 tridimensionais 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 expandido apresenta a análise RBTO utilizando a nova implementação proposta na linguagem Python acoplada ao método evolucionário ESO 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 disso, é feito 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 ESO descrito em Simonetti (2016) após a utilização do método RBTO, o que configura uma aplicação de método híbrido para otimização topológica, com confiabilidade estrutural.

Com base nos trabalhos de Torres (2003) e de Liu e Tovar (2014) foram formuladas análises de elementos finitos tridimensionais, e a implementação de seu cálculo numérico. Essa última teve como referência o código MatLab desenvolvido por Sigmund (2001), que foi utilizado e modificado por Liu et al. (2014) e Simonetti et al. (2014, 2016).

Neste trabalho foi construído código na linguagem de programação Python, com as bibliotecas numéricas NumPy e SciPy para otimização topológica com análise de confiabilidade estrutural. O código foi testado com exemplos numéricos (L-Shaped e Plataforma), e as estruturas encontradas foram plotadas com uso 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 evolucionária ESO e de otimização topológica baseada em confiabilidade (RBTO).

A técnica utilizada para se evitar instabilidades numéricas foi o filtro de função do raio mínimo de influência. Nesse filtro, o valor do raio é diretamente proporcional ao número de elementos dentro da esfera de influência.

Além disso, utilizou-se o método do Gradiente Conjugado Pré-condicionado (PCG) para resolver o sistema linear gerado na equação de equilíbrio, evitando, assim, o problema de memória computacional nos problemas de grande escala.

Segundo Sullivan et al. (2019), a biblioteca PyVista melhora a visualização dos dados, então ela foi utilizada para a plotagem dos resultados das estruturas encontradas. Os seguintes exemplos numéricos foram analisados:

Exemplo 1 - L-Shaped

Neste exemplo numérico, as análises foram feitas para uma estrutura L-Shaped (ou “com formato de L”) com raio mínimo de 1,6 e com as seguintes dimensões de comprimento (Lx), altura (Ly) e espessura (Lz):

- Lx = 40
- Ly = 40
- Lz = 20

A estrutura ótima encontrada pode ser observada na Figura 1. Para a determinação dessa estrutura foi feito uso da técnica ESO em conjunto com o RBTO.

Figura 1

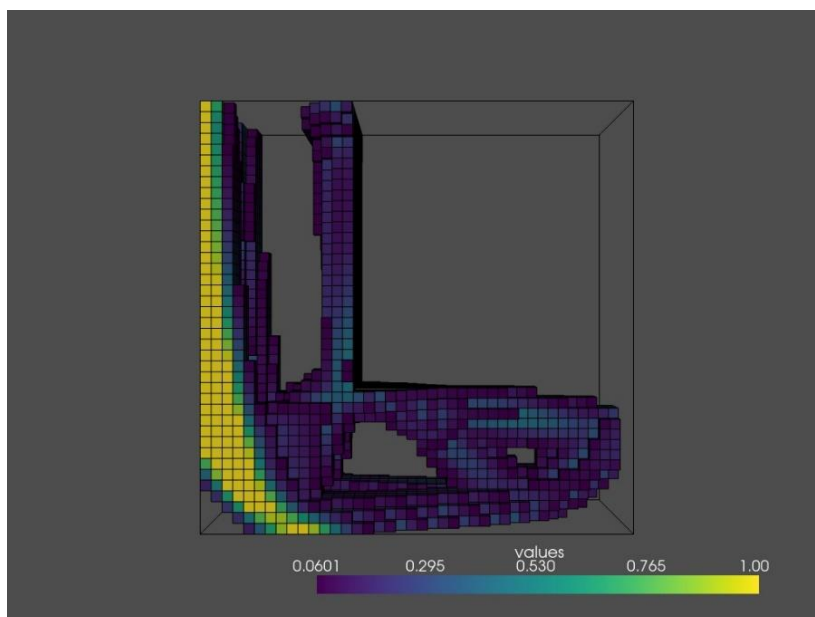


Figura 1 – Estrutura ótima encontrada para o exemplo numérico L-*Shaped* utilizando RBTO_ESO.

A Figura 2 mostra o gráfico com a evolução dos valores de compliance no decorrer do processo iterativo. O Figura 3 mostra o gráfico com a variação dos valores do índice de performance a cada iteração

Figura 2

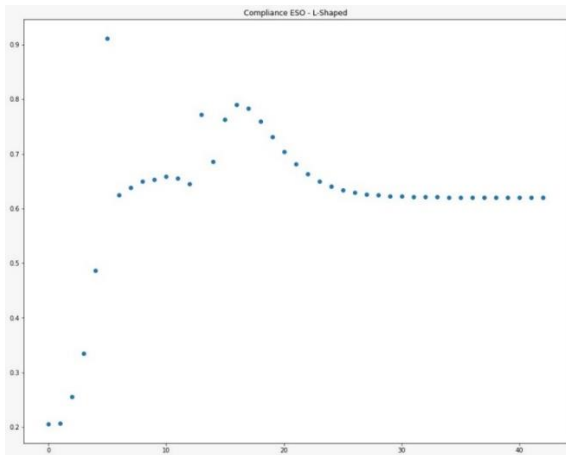


Figura 2 – Gráfico de *compliance* por iteração para o exemplo numérico L-Shaped utilizando RBTO_ESO.

Figura 3

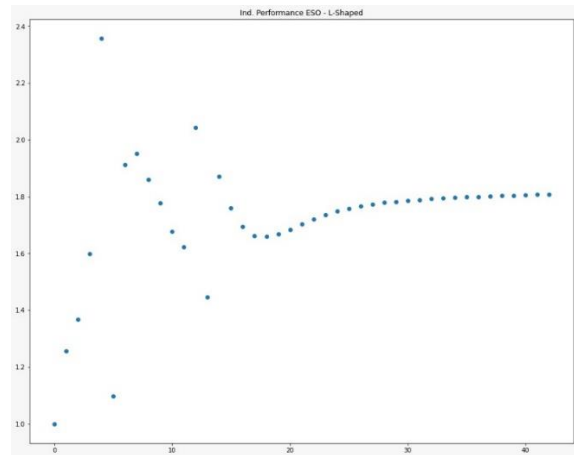


Figura 3 – Gráfico de índice de performance por iteração para o exemplo numérico L-Shaped utilizando RBTO_ESO.

Exemplo 2 – Plataforma

As análises foram realizadas para uma Plataforma com raio mínimo de 1,5 e com os seguintes valores de comprimento, altura e espessura:

- $L_x = 80$
- $L_y = 40$
- $L_z = 80$

A Figura 4 mostra a topologia ótima encontrada fazendo-se uso do método evolucionário ESO e de otimização baseada em confiabilidade RBTO em visão frontal, e as Figuras 5 e 6 mostram a mesma estrutura por outros ângulos.

Figura 4

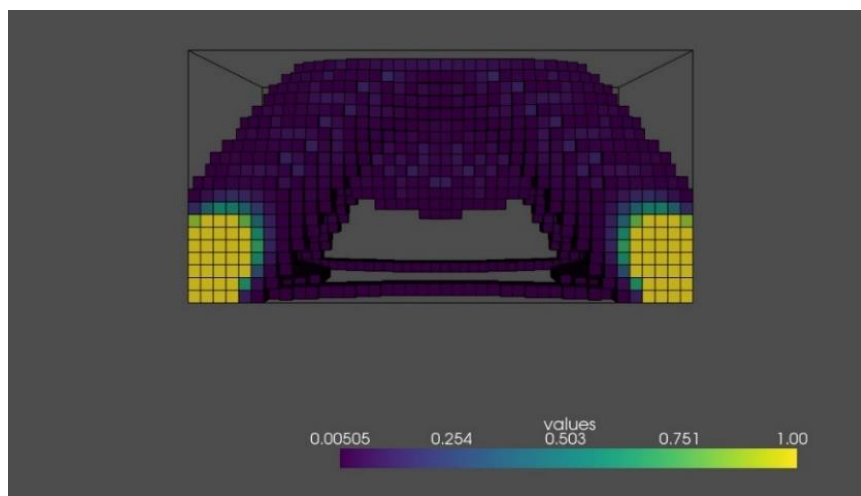


Figura 4 – Estrutura ótima encontrada para o exemplo numérico Plataforma utilizando RBTO_ESO, em visão frontal.

Figura 5

Figura 6

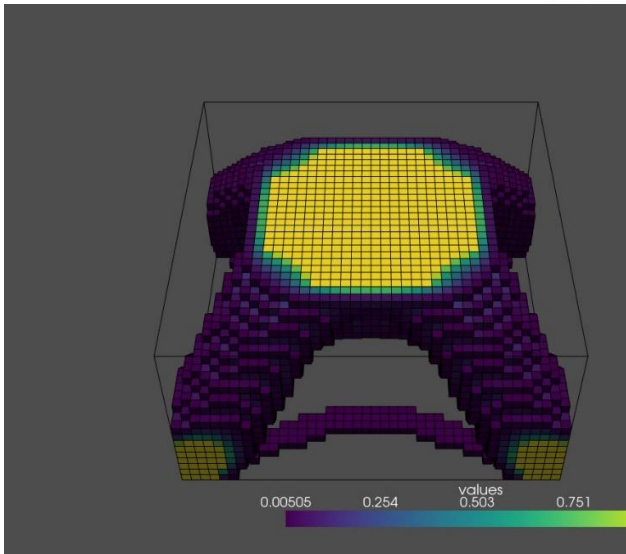


Figura 5 – Estrutura ótima encontrada para o exemplo numérico Plataforma utilizando RBTO_ESO, em perfil (1).

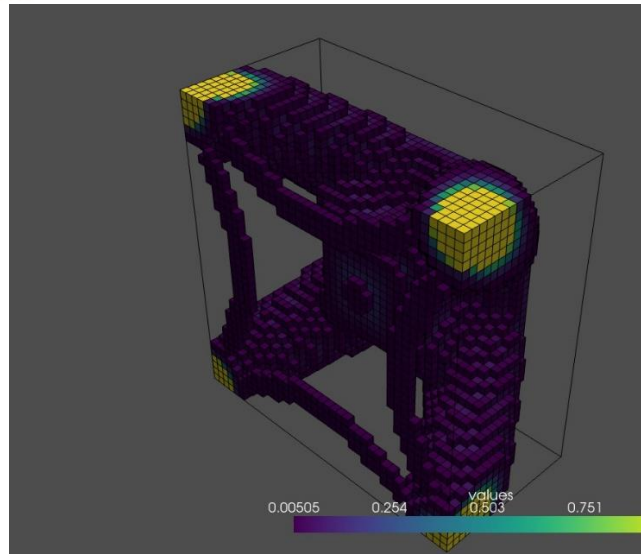


Figura 6 – Estrutura ótima encontrada para o exemplo numérico Plataforma utilizando RBTO_ESO, em perfil (2).

A Figura 7 apresenta o gráfico que exibe a evolução dos valores de compliance conforme o número de iterações, e a Figura 8 apresenta o gráfico que mostra a variação dos valores de índice de performance conforme o número de iterações.

Figura 7

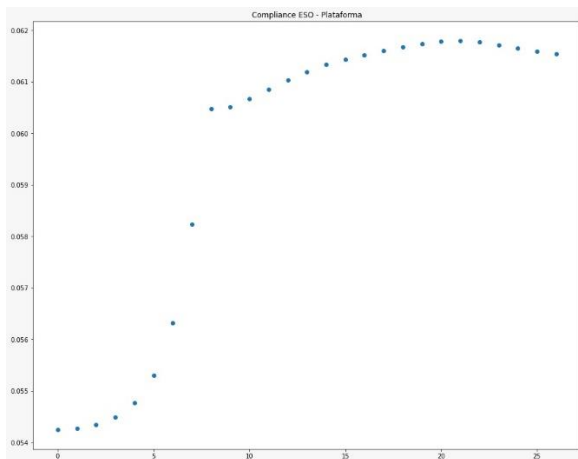


Figura 7 – Gráfico de *compliance* por iteração para o exemplo numérico Plataforma utilizando RBTO_ESO.

Figura 8

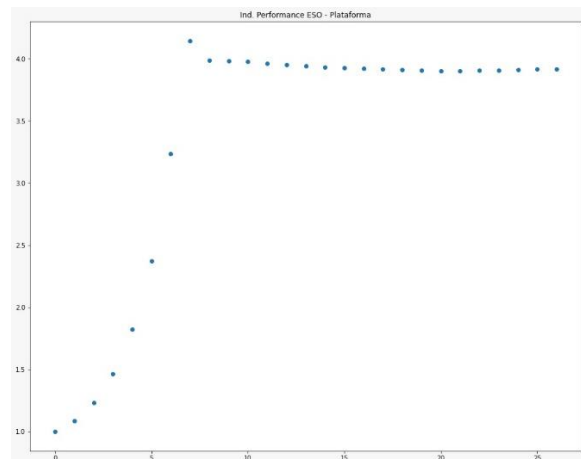


Figura 8 – Gráfico de índice de performance por iteração para o exemplo numérico Plataforma utilizando RBTO_ESO.

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:

Neste resumo expandido foram apresentadas as estruturas obtidas para os exemplos numéricos L-Shaped e Plataforma com o uso do método de otimização topológica evolucionária ESO e de otimização topológica baseada em confiabilidade estrutural RBTO. Os métodos foram implementados fazendo-se uso da linguagem de programação Python e das bibliotecas numéricas NumPy e SciPy. Foi apresentada análise inicial dos resultados encontrados.

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, Luttgardes 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, Luttgardes. **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 ESO na linguagem Python.