
Edital Nº 04/2022

Título do projeto: ESTUDO DO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA EM ESTRUTURAS BIDIMENSIONAIS VIA FORMULAÇÃO HÍBRIDA-MISTA DE TENSÃO.

Palavras-chave do projeto: **Método dos Elementos Finitos; Formulação Híbrida-Mista de Tensão, Otimização Topológica.**

Área de conhecimento do projeto: Engenharia de Estruturas/Métodos Numéricos

Declaração de Interesse por Bolsa

Declaro que o aluno *associado a este projeto* nos termos do edital *Nº 04/2022* deseja participar do programa de Iniciação Científica como: *bolsista*.



Sumário

Resumo	3
1. Introdução Contextualizada do Projeto	4
2. Objetivos e Metas	7
3. Metodologia	8
4. Cronograma	9
5. Referências Bibliográficas e Bibliografia Básica do Projeto	10

Resumo

Ao longo das últimas décadas, o Método de Otimização de Topologia (MOT), que combina o Método dos Elementos Finitos (MEF) com um algoritmo de otimização para encontrar a distribuição ótima de material no interior do domínio de projeto da estrutura, tornou-se um dos métodos mais populares na indústria e na academia como ferramenta de projeto mecânico para projetos conceituais. Apesar de sua maturidade, apenas recentemente pesquisadores propuseram a adoção de formulações não convencionais do MEF para lidar, por exemplo, com a presença de restrições de tensão e problemas como padrão de tabuleiro de xadrez (ou “checkerboard pattern” em inglês) na Otimização de Topologia (OT). Assim, o presente projeto vai explorar uma formulação alternativa para a OT, no sentido de avaliar problemas planos com restrição de tensão e padrão de tabuleiro de xadrez. A formulação não convencional do MEF adotada nesta pesquisa e aplicada no MOT será a Formulação Híbrido-Mista de Tensão (FHMT). Na FHMT as tensões, os deslocamentos no domínio e o campo de deslocamento no contorno estático são as variáveis principais e aproximadas simultaneamente. Por fim, para avaliação da aplicabilidade da FHMT no MOT serão desenvolvidos experimentos numéricos em MatLab®.

Palavras-chave do projeto: **Formulação Híbrido-Mista de Tensão, Otimização Topológica, Problema com Restrição de Tensão.**

1. Introdução Contextualizada do Projeto

A Otimização Topológica (OT) é um ramo de pesquisa, dentro da ótica dos processos de otimização, que tem como objetivo o projeto da topologia ótima de estruturas por meio da remoção sistemática de material do domínio de projeto segundo um determinado conjunto de critérios de projeto, podendo estes ocorrer, por exemplo, via busca pela maior razão resistência/peso da estrutura ou a restrição do projeto a um limite de tensão ou deslocamento. Apesar de a OT ser um tema relativamente recente no campo da otimização estrutural, seus conceitos básicos foram estabelecidos há mais de um século, conforme visto em ROZVANY et al. (1995).

Sua principal vantagem, em contraste com os métodos tradicionais de otimização – como, por exemplo, a otimização de forma ou a otimização paramétrica – é sua capacidade de alteração do *layout* original da estrutura, auxiliando a elaboração do projeto em sua fase conceitual. Além disso, o mesmo facilita a modelagem de materiais submetidos a certas condições de projeto, uma vez que é necessário apenas o conhecimento prévio das cargas a serem aplicadas e das condições de contorno do mesmo – explicando assim sua aplicabilidade e grande utilização nas indústrias do mundo todo, variando desde a área de estruturas mecânicas até o projeto de implantes biomecânicos.

O Método de Otimização Topológica (MOT) trabalha com a variação de domínio – identificando as conexões e membros internos requeridos pelas condições iniciais de projeto – em busca da distribuição ótima de material, e, dentro da ótica de meios contínuos, pode ser subdividido em duas vertentes – a abordagem baseada no material (micro), ou na geometria (macro) – conforme apresentado em ESCHENAUER e OLHOFF (2001).

Dentro da abordagem micro, pode-se citar o método SIMP (*Simple Isotropic Material with Penalization* - BENDSØE (1989); ROZVANY et al. (1995)) . Na abordagem macro, as principais metodologias de solução são baseadas no ESO (*Evolutionary Structural Optimization*), que é fundamentado no cálculo da função objetivo quando um elemento é removido da malha de elementos finitos e TSA (*Topological Sensitivity Analysis*), estruturado em uma função escalar, denominada derivada topológica, que fornece para cada ponto do domínio de definição do problema a sensibilidade da função custo quando um pequeno furo é criado.

Atualmente, o MOT tem se mostrado bastante robusto, lidando com problemas industriais de grande porte e problemas multi-físicos; entretanto, problemas recentes estão envolvendo cenários mais complexos como problemas de meios incompressíveis e restrições de tensão (BRUGGI; CINQUINI, 2009; BRUGGI; VENINI, 2007, 2008; SIGMUND; CLAUSEN, 2007), que estão surgindo algumas limitações do MOT, não só em termos de instabilidades numéricas inerentes ao método como o padrão de tabuleiro de xadrez (checkboard), dependência de malha e mínimos locais, mas também instabilidades e limitações do Método dos Elementos Finitos (MEF), em termos de descrição do comportamento do material, por exemplo, o problema de travamento ao analisar meios incompressíveis e a descrição do campo de tensões, que em geral é o campo de interesse em aplicações de engenharia.

Dentro desse cenário, muitos trabalhos têm sido realizados nas últimas décadas para desenvolver novos filtros para lidar com problemas de instabilidades (BOURDIN, 2001; SVANBERG; SVÄRD, 2013) e também novas metodologias para lidar com restrições de tensão e de fabricação (BRUGGI, 2008a; LE, 2006; NAVARRINA et al., 2015; YANG; CHEN, 1996), mas só recentemente mais atenção está sendo dada aos métodos numéricos aplicados com MOT. Nesse sentido, pesquisadores começaram a desenvolver e estudar a aplicação de formulações não convencionais do MEF para melhorar a aplicabilidade e desempenho do MOT.

Permanecendo no campo de formulações não convencionais, duas abordagens têm sido aplicadas no MOT para lidar com padrões de checkboard e restrições de tensão: O Método dos Elementos Finitos Generalizados (GFEM) e a chamada Formulação Mista. A primeira, que é utilizada em ARRUDA (2015) e ARRUDA et. al (2022), considera enriquecimentos nodais para controlar regiões de checkboard no layout final ótimo com resultados satisfatórios. O segundo, utilizado em (BRUGGI, 2016), considera uma formulação mista do método dos elementos finitos, que aproxima o deslocamento e os campos de tensão de forma independente ao mesmo tempo, e foi utilizado para obter layouts livres de checkboard e também para lidar com restrições de tensão (BRUGGI; CINQUINI, 2009; SIGMUND; CLAUSEN, 2007). A principal desvantagem das formulações mistas é o custo computacional devido ao incremento de variáveis no sistema.

Nesse sentido, o presente trabalho vem contribuir para a aplicação da Formulação Híbrido-Mista de Tensão (FHMT) em MOT (FHMT-MOT) por meio de experimentos numéricos desenvolvidos em MatLab® e que utilizam o trabalho de NAVARRO (2018) como referência principal. Introduzido por (DE FREITAS; DE ALMEIDA; PEREIRA, 1996) a FHMT aproxima independentemente a tensão e o deslocamento no domínio do elemento finito e o deslocamento também na fronteira. A principal característica desta formulação é a precisão da aproximação de tensão em comparação com a formulação baseada em deslocamento, que pode

ser muito útil para problemas de otimização com restrições de tensão locais ou globais. Apesar de não ser tão popular quanto o MEF clássico, esta formulação tem sido constantemente estudada para tratar de problemas lineares e não lineares (FILIPE; LUZ, 2013) e também para melhorar o tempo de CPU para resolver o sistema resultante em problemas tridimensionais (VICENTE DA SILVA; CASTRO; PEREIRA, 2015), que hoje é o principal motivo da não popularidade da FHMT na indústria e no meio acadêmico.

2. Objetivos e Metas

Este trabalho visa o estudo e implementação do MOT via FHMT, partindo dos resultados do trabalho de NAVARRO (2018), analisando os possíveis impactos desse método na distribuição final de material no interior do domínio de projeto, quando comparado com os resultados da literatura.

Por fim, com este trabalho, deseja-se ainda possibilitar ao candidato:

Contato inicial com um dos métodos numéricos mais utilizados no estudo de componentes estruturais – MEF;

Contato com versão não-convencional do MEF – FHMT;

Contato com elementos teóricos básicos da Teoria da Elasticidade e do MOT;

Utilização do MatLab[®] na análise de problemas de Otimização Topológica com a FHMT.

3. Metodologia

As atividades seguintes referem-se basicamente à implementação de alguns elementos no programa já desenvolvido por NAVARRO (2018).

Assim, o desenvolvimento do projeto está organizado nas seguintes etapas:

- Revisão Bibliográfica e início da metodologia: Revisão bibliográfica da temática geral do trabalho – Aplicação de formas não-convencionais em MOT e aspectos Gerais da Teoria da Elasticidade, Otimização Topológica, MEF, e FHMT;
- Estudo de elementos matemáticos relativos à FHMT;
- Implementação computacional, na linguagem MatLab[®], para análise do MOT via FHMT;
- Análises numéricas do MOT via FHMT.

OBS: Para execução deste projeto de Iniciação Científica será necessário a utilização de um computador. Tal computador já foi adquirido com verba de projeto de pesquisa aprovado pelo CNPq - Processo: 471291/2013-7 - Título do Projeto: SOBRE A ESTABILIDADE DA SOLUÇÃO NUMÉRICA DE FORMULAÇÕES NÃO-CONVENCIONAIS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.

4. Cronograma

As atividades seguintes referem-se basicamente a implementações no programa desenvolvido por NAVARRO (2018).

[illegible]

5. Referências Bibliográficas e Bibliografia Básica do Projeto

ARRUDA, L. S. DE. (2015). **Aplicação do método dos elementos finitos generalizados (mefg) em otimização topológica**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do ABC.2015.

ARRUDA, L. S. DE.; MARTIM, M. B.; GÓIS, W.; LIMA, C. R. (2022). Topology Optimization – unconventional approaches using the Generalized Finite Element Method and the Stable Generalized Finite Element Method. **Latin American Journal of Solids and Structures**, Vol. 19 No. 3 (2022).

BABUŠKA, I.; MELENK, J. M. (1997). The partition of unity method. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 40, p. 727-758.

BABUŠKA, I. et al. (1996). Finite element method for solving problems with singular solutions. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, v.74, p. 51-70.

BATHE, K. J. (1996). **Finite element procedures**. 2.ed. New Jersey: Prentice-Hall.

BENDSØE, M.P. (1989). **Optimal shape design as a material distribution problem**. Structural optimization 1:193-202.

BENDSØE, M.P.; SIGMUND, O. (2003). **Topology optimization: theory, methods and applications**. Springer.

BOURDIN, B. Filters in topology optimization. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 50, n. 9, p. 2143–2158, 2001.

BRUGGI, M. Topology optimization with mixed finite elements on regular grids. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 305, p. 133–153, 2016.

BRUGGI, M. On an alternative approach to stress constraints relaxation in topology optimization. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 36, n. 2, p. 125–141, 2008a.

BRUGGI, M.; CINQUINI, C. An alternative truly-mixed formulation to solve pressure load problems in topology optimization. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 198, n. 17–20, p. 1500–1512, 2009.

BRUGGI, M.; VENINI, P. Topology optimization of incompressible media using mixed finite elements. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 196, n. 33–34, p. 3151–3164, 2007.

BRUGGI, M.; VENINI, P. A mixed FEM approach to stress-constrained topology optimization. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 73, n. 12, p. 1693–1714, 2008.

DE FREITAS, J. A. T.; DE ALMEIDA, J. P. M.; PEREIRA, E. M. B. R. Non-conventional formulations for the finite element method. **Structural Engineering and Mechanics**, v. 4, n. 6, p. 655–678, 1996.

FILIFE, M.; LUZ, D. S. Modelos Híbridos-Mistos de Tensão Para a Análise de Estruturas de Betão Armado Engenharia Civil Júri. 2013.

ESCHENAUER, H.A.; OLHOFF, N. (2001). **Topology optimization of continuum structures: A review**. Appl. Mech. Rev. 54(4), 331–390.

LE, C. H. Achieving minimum length scale and design constraints in topology optimization: a new approach. p. 107, 2006.

NAVARRINA, F. et al. Minimum Weight with Stress Constraints Topology Optimization. v. 67, n. October, 2015.

NAVARRO, L. S. DE. (2018). Application of hybrid-mixed stress formulation on topology optimization. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do ABC.

PETTERSON, J.; SIGMUND, O. (1998). **Slope Topology Optimization**. Int. J. Numer. Meth. Engng., v.41(8),1417-34.

ROZVANY, G.I.; BENDSØE, M.P.; KIRSCH, U. (1995). **Layout optimization of structures**. Applied Mechanics Review, v. 48, p. 41-119.

SVANBERG, K.; SVÄRD, H. Density filters for topology optimization based on the geometric and harmonic means. **Mae.Ufl.Edu**, p. 1–10, 2013.

SIGMUND, O. (2001). **A 99 line topology optimization code written in MATLAB**. Structural and Multidisciplinary Optimization 21:120-127.

SIGMUND, O.; CLAUSEN, P. M. Topology optimization using a mixed formulation: An alternative way to solve pressure load problems. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 196, n. 13–16, p. 1874–1889, 2007.

VICENTE DA SILVA, M.; CASTRO, L. M. S.; PEREIRA, E. M. B. R. On the parallel implementation of a hybrid-mixed stress formulation. **Computers & Structures**, v. 158, p. 71–81, 2015.

YANG, R. J.; CHEN, C. J. Stress-based topology optimization. **Structural Optimization**, v. 12, n. 2–3, p. 98–105, 1996.