# OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DE DISPOSITIVOS MAGNÉTICOS

Fernando Junior Piana; Beatriz Bennert Felipe; Eduardo Lenz Cardoso

## INTRODUÇÃO

No desenvolvimento de dispositivos de ancoragem magnética, a redução da massa deve ser conciliada com a manutenção da capacidade de adesão e com as condições magnéticas dos materiais empregados. Dispositivos baseados em ímãs permanentes apresentam vantagens como elevada força de adesão, baixo consumo de energia e estabilidade operacional (Jin et al., 2025). Entretanto, o desempenho desses dispositivos depende de parâmetros tais como a disposição e as dimensões dos ímãs e dos componentes ferromagnéticos. Além disso, o aumento das dimensões dos ímãs pode elevar a força de adesão, mas também aumenta a massa do dispositivo (Song et al., 2018).

Torna-se relevante buscar configurações que utilizem o material de forma eficiente. O presente trabalho propõe uma formulação de otimização topológica para minimizar a massa de uma pata magnética, mantendo uma força mínima de atração com o alvo ferromagnético e considerando simultaneamente a distribuição de ar, ferro e ímã, a orientação da magnetização e as restrições de força e intensidade do campo magnético.

## DESENVOLVIMENTO

Para cada elemento foram designadas duas variáveis escalares, de forma a obter a distribuição dos materiais conforme a Tabela 1. Para a orientação da magnetização foi incorporado um conjunto de variáveis de projeto por meio das componentes cartesianas de um vetor. Como uma orientação independente para cada elemento pode produzir uma configuração de difícil aplicação prática, os elementos podem ser agrupados em regiões que compartilham a mesma orientação.

A força de adesão é formulada a partir do tensor de tensões de Maxwell e utilizada como uma restrição normalizada em relação a força mínima requerida. Sua dependência das variáveis de projeto ocorre por intermédio do campo magnético e do potencial magnético. Para calcular as derivadas necessárias a otimização, utiliza-se a análise de sensibilidade pelo método adjunto. Também é estabelecida uma restrição para controlar a intensidade do campo magnético nos elementos identificados como ferro para evitar saturação magnética.

A programação linear sequencial (SLP) é empregada na resolução de problemas de otimização topológica onde o problema é resolvido iterativamente por meio de uma sequência de subproblemas lineares aproximados, obtidos pela linearização da função objetivo e das restrições utilizando expansões de Taylor de primeira ordem em torno do ponto de projeto atual (Sigmund e Torquato, 1997). Junto ao SLP são utilizados filtro espaciais, limites moveis e variáveis de folga com penalizações.

## RESULTADOS

A partir dessa formulação foram implementados dois programas utilizando a linguagem Julia, sendo o ***LMag*** [https://github.com/CodeLenz/LMag] para simulação de problemas de magnetostática utilizando o método dos elementos finitos e o ***LMagOpt*** [https://github.com/CodeLenz/LmagOpt.jl] para a otimização topológica.

A Figura 1 ilustra um exemplo de otimização de uma pata magnética para robôs escaladores. A Figura 1a indica a geometria do problema, em que o retângulo inferior é um alvo de ferro e os cinco retângulos são regiões de projeto em que a orientação deve ser comum a todos os elementos de cada região. A Figura 1b ilustra a distribuição otimizada de material, em que cor azul indica a presença de ímã e a cor vermelha indica ferro. A Figura 1c ilustra a orientação de magnetização em cada região e

a Figura 1d a intensidade de campo magnético resultante. O resultado obtido apresenta uma redução de massa de aproximadamente 50% em relação a massa de um projeto tradicional em que as regiões são totalmente preenchidas por ímã e por ferro, satisfazendo a restrição de força mínima e também a restrição de intensidade do campo magnético em regiões com ferro. A geometria da solução otimizada pode ser considerada um tipo de arranjo Halbach em que as orientações da magnetização em cada parte da região de projeto são diferentes. Isso pode ser visualizado tanto na Figura 1c quanto nas linhas de campo da Figura 1d.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo implementado se mostrou eficaz em minimizar a massa e obter uma configuração de distribuição de materiais e de orientações de magnetização que atendam às restrições de projeto. A formulação e a implementação computacional podem ser empregadas para o projeto otimizado de dispositivos magnéticos tanto em 2D quanto em 3D, permitindo obter arranjos inovadores e pouco intuitivos de distribuição de ferro/ímã.

**Palavras-chave:** Otimização topológica; Elementos finitos; Analise adjunta; Programação linear sequencial; Adesão magnética.

## ANEXOS

***Tabela 1**: Tabela 1. Interpretação do grupo de variáveis físicas.*

| $x_e$ | $y_e$ | |
|---|---|---|
| 0 | | Ar |
| 1 | 0 | Ímã Permanente |
| 1 | 1 | Ferro |

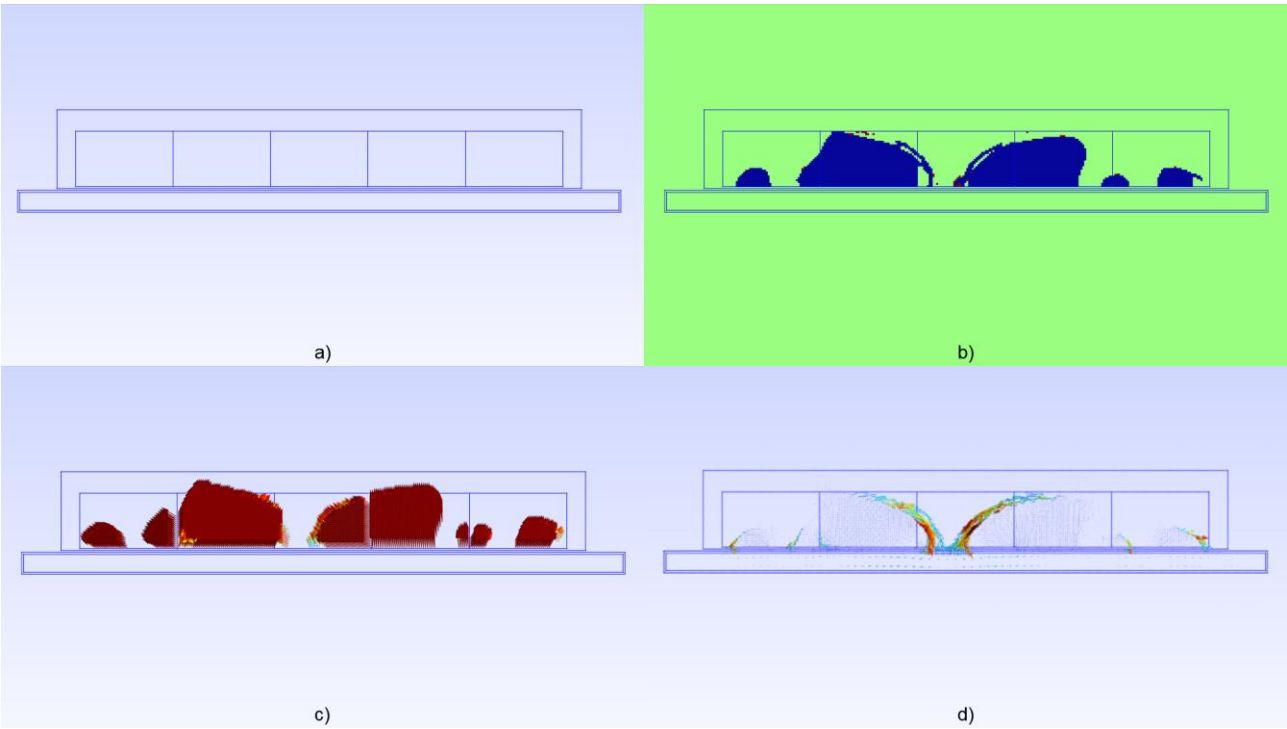



***Figura 1**: Figura 1. a) domínio de projeto. b) distribuição de material. c) orientação de magnetização. d)intensidade de campo magnético resultante.*

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

JIN, Z., GAO, X., YAN, L., & CHEN, X. (2018). Modeling and analysis of a magnetic adhesive mechanism for the crawler wall-climbing robot. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 112. DOI: 10.1007/s10846-025-02310-8.

SIGMUND, O., & TORQUATO, S. (1997). Design of materials with extreme thermal expansion using a three-phase topology optimization method. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 45(6), 1037–1067. DOI: 10.1016/S0022-5096(96)00114-7.

SONG, W., JIANG, H., WANG, T., JI, D., & ZHU, S. (2025). Design of permanent magnetic wheel-type adhesion-locomotion system for water-jetting wall-climbing robot. *Advances in Mechanical Engineering*,10(7), 1–11. DOI: 10.1177/1687814018787378.