

OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO DE UMA PRÓTESE DE CARBONO EPÓXI: UM ESTUDO COMPARATIVO

Hyan Cândido Guedes¹ (IC), Guilherme Ferreira Gomes (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá (Unifei)

Com o avanço da tecnologia e da computação diversos processos e produtos se desenvolveram para alcançar um melhor desempenho, menor custo e/ou menor gasto de material, entre outros. Desta forma, as próteses ortopédicas estão em constante evolução e hoje, juntamente com a descoberta de novos materiais, estão cada vez mais otimizadas. Sendo assim, este trabalho busca desenvolver e otimizar parametricamente uma prótese de alto desempenho de material compósito utilizando a estratégia de interpolação de spline e keypoints, espessura e quantidade de camadas, totalizando 16 variáveis de decisão. Além disso, avaliou-se, no processo de otimização, o desempenho de quatro diferentes otimizadores multiobjetivos: NSGA-II, MOLA, MOSFO e MOPSO. O estudo teve como funções objetivo a serem minimizadas a massa total e o índice de falha de Tsai-Wu avaliadas em duas diferentes condições de carregamento. Os resultados numéricos obtidos por meio do método dos elementos finitos e otimização levaram a diferentes frentes de Pareto convexas. O algoritmo MOPSO demonstrou ser, para este caso específico, o algoritmo mais robusto e a solução ótima escolhida apresentou desempenho superior em ambos objetivos de massa e índice de falha em relação ao modelo inicial.

Palavras-chave: Otimização multiobjetivo. Prótese. Compósitos. Elementos finitos.

Introdução

Com o avanço da tecnologia e da computação diversos processos e produtos se desenvolveram para alcançar um melhor desempenho, menor custo e/ou menor gasto de material, entre outros. Desta forma, as próteses ortopédicas estão em constante evolução e hoje, juntamente com a descoberta de novos materiais, estão cada vez mais otimizadas. Contudo, no campo das próteses de membros inferiores esse estudo ainda é escasso e ainda há muito o que se desenvolver.

Desta forma, o foco principal deste trabalho é desenvolver uma prótese de pé construída em fibra de carbono e otimizada parametricamente com o auxílio de softwares de simulação e de cálculos numéricos, que tenha uma combinação ótima entre resistência mecânica e leveza. O procedimento pode ser dividido nos seguintes tópicos:

- Desenvolvimento de um modelo numérico e parametrizado em elementos finitos;
- Aplicar condições de contornos adequadas;
- Acoplamento do modelo com os algoritmos de otimização: multiobjetivo de Lichtenberg (MOLA), segundo Pereira *et al.* 2021); genético multiobjetivo (MOGA), segundo Fonseca 1999; de enxame de partículas multiobjetivo (MOPSO), por James Kennedy e Russel Elberhart em 1995; e sunflower multiobjetivo (MOSFO), similar à sua versão monoobjetivo (Gomes *et al.*, 2019; Gomes &

Almeida, 2020);

- Obtenção do melhor design que minimize massa e o índice de falha de Tsai-Wu.

Metodologia

O modelo construtivo da prótese previamente definido foi de que a parte estrutural da prótese, ou seja, o objeto de estudo do presente trabalho, seria constituída de três tiras de fibra de carbono idênticas que seriam alocadas dentro de um pé impresso em 3D. Por esses motivos, as dimensões dessas tiras devem respeitar as dimensões do pé impresso. Além disso, a prótese será submetida às condições de carregamento i) no pé e ii) no calcanhar e, posteriormente, será analisada numericamente de modo a se obter as tensões e o índice de falha de Tsai-Wu.

A partir das considerações iniciais, foi criado um perfil de uma tira da prótese a partir de pontos aleatórios que gerassem um perfil visualmente semelhante ao de uma prótese. Feito isso, foram definidos limites de movimento para cada ponto e algumas dependências entre alguns pontos a fim de simplificar o modelo e facilitar sua simulação dentro dos otimizadores. A Figura 1 exibe a estratégia de parametrização por meio de *keypoints* e criação de uma spline.

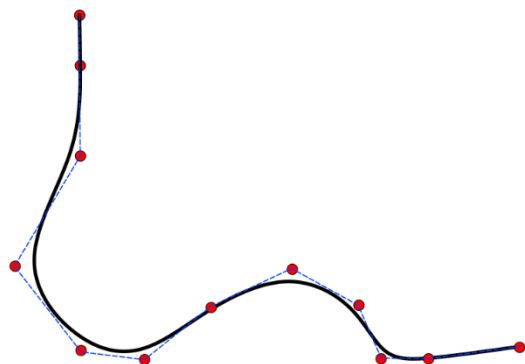
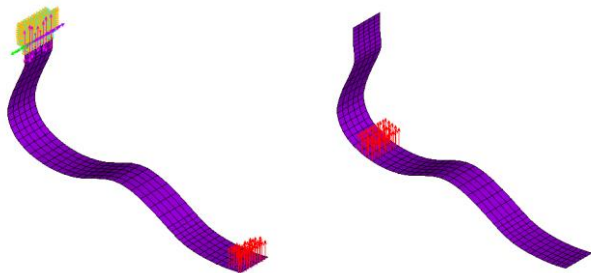


Figura 1 – Detalhes sobre a modelagem e parametrização do modelo direto.

Após a simplificação do modelo, foi construída a simulação de elementos finitos com as condições i e ii, já citadas (Figura 2). O modelo numérico considerou duas diferentes condições de contorno. Considerou-se elementos de casca e fibra de carbono como material aplicado em N camadas.



(a) prótese simuladas com força na ponta (b) prótese simulada com força no calcanhar

Figura 2 – Condição carregamento na prótese

Sendo assim, a formulação do problema de otimização deste estudo pode ser resumida por meio do seguinte equacionamento.

encontrar

$\mathbf{X} = \{x_3, x_4, y_4, x_5, y_5, x_7, y_7, x_8, y_8, x_9, y_9, x_{10}, x_{11}, y_{12}, z_{13}, N_{CAM}\}$
que minimiza:

$f_1(\mathbf{X}) = TW(\mathbf{X}) \rightarrow$ Valor de Tsai-Wu

$f_2(\mathbf{X}) = massa(\mathbf{X}) \rightarrow$ massa

sujeito à: $g_1(\mathbf{X}): massa(\mathbf{X}) \leq 550$

$g_2(\mathbf{X}): TW(\mathbf{X}) \leq 1$

Assim, foi feita a otimização dentro dos quatro algoritmos de otimização - MOLA, MOGA, MOPSO e MOSFO.

Resultados e discussão

Como discutido anteriormente, foram feitas as simulações com os quatro otimizadores, MOLA, NSGAI, MOSFO e MOPSO. Após ter sido realizada as otimizações foram geradas as frentes de Pareto para todos os quatro otimizadores nas duas condições de carregamento (Figura 3 e 4) e delas foram extraídos os pontos de nadir de cada otimizador e os seus TOPSIS para análises.

Além disso, foram obtidos os valores do hypervolume de cada prótese. Esses valores conseguidos a partir das simulações podem ser vistos na seguinte tabela.

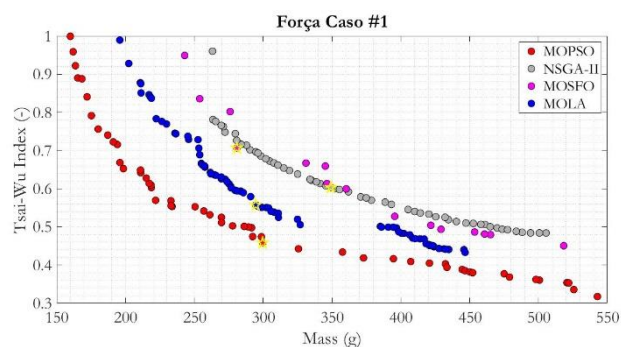


Figura 3 – Soluções ótimas obtidas para o caso 1.

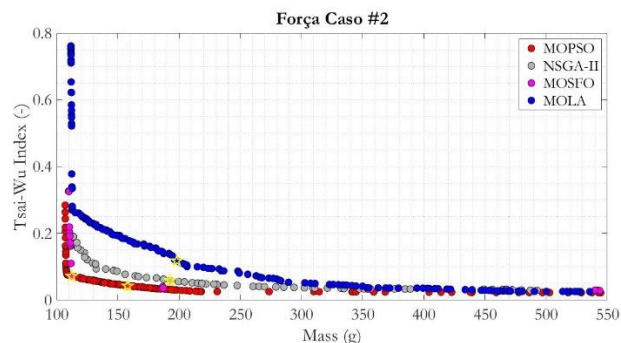


Figura 4 – Soluções ótimas obtidas para o caso 2.

A Figura 5 exibe, como exemplo, as geometrias ótimas obtidas por meio do otimizador com maior desempenho (MOPSO) e na melhor solução TOPSIS dentre todas as soluções não-dominadas.

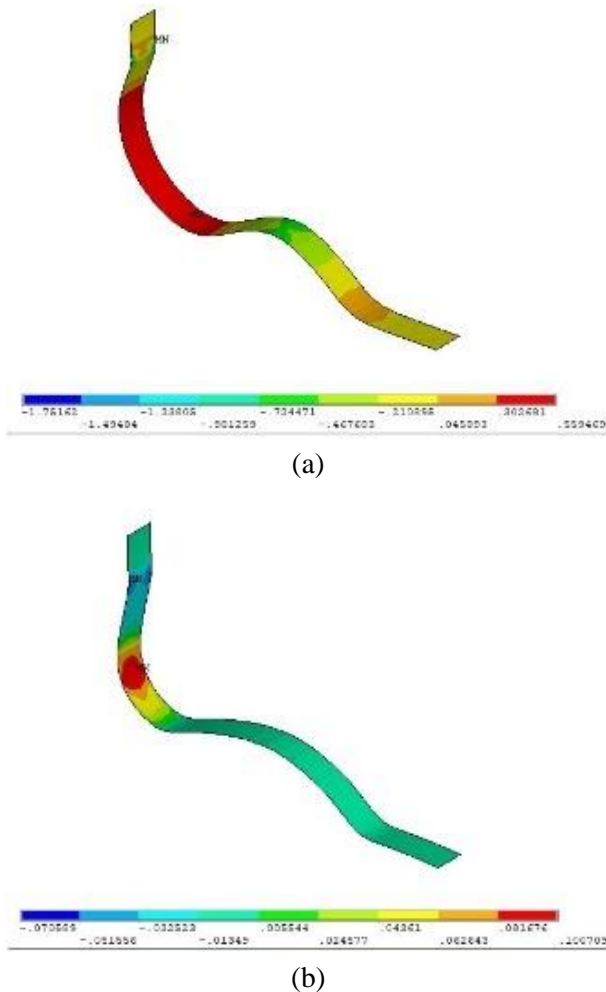


Figura 5 – Soluções ótimas TOPSIS para o caso 1 e 2 considerando o algoritmo MOPSO.

Considerando o que foi apresentado ao longo desse estudo, com as duas condições de esforços simuladas para os quatro otimizadores: MOLA, NSGA-II, MOSFO e MOPSO. Nota-se que a prótese que melhor atenderia as condições de carga é a obtida pelo otimizador MOPSO para a carga na ponta da estrutura, uma vez que essa condição de contorno foi a que exigiu maior robustez na prótese. Logo, da mesma forma como atuou bem na condição i, atuaria de forma efetiva também com um carregamento no calcanhar, condição ii. Ademais, como já citado, além de possuir uma frente de Pareto mais convexa que os demais otimizadores, o que gerou uma melhor tomada de decisão e solução TOPSIS. Essa metaheurística forneceu o maior índice de hipervolume dentre os outros estudados, somando mais uma vantagem para essa prótese dentre as demais.

Agradecimento

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro.

Referências

- Abood, S. H. and Faidh-Allah, M. H. (2019) “Analysis of Prosthetic Running Blade of Limb
- Balaramakrishnan, Thirunindravur Mannan, et al. “Roll-over Shape of a Prosthetic Foot: A Finite Element Evaluation and Experimental Validation”. *Medical & Biological Engineering & Computing*, vol. 58, no 10, outubro de 2020, p. 2259–70.
- Coello CAC (2000) Use of a self-adaptive penalty approach for engineering optimization problems. *Comput Ind* 41:113– 127
- Fonseca CM, Fleming PJ (1993) Genetic algorithms for multi-objective optimization: Formulation discussion and generalization. In: *Proceedings of the International Conference on Genetic Algorithms*, vol 93. Citeseer, pp 416–423.
- Fonseca, Carlos & Fleming, Peter. (1999). *Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation Discussion and Generalization*. the fifth Intl conference on Genetic Algorithms. 93.
- Forrest, Stephanie e USA, organizadores. *Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms: University of Illinois at Urbana-Champaign, July 17 - 21, 1993*. Morgan Kaufmann, 1993.
- Gomes, G. F., & de Almeida, F. A. (2020). Tuning metaheuristic algorithms using mixture design: application of sunflower optimization for structural damage identification. *Advances in Engineering Software*, 149, 102877.

Tabela 1. Métricas de otimização obtidas para caso I e II considerando os diferentes algoritmos.

caso	Algoritmo	HV	TOPSIS		Nadir	
			massa (g)	TW (-)	massa (g)	TW (-)
I	MOPSO	0,787	299,6	0,458	159,9	0,317
	NSGA-II	0,737	349,1	0,603	263,2	0,484
	MOLA	0,738	294,6	0,557	195,9	0,433
	MOSFO	0,728	280,9	0,707	243,0	0,450
II	MOPSO	0,987	157,9	0,042	107,0	0,022
	NSGA-II	0,978	192,7	0,059	113,7	0,029
	MOLA	0,966	198,2	0,118	111,6	0,025
	MOSFO	0,982	112,3	0,072	109,7	0,028

Conclusões

- Gomes, G. F., da Cunha, S. S., & Ancelotti, A. C. (2019). A sunflower optimization (SFO) algorithm applied to damage identification on laminated composite plates. *Engineering with Computers*, 35(2), 619-626.
- Hase, Kazunori, et al. "Parametric modeling of sports prostheses based on the flat spring design formulas". *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, vol. advpub, 2019, p. 19-00446.
- Light, C. ., & Chappell, P. . (2000). Development of a lightweight and adaptable multiple-axis hand prosthesis. *Medical Engineering & Physics*, 22(10), 679-684
- Pereira, João. L. J., Francisco, M. B., Diniz, C. A., Antônio Oliver, G., Cunha, Sebastião.
- Simões & Gomes, G. F. (2021). Lichtenberg Algorithm: A Novel Hybrid PHYSICS-Based Meta-Heuristic For Global Optimization. *Expert Systems with Applications*, 170, 114522.