

DISCRETE TOPOLOGY OPTIMIZATION APPLIED TO DESIGN A CONCEPTUAL MODEL FOR LOWER LIMB PROSTHESIS

¹**Crismilia Alves dos Santos**

²**Luísa Vitória Santos dos Anjos**

³**José Adeilson de Amorim**

⁴**Adeildo Soares Ramos Júnior**

¹*crismilia.santos@ctec.ufal.br*

²*luisa.vitoria@hotmail.com*

³*adeilson_amorim@lccv.ufal.br*

⁴*adramos@lccv.ufal.br*

^{1,2,3,4}*LCCV, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas - UFAL*

^{1,2,3,4}*Av Lourival Melo Mota, S/N - Tabuleiro dos Martins, Maceió, Alagoas, 57072-900*

Abstract. The objective of this work is to develop a methodology for a conceptual model for lower limb prostheses using the discrete Topology Optimization (TO) techniques as a design tool. The TO of structures is currently presented as a very promising tool for the conceptual design of structures, structural components, and even the materials microstructure. The TO techniques allow the conception of the structural model to be part of the optimization process, giving great freedom for the designer. The bridging of the TO technics and the additive manufacturing is very promising to associate the personalized design with its manufacture. The prostheses are elements that replace partially or totally the members and that bring an increase of the independence and functionality of the people or animals that have incapacity or reduced mobility. In this context, the application of TO techniques allows the creation of personalized and low cost prostheses, that, in Brazilian context, is very important. The discrete TO is based on the ground structures method that consists of the generation of truss members connecting a mesh of nodes. The level of connectivity between the nodes can be defined by the designer. In this work, the initial mesh is based on the 3D parameterization of ellipses defined by the geometry of the personalized lower limb of the patient. We use the elastic topology optimization formulation with multiple load cases and the cross-sectional areas of the members as design variables. Illustrative examples are presented to show the potentialities the formulation.

Keywords: Topology Optimization, Discrete Topology, Lower Limb Prosthesis

1 Introdução

As próteses são elementos mecânicos que substituem parcial ou totalmente os membros e restabelecem a funcionalidade e atividade do membro amputado, além de melhorar o conforto do paciente, respeitando a anatomia e fisiologia deste (Viegas [1]). Os amputados de membro inferior apresentam diversos problemas de locomoção ao realizar atividades do dia a dia, como subir e descer escadas ou o simples ato de abaixar-se e eles representam 85% dos amputados brasileiros, segundo Sousa [2]

Este trabalho visa propor uma geometria diferente da convencional para o tubo protético, um dos componentes das próteses transtibiais, através da técnica de Otimização Topológica (OT). Esta última é um método computacional que determina a topologia ótima de toda uma estrutura, ou seja, encontra a melhor distribuição do material em um determinado domínio específico do projeto, onde as restrições impostas sejam sempre respeitadas.

2 Otimização Topológica Discreta

A Otimização Topológica estrutural discreta baseia-se na geração de malhas de barras - método Ground Structures (GS). Para isto, inicialmente são definidos os nós, que cobrem todo o domínio, e estes nós se conectam entre eles através de barras, além da especificação das condições de contorno e das cargas atuantes, criando-se assim uma malha densa de barras (Christensen and Klarbring [3]). Para a remoção das barras desnecessárias e a determinação da estrutura otimizada, devem ser respeitadas algumas relações e, por fim, com o modelo gerado, o processo de filtragem pode ser necessário para analisar o equilíbrio do modelo.

2.1 Formulação

A formulação utilizada consiste na análise elástica da estrutura, utilizando as relações de equilíbrio e compatibilidade (Zhang [4]). A estrutura inicial é composta por M elementos e N nós. O estado de equilíbrio do sistema é dado por:

$$\mathbf{K} \mathbf{u} = \mathbf{f}. \quad (1)$$

Onde, no caso de treliças espaciais, $\mathbf{K} \in \mathbf{R}^{3N \times 3N}$ é a matriz de rigidez; $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^{3N}$ é o vetor de deslocamentos e $\mathbf{f} \in \mathbf{R}^{3N}$ é o vetor de forças externas, sendo N o número de graus de liberdade.

A matriz de rigidez pode ser expressa como:

$$\mathbf{K}(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^M \mathbf{a}_i \mathbf{K}_i^0, \quad \mathbf{K}_i^0 = \frac{E_i}{l_i} \mathbf{b}_i \mathbf{b}_i^T. \quad (2)$$

Onde \mathbf{K}_i^0 é uma matriz constante associada a cada elemento em coordenadas globais, E_i e l_i são módulo de Young e comprimento do elemento i , respectivamente, \mathbf{a} é um vetor de variáveis de projeto (áreas de barras) para o problema de otimização, e \mathbf{b}_i é um vetor descrevendo a direção na orientação do elemento i , dado por:

$$\mathbf{b}_i = \begin{pmatrix} \vdots \\ -\mathbf{n}^{(i)} \\ \vdots \\ \mathbf{n}^{(i)} \\ \vdots \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Onde $\mathbf{n}^{(i)}$ é um vetor unitário na direção axial do elemento i .

O problema de otimização encontra o conjunto de variáveis de projeto (áreas das barras) que minimiza a conformidade da estrutura, sujeito a restrições de equilíbrio e volume. Assim, explora-se a conectividade na estrutura [Zhang [4]]. O problema de otimização é dado por:

$$\begin{cases} \min C(\mathbf{a}) = (\mathbf{f})^T \mathbf{u}(\mathbf{a}) \\ \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^M a_i l_i - V_{max} \leq 0 \\ 0 < \epsilon = a_j^{min} \leq a_j \leq a_j^{max} \quad j = 1, \dots, n \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

Com

$$\mathbf{K}(\mathbf{a}) \mathbf{u}(\mathbf{a}) = \mathbf{f}$$

Onde $C(\mathbf{a})$ é a função objetivo, \mathbf{a} e \mathbf{l} são os vetores de área e comprimento, respectivamente, V_{max} é o volume máximo de material e a_{max} e a_{min} os limites superior e inferior, respectivamente e ϵ é um número pequeno adotado para que não se tenham áreas de elementos zero.

3 Próteses de Membros Inferiores

Os tipos mais frequentes de amputações em membros inferiores são: transtibiais (abaixo do joelho) e transfemorais (acima do joelho). Por manter a estrutura da articulação do joelho, as amputações transtibiais possibilitam aos usuários uma mobilidade muito próxima da normalidade. A estrutura das próteses transtibiais modulares normalmente é composta por um pé protético, tubo protético e soquete (Shasmin [5]). O tubo protético é o elemento da prótese transtibial que tem a função de transferir as cargas do corpo para o chão por meio do pé protético. Ele liga a articulação do joelho ao pé. Normalmente é fabricado com metais por oferecerem boa resistência mecânica e rigidez (Padi et al. [6]).

4 Metodologia

A metodologia adotada para este trabalho consiste em três etapas. A primeira trata da geração da Ground Structures por meio da parametrização de elipses para definir o domínio do projeto. A segunda etapa consiste na definição das condições de contorno de deslocamento, do volume das barras como restrição e os estados de carregamento e, por fim, a terceira etapa é a aplicação da Otimização Topológica através de algoritmos desenvolvidos no MATLAB [7].

No exemplo utilizado, a Ground Structures é formada por 1816 elementos e 5 elipses de dimensões e quantidades de nós diferentes detalhadas na fig. 1. Foram aplicados três estados de carregamento separadamente e por último foi realizada a combinação dos três carregamentos com o objetivo de simular os carregamentos aplicados em próteses transtibiais. Na fig. 2 as cargas estão em azul e as condições de contorno em vermelho. Os estados de carregamento foram: pontual centralizado (2(a)), distribuído (2(b)), torção (2(c)) e a combinação dos três carregamentos (2(d)).

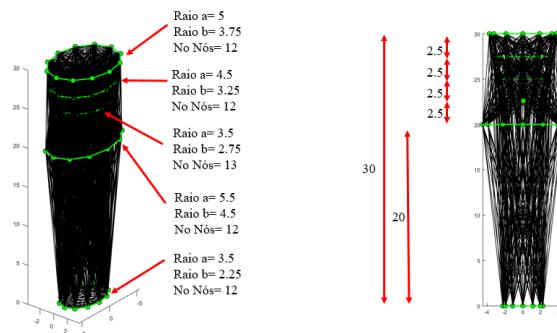


Figura 1. Ground Structures

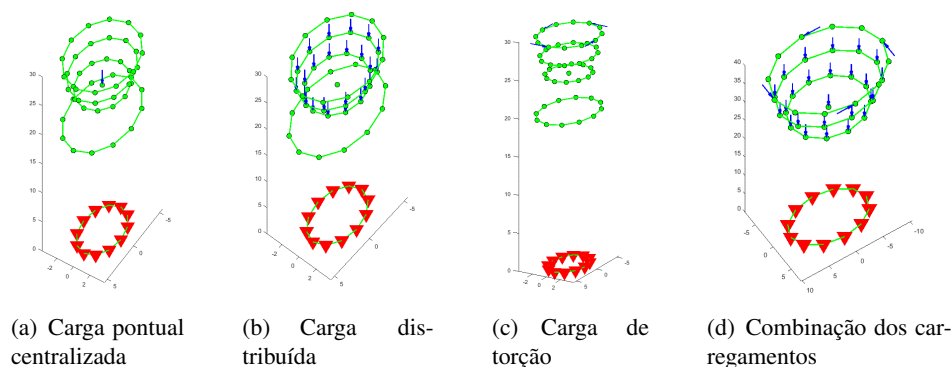


Figura 2. Estados de carregamento e restrição

5 Resultados

Para determinar uma topologia ótima do tubo protético através da Otimização Topológica é necessário definir uma configuração de cargas atuantes nesse elemento (ver fig. 2). Desse modo, tomando como referência Junqueira [8], para simular o conjunto de cargas atuantes no tubo protético foi realizada a combinação de cargas que promovem os esforços: normal, de flexão e torção. A distribuição ótima das barras para cada caso de carregamento separadamente está representada na fig. 3. As topologias (3(a)) e (3(b)) apresentaram uma distribuição de barras na vertical por meio dos esforços gerados pelos carregamento pontual e distribuído respectivamente.

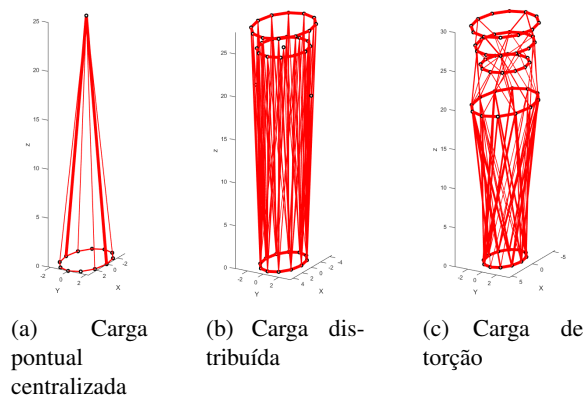


Figura 3. Topologias para cada caso de carregamento separadamente

O carregamento distribuído por ser aplicado nos nós das elipses superiores promove um esforço de flexão por apresentar uma excentricidade. A topologia (3(c)) apresentou uma distribuição de barras

cruzadas devido a rotação provocada pelo momento tórsor aplicado. Com a combinação dos três casos de carregamentos obteve-se a topologia ótima final a qual representa de modo conceitual a estrutura otimizada para o tubo protético (4(a)) com um total de 192 barras. Verifica-se através da (4(b)) que a função objetivo é minimizada, convergindo para um valor igual a 123,0.

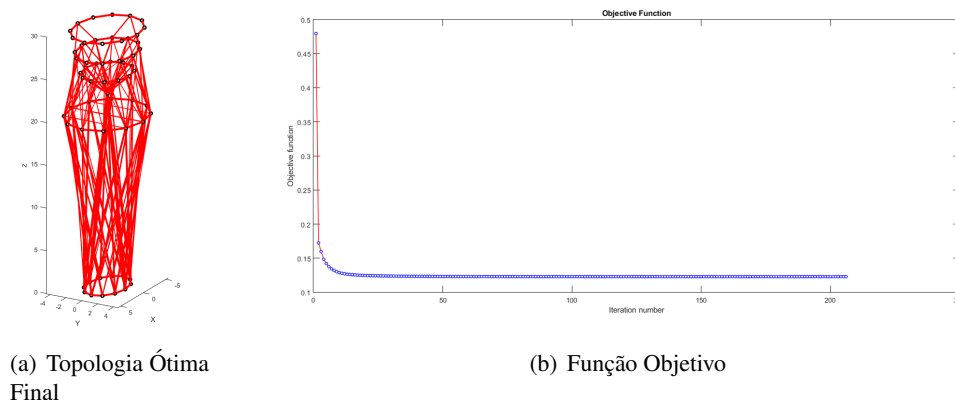


Figura 4. Topologia Ótima Final e Função Objetivo

Considerações Finais

Neste trabalho o objetivo foi definir uma topologia ótima para o tubo protético de uma prótese transtibial através de um algoritmo de Otimização Topológica implementado para projetar estruturas tridimensionais. Diante disso, é importante salientar que não houve estudos de resistência mecânica para a estrutura. Como trabalho futuro sugere-se realizar análises mecânicas da topologia final através de ensaios mecânicos e simulações utilizando o Método dos Elementos Finitos. Por apresentar uma geometria complexa pretende-se utilizar a Manufatura Aditiva (impressão 3D) para impressão da estrutura.

References

- [1] Viegas, J. A. L., 2017. Estudo biomecânico na marcha de indivíduos amputados de membro inferior. Master's thesis, Universidade do Porto - Faculdade de Engenharia, Porto, Portugal.
- [2] Sousa, F. S. C., 2014. Projeto de joelho e tornozelo mecânicos para amputados de membro inferior. Technical report, Brasília, Brasil.
- [3] Christensen, P. & Klarbring, A., 2009. *An Introduction to Structural Optimization*. Solid Mechanics and Its Applications. Springer Netherlands.
- [4] Zhang, X., 2014. Macro-element approach for topology optimization of trusses using a ground structure method. Master's thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, USA.
- [5] Shasmin, H. N., 2012. Development of a new pylon material in transtibial prosthesis. Master's thesis, University of Malaya - Faculty of Engineering, Kuala Lumpur, Malaysia.
- [6] Padi, K. K., Charan, M., & Subramani, K., 2017. Trends and challenges in lower limb prosthesis. *IEEE Potentials*, vol. 36, pp. 19–23.
- [7] MATLAB, 2015. *version (R2015a)*. The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts.
- [8] Junqueira, D. M., 2018. Tubo para prótese de membro inferior utilizando estrutura de travessas rígidas. Master's thesis, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Minas Gerais.