

# Análise numérica de uma prótese de material composto laminado para corredores

**Darlan Dallacosta**, Laboratório de Engenharia Biomecânica, Hospital Universitário, UFSC, e-mail: [dallacosta@hu.ufsc.br](mailto:dallacosta@hu.ufsc.br), home page: <http://www.hu.ufsc.br/~lebm/>

**Vitor Takashi Endo**, Grupo de Análise e Projeto Mecânico, Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC. e-mail: [endo.takashi@gmail.com](mailto:endo.takashi@gmail.com)

**Carlos Rodrigo de Mello Roesler**, Laboratório de Engenharia Biomecânica, Hospital Universitário, UFSC, e-mail: [roesler@hu.ufsc.br](mailto:roesler@hu.ufsc.br), home page: <http://www.hu.ufsc.br/~lebm/>

**Daniela Águida Bento**, Laboratório de Engenharia Biomecânica, Hospital Universitário, UFSC, e-mail: [debento@hu.ufsc.br](mailto:debento@hu.ufsc.br), home page: <http://www.hu.ufsc.br/~lebm/>

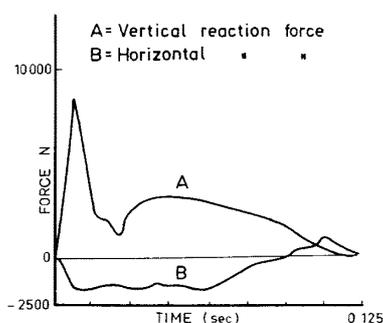
## Introdução

Avanços no desenvolvimento dos materiais, particularmente nos materiais compostos, contribuíram para a melhoria no desempenho de atletas amputados, uma vez que a confiabilidade e eficiência das próteses foram consideravelmente aprimoradas. Já em relação ao projeto, relata-se que um grande avanço ocorreu quando foram considerados elementos flexíveis para armazenar e transferir energia durante a marcha, uma vez que o conjunto de tecidos moles responsável por esse mecanismo já não é mais existente. Desta forma, os modelos de próteses mais recentes apresentam lâminas flexíveis de material composto, de forma a proporcionar conforto e redução do gasto energético por parte do usuário.

Neste sentido, o propósito do presente trabalho é avaliar, com o auxílio de modelos numéricos, uma proposta de prótese fabricada a partir de lâminas de fibras de carbono e resina epóxi.

## Biomecânica da Marcha

O projeto da prótese deve considerar as funções biomecânicas básicas dos pés. Além disso, deve-se conhecer a distribuição e intensidade das forças atuantes entre o solo e o pé, conforme o tipo de movimento do indivíduo.



**Figura 1** – Forma típica das curvas força vs tempo referentes às componentes de força vertical e antero-posterior presentes na decolagem do salto em distância [3].

## Parâmetros de projetos

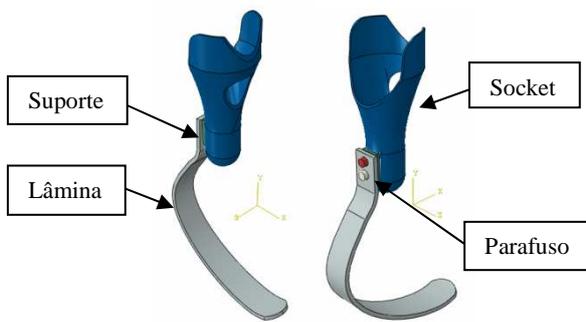
A prótese deve ser projetada de forma a suportar severas condições de carregamento durante sua utilização. Torna-se necessário, portanto, verificar quais as grandezas comumente encontradas para cada modalidade desportiva. Segundo dados científicos, uma das condições mais severas ocorre no salto em distância, principalmente na passada que antecede o salto, pois é nesse momento que o atleta transfere o impulso horizontal, desenvolvido durante a corrida de aproximação, em componentes de impulso horizontais e verticais. É importante considerar que pessoas amputadas perdem cerca de 80% da energia necessária para o ciclo de uma marcha normal, pois esta fonte de geração está associada aos músculos plantiflexores. Por isso, é fundamental que a prótese apresente certa flexibilidade sob esforços de flexão, de forma a armazenar energia potencial elástica. O retorno elástico, ao cessar do carregamento, é responsável pela contribuição no impulso.

## Materiais compostos laminados

Além da notória vantagem de suas elevadas propriedades mecânicas específicas, suas propriedades físicas e a versatilidade para a fabricação de diferentes geometrias tornam os materiais compostos ideais para esta aplicação. Tal versatilidade se justifica pelos baixos custos dos moldes para a fabricação das peças e, sobretudo, pela possibilidade de um mesmo material composto atender diferentes propriedades mecânicas finais. Assim, pode-se facilmente customizar a geometria e, por exemplo, a rigidez à flexão, de modo que a prótese possa atender adequadamente às expectativas do usuário em termos de desempenho.

## Modelo geométrico da prótese

O modelo proposto é baseado em modelos já existentes e consagrados no mercado, sendo composto por três partes, conforme indicado a seguir:



**Figura 2. Descrição da prótese proposta**

Nessa concepção, tanto a Lâmina quanto o Socket são fabricados em material composto; já o suporte em Alumínio (liga AM500). Utilizando estes materiais, estima-se que a massa total do conjunto apresentado na Fig. 2 seja de aproximadamente 2,5 kg.

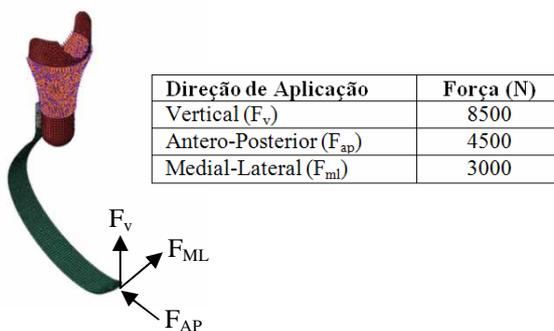
**Modelo numérico de elementos finitos**

Para os componentes Socket e Lâmina foram utilizados elementos de casca quadráticos do tipo S8R. Para o Suporte foram utilizados elementos hexaédricos lineares do tipo C3D8R. Todas as condições de contato existentes no modelo são do tipo contato sem atrito. Considerou-se uma união por parafusos de aço entre Lâmina/Suporte/Socket, sendo modelada a partir de um acoplamento rígido entre os nós existentes em cada elemento. Foram utilizadas as seguintes propriedades mecânicas para a simulação do componente:

**Tabela 1. Propriedades mecânicas [1]**

Carbono-Epóxi				Aço	
$X_2$ (MPa)	1270	$\tau_{\text{rupt}}$ (MPa)	90	$E$ (GPa)	210
$X_1$ (MPa)	1130	$E_{11}$ (MPa)	134000	$\nu$	0,3
$Y_1$ (MPa)	42	$E_{22}$ (MPa)	7000	Alumínio	
$Y_2$ (MPa)	141	$G_{12}$ (MPa)	4200	$E$ (GPa)	72
$S_{12}$ (MPa)	63	$\nu_{12}$	0,25	$\nu$	0,33

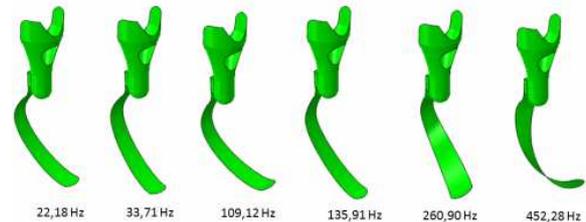
Para avaliar o desempenho da prótese, foram realizadas inicialmente análises estruturais estáticas (Abaqus CAE v6.6), avaliando a rigidez flexional e o critério de falha conforme a orientação das fibras e número de camadas quando o componente é submetido aos esforços da tabela abaixo:



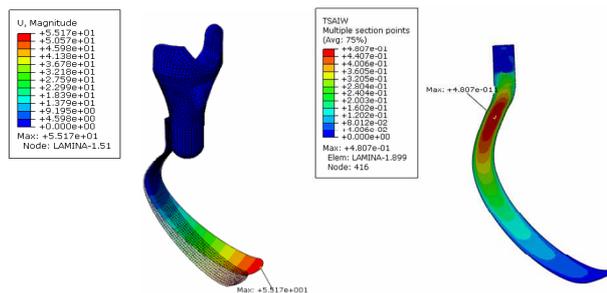
**Figura 3. Discretização do conjunto, condições de contorno e carregamentos [4] [5].**

Constatou-se que a melhor configuração para o laminado consiste na disposição de fibras orientadas em  $[(0/90)_2]_s$  em camadas de 1 mm de espessura e simétricas.

Posteriormente, como se sabe que o componente é, na realidade, submetido a esforços dinâmicos, também foi realizada uma análise dinâmica transiente.



**Figura 1. Modos de vibração**



**Figura 2. Deslocamentos devido à força vertical e critério de falha de Tsai-Wu.**

**Validação experimental**

Para a avaliação do desempenho do modelo proposta, pretende-se considerar a norma ISO 10328:2006 *Prosthetics Structural testing of lower-limb prostheses: Requirements and test methods*, e as normas ASTM D-3410-87(1989) e ASTM D-3039-76 (1989) para obter as propriedades mecânicas do material composto.

**Conclusões**

Através de simulação numérica do componente, é possível prever e adequar o comportamento mecânico alterando os parâmetros do material empregado. Portanto, para a obtenção de uma prótese que atenda aos requisitos específicos de um indivíduo, o método de elementos finitos, aplicado à mecânica dos materiais compostos laminados serve como uma ferramenta para avaliação e melhoria do desempenho de próteses.

**Referências bibliográficas**

[1] Al-Qureshi, H. A., “Composite Materials: Fabrication and Analysis”. ITA, 1984.  
 [2] Arya, A.P., Lees A., Nirula H.C., Klenerman L., “A biomechanical comparison of the SACH, Seattle and Jaipur feet using ground reaction forces”. *Prosthet. Orthot Int.* 1995.  
 [3] Bosco, C., Luthanen, P., Komi, P. V., “Kinetics and kinematics of the take-off in the long jump”, *Biomechanics V-B*, .pp.174-180, 1986.  
 [4] Hay, G.J., “The biomechanics of the long jump”. *Exerc and Sports Sc .Rev.*, vol.14, pp.401-446, 1986.  
 [5] Hay, G.J., “Ciltus, altus, longius (faster, higher, longer): the biomechanics of jumping for distance”, *Journal of Biomech.*, vol.26, pp.7-21, 1993.