



## PROJETO DE PRÓTESES DE ATLETAS COM AMPUTAMENTO UNILATERAL TRANSTIBIAL UTILIZANDO O MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO DE FORMA

R J Silva<sup>1</sup>, C N Pai<sup>2</sup>, W S Nishitani<sup>1</sup>, R C Carbonari<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do ABC, São Bernardo do Campo, Brasil

<sup>2</sup>Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil

\*ronny.carbonari@ufabc.edu.br

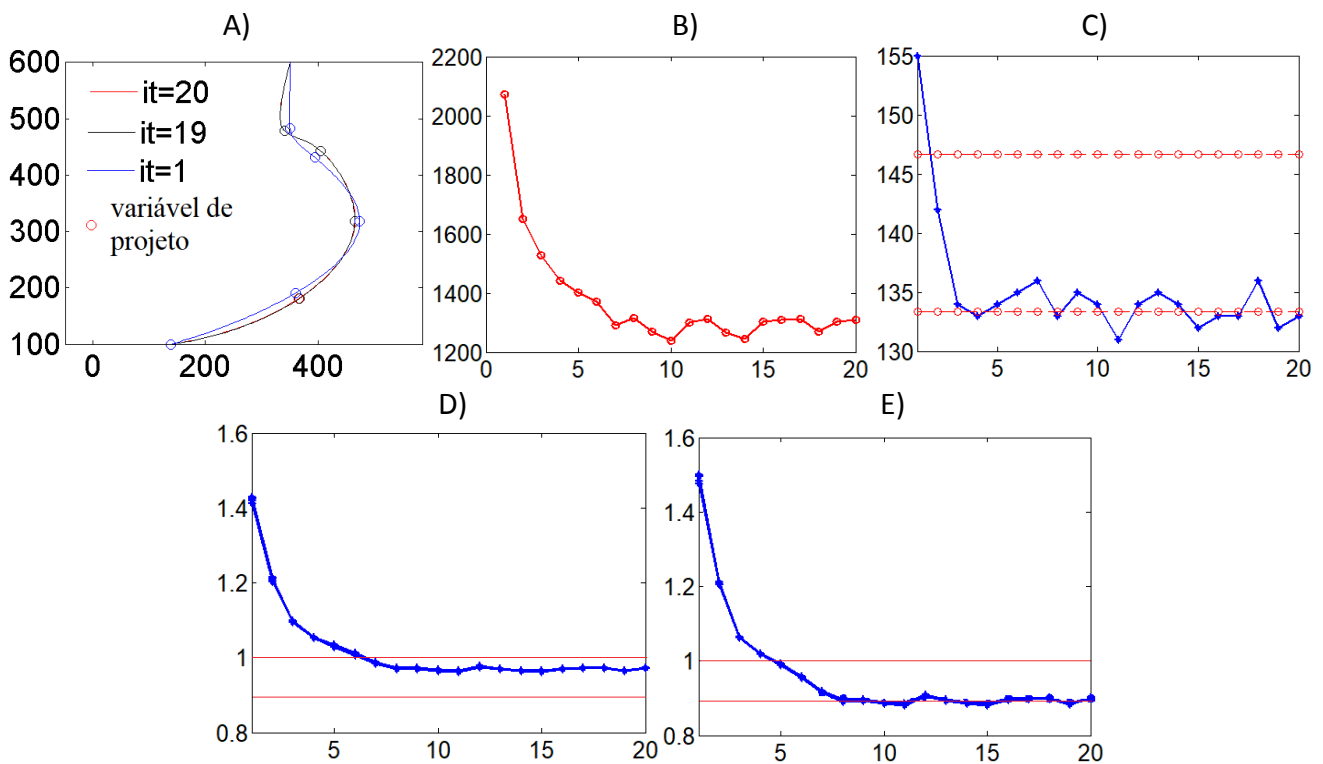
**Background, Motivation and Objective.** Atualmente, mais de 90% dos atletas velocistas amputados utilizam algum modelo de prótese baseado no conceito *Flex-Foot*. Essas próteses são desenvolvidas em fibra de carbono e o seu *design* permite o armazenamento e devolução de energia, bem como a absorção vertical de choques, proporcionando um andar mais natural e protegendo a zona amputada e suas juntas de choques excessivos. Existem dois quesitos particularmente importantes no projeto deste tipo de prótese: o controle da rigidez da estrutura e das tensões mecânicas. A simulação numérica é uma ferramenta fundamental para obter valores adequados destas propriedades, porém a modelagem deste problema é bastante complexa, envolvendo o atrito entre o solo e a prótese, além de grandes deformações (não-linearidade geométrica). O presente trabalho teve como objetivo desenvolver uma modelagem numérica robusta, baseada no método de otimização de forma, que combina o método de elementos finitos (EF) e algoritmos de otimização (AO). Dessa forma, pretendeu-se projetar prótese do tipo J personalizada, que leva em conta a altura e peso do atleta para obter um *design* apropriado.

**Methods.** A metodologia foi desenvolvida na linguagem Julia (DOI: 10.1137/141000671), que utiliza como AO o GCMMA (*Globally Convergent Method of Moving Asymptotes*) (DOI: 10.1137/S1052623499362822) e gerencia o Abaqus (*software* de EF). O modelo de EF foi constituído de duas partes: 1) a prótese, representada por uma camada única de elementos do tipo sólido contínuo (SC8R), subdivididos em 56 partes (de 15 mm de espessura cada) distribuídas no padrão de 0°, 90°, 45°, -45°, -45°, 45°, 90°, e 0°, representando as de fibra de carbono (ISBN-13: 978-1466584877); e 2) uma base rígida de elementos do tipo *shell* (R3D4), que pode mover-se apenas verticalmente. Na base rígida foi aplicada uma força vertical (de intensidade 1712 N, equivalente à gerada durante o movimento de corrida), que é transferida à prótese através do contato entre elas (coeficiente de atrito de 0,2), considerando a região de interface com o toco sendo engastada. O problema de otimização foi definido para minimizar a norma-p das tensões mecânicas de von Mises, que está sujeito a restrições de deslocamento da base rígida (a rigidez é obtida pela relação entre a força vertical aplicada e o deslocamento da base rígida) e critérios de falha de Hashin (DOI: 10.1115/1.3153664) aplicada ao material compósito, para evitar que prótese tenha falha mecânica. As variáveis de projeto foram os *knots* da *B-spline*, que só podem movimentar na direção normal. As derivadas da função objetivo e restrições em relação as variáveis de projeto foram obtidas numericamente utilizando o método de diferenças finitas central. A altura e a largura da prótese foram fixadas em 500 mm e 50 mm, respectivamente. Para obter a rigidez desejada para a prótese, adotou-se valores máximos e mínimos para a restrição de deslocamento na base rígida de 146 e 134 mm, respectivamente. Para evitar a falha mecânica, foram adotadas restrições de falha de Hashin para a matriz e fibra com valores mínimos e máximos de 0,9 e 1,0, sendo que valores menores do que 1,0 não ocorrem falhas no material.

**Results.** O *design* inicial (dado de entrada) e o resultado numérico obtido pela metodologia (*design* final) são mostrados na Figura 1A. O comportamento da função objetivo e das restrições de deslocamento, de falha na matriz e na fibra estão ilustrados nas figuras 1B, 1C, 1D e 1E, respectivamente. A prótese foi otimizada após 20 iterações.

**Discussion and Conclusions.** Analisando os resultados obtidos, a função objetivo convergiu e as restrições ficaram dentro dos limites máximos e mínimos impostos no problema de otimização. As restrições de falha mostraram-se que não há falha no material e o deslocamento vertical obtido é o limite inferior da restrição, o que representa uma rigidez de 12,8 N/mm<sup>2</sup>. O valor ideal de rigidez sugerido pela literatura, considerando o conforto é de 15 N/mm<sup>2</sup> (DOI: 10.1016/j.jbiomech.2013.07.009). Portanto, o resultado obtido foi de uma prótese mais flexível e para obter o valor de 15 N/mm<sup>2</sup> é necessário diminuir o limite máximo da restrição de deslocamento para 114 mm, ou seja, uma resposta com um deslocamento vertical menor. A metodologia desenvolvida permite projetar numericamente próteses com a característica de rigidez desejada e que suporte os esforços sem falhas mecânicas, possibilitando adaptá-la às características do atleta, consequentemente melhorando o desempenho biomecânico do mesmo.

**Figure 1.** Resultados obtidos pela metodologia para uma prótese do tipo J ao longo das iterações. A) modelo inicial e otimizado em mm; B) o comportamento da função objetivo em MPa; C) deslocamento vertical em mm; D) e E) mostram os valores do critério de falha para a matriz e fibra, respectivamente.



**Keywords.** Otimização de forma; Elementos finitos; Próteses Ortopédicas.