



## DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA PROJETO DE STENTS UTILIZANDO O MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO DE FORMA

A Marsicano<sup>1</sup>, W S Nishitani<sup>1</sup>, C N Pai<sup>2</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.** Doenças cardiovasculares estão entre as principais causas de mortalidade, sendo frequentemente relacionadas à aterosclerose, que é causada pela formação progressiva de placa que pode resultar numa obstrução (estenose) do fluxo sanguíneo. Os tratamentos comumente empregados nesses casos são a utilização de fármacos e/ou procedimentos cirúrgicos, sendo a angioplastia coronariana a mais utilizada devido à alta taxa de sucesso no tratamento e por ser minimamente invasiva. Neste procedimento, um *stent* (uma malha metálica ou polimérica) é implantado através de um cateter, e deve desobstruir o fluxo e resistir ao recuo elástico gerado pelo vaso sanguíneo. Apesar destes dispositivos atuarem com sucesso em milhares de casos, ainda existem alguns problemas, como, por exemplo, o efeito *dogboning* (DOI: 10.1007/s10439-008-9504-1), o recuo elástico [DOI: 10.1016/0735-1097(93)90713-B] e a reestenose (DOI: 10.1136/heart.83.4.462), que poderiam ser minimizados através de melhoras de *design*. O projeto do *stent*, que atualmente é realizado utilizando o método de elementos finitos (MEF), é bastante complexo: ele envolve não-linearidade de material, de grandes deformações e de contato (entre o *stent* e o balão e entre o *stent* e a artéria). Portanto, é necessário o desenvolvimento de uma metodologia robusta, que atenda a todas estas exigências, como o método de otimização paramétrica, que combina o MEF e algoritmos de otimização (AO). Nesse trabalho, o problema de otimização foi definido para minimizar o recuo elástico, sendo que o efeito *dogboning* e a reestenose serão abordados futuramente.

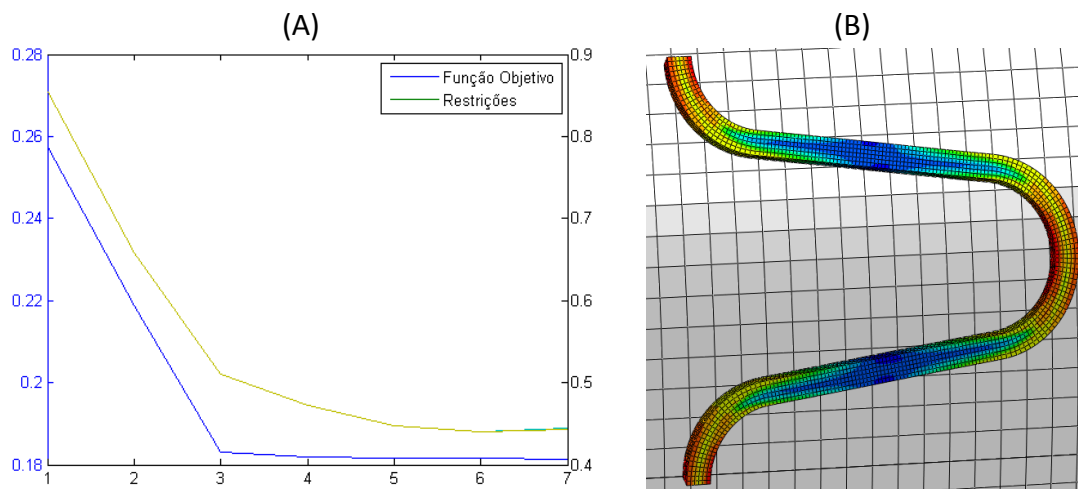
**Methods.** A metodologia foi desenvolvida na linguagem Julia (DOI: 10.1137/141000671), que utiliza como AO o GCMMA (*Globally Convergent Method of Moving Asymptotes*) (DOI: 10.1137/S1052623499362822) e que escreve os arquivos de entrada e de saída do software Abaqus. O modelo de elementos finitos (EF) foi constituído de duas partes: 1) o *stent*, de elementos do tipo sólido (C3D8I), e 2) o balão, uma estrutura rígida de elementos do tipo *shell* (SFM3D4R). Como o modelo apresenta uma simetria, foi aplicada a condição de contorno de simetria cíclica. No balão, aplicou-se um deslocamento que expande o *stent* radialmente, e que é retirado após atingir um determinado valor, porém a solução continua para determinar o recuo elástico. O problema de otimização foi definido para minimizar o recuo elástico (DOI: 10.1186/s12938-016-0268-9), que está sujeito a um critério de falha que utiliza as tensões mecânicas de von Mises por uma tensão admissível (DOI: 10.1007/s00158-015-1279-z). As variáveis de projeto foram o número de repetição do padrão da malha (N), a altura (H), a espessura radial ( $E_r$ ) e a transversal ( $E_t$ ). As derivadas da função objetivo e restrições em relação às variáveis de projeto foram obtidas numericamente, utilizando o método de diferenças finitas central. O modelo de EF tem 8496 e 3000 elementos do tipo C3D8I e SFM3D4R, respectivamente, sendo que o material utilizado para o *stent* é o aço inoxidável, considerando a não-linearidade de material, grandes deformações e o contato entre o balão e o *stent*. Os valores iniciais das variáveis de projeto foram de N = 10 repetições, H = 1,63 mm,  $E_r$  = 0,11 mm e  $E_t$  = 0,11 mm. O raio do *stent*

(R) foi fixado em 3 mm e o valor desejado após a expansão foi de 4 mm. Os comprimento do stent (L) e o raio de concordância ( $R_c$ ) foram calculados através das equações  $L = 2 \cdot \pi \cdot R / N$  e  $R_c = (L - E_t) / 2$ .

**Results.** A metodologia convergiu em 7 iterações, como mostrado na Figura 1a, sendo que os valores finais para as variáveis de projeto foram de  $N = 11$  repetições,  $H = 1,30$  mm,  $E_r = 0,13$  mm e  $E_t = 0,13$  mm. Na Figura 1 são mostradas a convergência da função objetivo e as restrições, bem como as tensões mecânicas de von Mises para o *design* final. O *stent* apresentou valores máximos de 433 MPa para as tensões de von Mises, e a relação do recuo elástico (diâmetro final pelo diâmetro desejado) foi de 18,1%.

**Discussion and Conclusions.** Verificou-se que o recuo elástico foi minimizado de 25,7% para 18,1%. Os valores do critério de falha (tensões de von Mises pela tensão admissível) foram menores do que 0,45 (sendo que o valor da restrição foi de 1,0), considerando o valor da tensão admissível de 921 MPa, que representa 33,3% de deformação na curva tensão/deformação real utilizada no modelo de EF. A metodologia mostrou-se eficiente em obter um *design* ótimo para o *stent*, e pretende-se incluir nessa formulação o efeito *dogboning* e a reestenose, adicionando mais elementos de repetição à malha do *stent*.

**Figura 1.** A) Resultados obtidos para a função objetivo e restrições e B) as tensões mecânicas de von Mises para o *design* otimizado.



**Keywords.** Otimização paramétrica; Elementos finitos; Stents.