

Projecto de implantes ortopédicos utilizando métodos de optimização estrutural: Aplicação a uma haste femoral

Paulo Rui Fernandes, IDMEC-Instituto Superior Técnico, UT Lisboa
e-mail: prfernan@dem.ist.utl.pt

Rui Barreiros Ruben, CDRsp - Escola Superior de Tecnologia e Gestão - IP Leiria
e-mail: rbruben@estg.iplleiria.pt

João Folgado, IDMEC-Instituto Superior Técnico, UT Lisboa
e-mail: prfernan@dem.ist.utl.pt

Introdução

A Mecânica Computacional proporciona métodos muito atractivos e eficientes para analisar e projectar dispositivos médicos. O Método dos Elementos Finitos (MEF) é o mais comum, no entanto técnicas de optimização de estruturas têm sido utilizadas no projecto de implantes ortopédicos [1-3]. Este artigo ilustra a aplicação de métodos de optimização de forma no projecto de implantes, através da apresentação de um modelo desenvolvido para optimizar a geometria da componente femoral de uma prótese da anca.

O sucesso de uma haste femoral depende muito da estabilidade inicial, traduzida por baixos valores do deslocamento e da tensão na interface osso prótese, mas também do comportamento a longo prazo do osso envolvente, nomeadamente do processo de remodelação, consequência do efeito de *stress shielding*. De modo a ter em conta simultaneamente estes factores, apresenta-se uma formulação multicritério, na qual a função objectivo combina três critérios simples: minimização do deslocamento e da tensão na interface, e minimização o efeito de *stress shielding*. As variáveis de projecto caracterizam as secções transversais da haste e estão sujeitas a constrangimentos de modo a obter geometrias clinicamente admissíveis. O sistema osso-implante é considerado uma estrutura com condições de contacto na interface.

Formulação do Problema de Optimização

Os requerimentos para um bom desempenho do implante são valores baixos de deslocamento e tensão na interface e reduzido efeito de *stress shielding*. Para ter em conta estes factores o problema de optimização é formulado da seguinte forma:

$$\min_{\mathbf{d}} f(\mathbf{d}) \quad (1)$$

sujeito a,

$$\begin{aligned} (d_i)_{\min} &\leq d_i \leq (d_i)_{\max} & i &= 2, \dots, 14 \\ h_j(\mathbf{d}) &\leq 0 & j &= 1, 2, \dots, 10 \end{aligned}$$

onde as variáveis de projecto \mathbf{d} caracterizam a geometria das secções que definem a geometria inicial (figura 1) da prótese e os constrangimentos h_j são definidos de modo a obter geometrias clinicamente admissíveis. Neste trabalho considerou-se para a função objectivo f três objectivos simples e uma função multicritério. Para minimizar os deslocamentos na interface considerou-se a função f_d ,

$$f_d = \sum_{p=1}^{NC} \left(\alpha_p \frac{C}{\Gamma_C} \int_{\Gamma_C} |(\mathbf{u}_t^{\text{rel}})_p|^2 d\Gamma \right) \quad (2)$$

onde NC é o número de casos de carga considerados, α_p é o peso de cada caso de carga e $\mathbf{u}_t^{\text{rel}}$ é o deslocamento relativo na interface osso-implante Γ_C . Para minimizar a tensão na interface considerou-se a função f_t ,

$$f_t = \sum_{p=1}^{NC} \left(\alpha_p \frac{1}{\Gamma_C} \int_{\Gamma_C} |(\tau_n)_p|^2 d\Gamma \right) \quad (3)$$

onde τ_n é a tensão normal de contacto.

E para minimizar a o efeito de *stress shielding*, definiu-se a função f_r ,

$$f_r = \frac{D}{\sum_{p=1}^{NC} \left[\alpha_p \left(\sum_{j=1}^{NBP} U_j \right)_p \right]} \quad (4)$$

onde U_j é a densidade de energia de deformação em cada elemento do osso na zona proximal do femur.

Para combinar os três objectivos, considera-se uma função multicritério definida por f_{mc} ,

$$f_{mc} = \beta_d \frac{f_d - f_d^0}{f_d^i - f_d^0} + \beta_t \frac{f_t - f_t^0}{f_t^i - f_t^0} + \beta_r \frac{f_r - f_r^0}{f_r^i - f_r^0} \quad (5)$$

sendo que, f_d^0 , f_t^0 e f_r^0 são os mínimos e f_d^i , f_t^i e f_r^i , representam os valores iniciais de f_d , f_t e f_r , respectivamente. Os β são coeficientes tais que $\beta_d + \beta_t + \beta_r = 1$.

Modelo Computacional

O problema de optimização de forma é resolvido utilizando um método híbrido que combina o MMA (*method of moving asymptotes*) [4] com o método do gradiente projectado. O MMA tem como característica a sua rápida convergência, no entanto não é globalmente convergente. No presente problema de optimização de forma o MMA oscila em torno do valor óptimo após uma rápida convergência até à sua vizinhança. A utilização deste método de optimização híbrido, permite alcançar a vizinhança do valor óptimo em poucas iterações através do MMA. Quando este método começa a oscilar em torno do óptimo, comuta-se para o método do gradiente projectado que é globalmente convergente. Computacionalmente, o problema de optimização resolve-se da seguinte forma: Em primeiro lugar a função objectivo (f_d , f_t , f_r ou f_{mc}) é calculada para a solução inicial. Os valores do deslocamento, tensão e energia de deformação são

obtidos pela solução do problema de equilíbrio com condições de contacto, utilizando o software ABAQUS. Depois, os gradientes são calculados utilizando diferenças finitas progressivas. A formulação de contacto permite o estudo de diferentes extensões de revestimento. Neste trabalho considerou-se hastes totalmente e parcialmente revestidas. Admitiu-se um coeficiente de atrito de para as superfícies revestidas e atrito nulo nas superfícies sem revestimento.

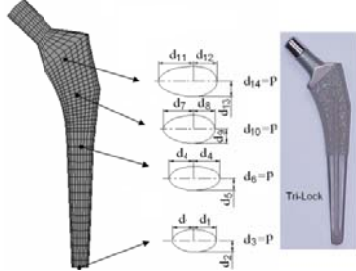


Figura 1: Definição da geometria inicial e variáveis de projecto. Esta geometria é baseada na prótes Tri-Lock da DePuy.

Resultados

As figuras 2, 3, 4 e 5 mostram as geometrias obtidas quando se otimiza as funções f_d , f_b , f_r e f_{mc} , respectivamente. De notar que para a função multicritério, o que se obtém é um conjunto de soluções não dominadas, para cada conjunto de

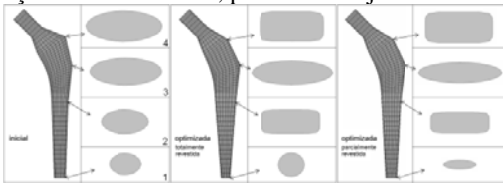


Figura 2: Geometrias obtidas quando se otimiza a função f_d . Inicial à esquerda, totalmente revestida otimizada ao centro e parcialmente revestida otimizada à direita.

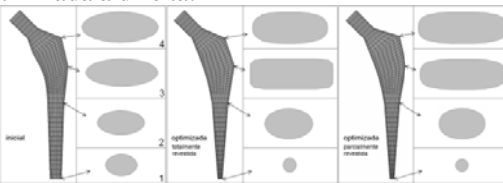


Figura 3: Geometrias obtidas quando se otimiza a função f_b . Inicial à esquerda, totalmente revestida otimizada ao centro e parcialmente revestida otimizada à direita.

As geometrias obtidas quando se minimizam os deslocamentos apresentam a extremidade em cunha para minimizar o deslocamento axial, e as secções são praticamente retangulares para melhorar a estabilidade torsional. A minimização da tensão conduz a hastes com a extremidade fina e circular para evitar o contacto com o osso cortical e consequentemente os picos de tensão. A geometria que minimiza o *stress shielding* aproxima-se das próteses conservativas (*minimal invasive*). Quando se minimiza a função multicritério, as geometrias apresentam uma combinação destas características dependendo de

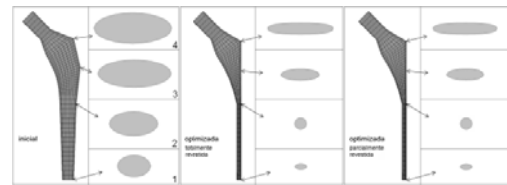


Figura 4: Geometrias obtidas quando se otimiza a função f_r . Inicial à esquerda, totalmente revestida otimizada ao centro e parcialmente revestida otimizada à direita.

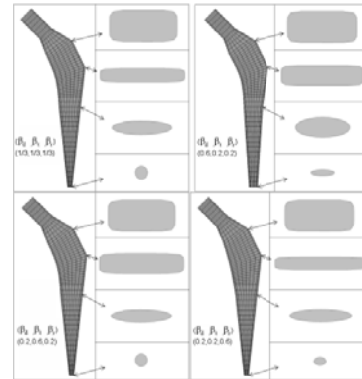


Figura 5: Geometrias obtidas quando se otimiza a função f_{mc} para as hastes parcialmente revestidas.

Discussão

O modelo de otimização de forma apresentado neste trabalho mostrou-se bastante eficiente para o projecto de próteses que apresentem simultaneamente boa estabilidade inicial e um reduzido efeito de *stress shielding*. Os resultados mostram que as geometrias obtidas para cada um dos objectivos considerados isoladamente, apresentam características contraditórias, no entanto concordantes com observações clínicas. A formulação multicritério conduziu a soluções que apresentam uma combinação das características obtidas para cada objectivo simples. O modelo foi aplicado a hastes não cimentadas, no entanto pode ser estendido a hastes cimentadas e a outros tipos de implantes ortopédicos.

Agradecimentos

A participação no encontro foi financiada pelo convénio GRICES/CAPES (Proc.4.1.3/CAPES/CPLP).

Referências bibliográficas

- [1] Huikes R; Boeklagen R., Mathematical shape optimization of hip prosthesis design, Journal of Biomechanics, v. 22, p. 793-804, 1989
- [2] Katoozian H., Davy D. T., Three-dimensional shape optimization of femoral components of total hip prostheses, Bioengineering Conference ASME, v. 24, p. 552-555, 1993
- [3] Ruben R.B.; J. Folgado J.; Fernandes P.R., Three-dimensional shape optimization of a hip prostheses using a multicriteria formulation, Structural and Multidisciplinary Optimization, v. 34, p. 261-275, 2007
- [4] Svanberg, K., The method of moving asymptotes – a new method for structural optimization, International J. Numerical Methods in Eng., 24, p. 359-373. 1987