

ELIMINAÇÃO DE DEFEITOS DE FABRICO NA CONFORMAÇÃO PLÁSTICA USANDO SIMULAÇÃO E OPTIMIZAÇÃO

Catarina F. Castro *, Luísa C. Sousa** e Carlos C. António***

* DEMEGI, IDMEC
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Rua Dr. Roberto Frias, s/n
4200 - 465 PORTO
e-mail: ccastro@fe.up.pt, web <http://www.fe.up.pt>

** DEMEGI, IDMEC
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Rua Dr. Roberto Frias, s/n
4200 - 465 PORTO
e-mail: lcsousa@fe.up.pt, web <http://www.fe.up.pt>

*** DEMEGI, IDMEC
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Rua Dr. Roberto Frias, s/n
4200 - 465 PORTO
e-mail: cantonio@fe.up.pt, web <http://www.fe.up.pt>

Palavras-chave: Processos de Conformação Plástica, Forjamento, Técnicas Inversas, Optimização, Processos Evolucionários, Método dos Elementos Finitos.

Resumo. *Os processos de conformação plástica de metais produzem uma variação da forma da peça e das propriedades do material através da aplicação de forças de compressão. Na maior parte das vezes a peça obtida apresenta defeitos quer geométricos quer estruturais. A eliminação desses defeitos de fabrico, otimizando o processo de conformação, é geralmente condicionada ao curto espaço de tempo e às restrições económicas. O método dos elementos finitos permite a simulação dos processos de conformação calculando entre outros, a deformação do material, as tensões, a distribuição das pressões e a força requerida para o processo. Se o modelo de simulação é robusto a implementação de técnicas de optimização pode ser bem sucedida. Neste trabalho são apresentados resultados do desenvolvimento de um modelo de optimização usando um algoritmo genético evolucionário aplicado à simulação do processo multi-etapas de forjamento a quente. A aplicabilidade e eficiência do modelo desenvolvido são demonstradas considerando um exemplo de forjamento a quente.*

1. INTRODUÇÃO

Hoje em dia, as técnicas empíricas do tipo tentativa/erro para determinar ferramentas e materiais que conduzam ao forjamento de um produto pré-determinado estão ultrapassadas. A simulação dos processos de enformação plástica está suficientemente bem desenvolvida, permitindo a introdução de técnicas matemáticas de optimização. Nos últimos vinte anos, o método dos elementos finitos [1] tornou-se uma ferramenta capaz de simular os vários processos de enformação de metais, sejam estacionários ou não estacionários [2]. O método dos elementos finitos tem sido usado para calcular, entre outros, a deformação do material, as tensões, a distribuição das pressões e a força ou energia requerida pelo processo. Mais ainda, permite determinar a possível presença de defeitos quer na geometria da peça final, quer nas propriedades do material.

A optimização dos parâmetros que controlam o processo de conformação deve ser implementada com base na capacidade de modelização. Assim, é essencial ter um código de simulação numérica que seja robusto permitindo a simulação dos processos de enformação quando os parâmetros de entrada do processo pertencem a intervalos suficientemente amplos que permitam pesquisar a solução óptima. A optimização utilizando formulações inversas [3-5] permite responder de forma racional e realista aos novos desafios do projecto optimizado, usando as especificações do produto final e calculando os parâmetros do processo que irão produzir a peça requerida.

Neste trabalho é apresentado um algoritmo genético evolucionário [6] d procura da solução do problema de optimização. Considera-se um processo de forjamento a quente estruturado em multi-etapas. O objectivo é encontrar a geometria óptima da ferramenta da etapa inicial e o valor óptimo da temperatura inicial da peça de modo a obter após forjamento um produto pretendido livre de defeitos. A aplicabilidade e eficiência do modelo desenvolvido são demonstradas considerando um exemplo de forjamento a quente.

2. SIMULAÇÃO TERMO-MECÂNICA

Em processos de forjamento de metais as grandes deformações presentes são essencialmente plásticas ou viscoplásticas podendo ser desprezada a componente elástica. O código de simulação do processo considera uma formulação rígida viscoplástica e uma descrição Lagrangeana actualizada facilitando o acompanhamento da deformação e da evolução da geometria do material. A utilização de métodos mistos, considerando para variáveis independentes a velocidade e a pressão, permite obter campos contínuos para as tensões [7].

Considerando o critério de cedência de Von Mises e o modelo de Perzina tem-se

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\bar{\sigma}} S_{ij}, \quad p = -\frac{\sigma_{ii}}{3} \quad \text{e} \quad S_{ij} = \sigma_{ij} + p\delta_{ij} \quad (1)$$

sendo $\dot{\varepsilon}_{ij}$ a taxa de deformação, $\dot{\bar{\varepsilon}}$ a taxa de deformação efectiva, $\bar{\sigma}$ a tensão efectiva, S_{ij} a tensão desviadora e p a pressão hidrostática. A energia de deformação é aproximada por

$$\pi(\dot{\mathbf{u}}) = \int_{\Omega} \frac{1}{2} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^T (S_{ij} + p\delta_{ij}) d\Omega + \int_{\Gamma_f} \frac{1}{2} (\Delta \dot{\mathbf{u}}_r)^T \boldsymbol{\sigma}_f d\Gamma - \int_{\Gamma} \dot{\mathbf{u}}^T \mathbf{t} d\Gamma \quad (2)$$

em que $\dot{\mathbf{u}}$ representa o vector de velocidades, $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$ representa a taxa de deformação, $\boldsymbol{\sigma}_f$ e $\Delta \dot{\mathbf{u}}_r$ correspondem à tensão e à velocidade relativa na superfície de contacto peça/ferramenta e \mathbf{t} representa o vector das forças de superfície. Impondo a condição de incompressibilidade pelo método dos multiplicadores de Lagrange e considerando o princípio variacional obtém-se

$$\begin{aligned} \delta(\pi(\dot{\mathbf{u}})) &= \int_{\Omega} S_{ij} \delta \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{ij}(\dot{\mathbf{u}}) d\Omega + \int_{\Omega} p \delta \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{ii}(\dot{\mathbf{u}}) d\Omega + \int_{\Omega} \delta p \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{ii}(\dot{\mathbf{u}}) d\Omega - \int_{\Gamma_{\Omega}} t_i \delta \dot{u}_i d\Gamma \\ &+ \int_{\Gamma_f} \delta(\Delta \dot{\mathbf{u}}_r)^T \boldsymbol{\sigma}_f d\Gamma = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Para que a igualdade seja verdadeira para qualquer variação $\delta \dot{\mathbf{u}}$ e δp obtém-se o sistema

$$\begin{aligned} \delta(\pi(\dot{\mathbf{u}})) &= \int_{\Omega} S_{ij} \delta \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{ij}(\dot{\mathbf{u}}) d\Omega + \int_{\Omega} p \delta \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{ii}(\dot{\mathbf{u}}) d\Omega - \int_{\Gamma_{\Omega}} t_i \delta \dot{u}_i d\Gamma + \int_{\Gamma_f} \delta(\Delta \dot{\mathbf{u}}_r)^T \boldsymbol{\sigma}_f d\Gamma = 0 \\ \int_{\Omega} \delta p^T \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{ii}(\dot{\mathbf{u}}) d\Omega &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Considerando o método dos elementos finitos e aproximando as variáveis independentes $\dot{\mathbf{u}}$ e p pelo processo usual a partir das funções de forma obtém-se o sistema de equações

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_d + \mathbf{K}_f & \mathbf{Q} \\ \mathbf{Q}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}} \\ p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (5)$$

A interacção entre as ferramentas e o material é modelada por elementos de interface de espessura nula [7]. Prescrevendo propriedades adequadas para estes elementos pode-se simular de uma forma realista o atrito e a transferência de calor na interface de contacto, e ainda impedir a penetração do material nas matrizes.

Para simular o problema térmico considera-se a lei de Fourier e adopta-se uma descrição Lagrangeana [8-10] obtendo-se o conjunto de equações diferenciais:

$$\mathbf{C}\dot{\mathbf{T}} - \mathbf{K}\mathbf{T} = \mathbf{Q} \quad (6)$$

onde $\mathbf{T}, \dot{\mathbf{T}}$ são as temperaturas nodais e as derivadas das temperaturas nodais em ordem ao tempo, \mathbf{C} é a matriz de capacidade térmica, \mathbf{K} é a matriz de condutibilidade térmica e \mathbf{Q} é o vector das cargas térmicas. O calor gerado pelo atrito nas superfícies de contacto pode ser obtido por $q_f = |\boldsymbol{\tau}_f| |\dot{\mathbf{u}}_t|$ onde $\boldsymbol{\tau}_f$ representa a tensão tangencial de atrito e $\dot{\mathbf{u}}_t$ a velocidade relativa tangencial à superfície de contacto entre a peça e a ferramenta.

3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OPTIMIZAÇÃO

Adopta-se uma formulação inversa do problema de optimização tendo como objectivo a determinação da geometria óptima da ferramenta da primeira etapa e da temperatura inicial óptima da peça que produz após forjamento multi-etapa, uma peça com as qualidades finais prescritas. Na resolução deste problema considera-se que a operação de forjamento ocorre em duas etapas, sendo fixas as geometrias da peça inicial e da ferramenta final.

O problema de optimização aqui apresentado é um problema multi-objectivo formulado da seguinte forma genérica

$$\text{Minimizar } \Pi(\mathbf{b}) = \beta_1 \varphi_d(\mathbf{b}) + \beta_2 \varphi_e(\mathbf{b}) \quad (7)$$

$$\text{sujeito a } \frac{\bar{T}_{fim}(\mathbf{b})}{T_a} - 1 \leq 0 \quad (8)$$

às restrições nas variáveis de projecto, $b_i^l \leq b_i \leq b_i^u$, $i=1, \dots, \bar{N}$ e às equações de estado do problema termomecânico (5) e (6). Os parâmetros β_i são parâmetros de regularização, T_a é a temperatura máxima admissível e \bar{T}_{fim} é a temperatura máxima registada na peça durante o processo de enformação. O primeiro funcional

$$\varphi_d(\mathbf{b}) = \int_{\partial\Omega_{fim}} \|\pi(\mathbf{X}) - \mathbf{X}(\mathbf{b})\|^2 ds \quad (9)$$

quantifica a distância entre a fronteira da peça forjada e a geometria prescrita para a peça e \mathbf{b} é o vector das variáveis de projecto; o outro funcional

$$\varphi_e(\mathbf{b}) = \int_0^t \left(\int_{\partial B'} \mathbf{t} \cdot \dot{\mathbf{u}} d\partial B' \right) dt \quad (10)$$

é a energia total do processo sendo \mathbf{t} o vector das forças de compressão aplicadas na fronteira peça/ferramenta, $\partial B'$, e $\dot{\mathbf{u}}$ a velocidade da ferramenta. A geometria da ferramenta inicial é parametrizada usando curvas B-spline cujos pólos móveis são variáveis geométricas de projecto. Para além destas variáveis geométricas considera-se ainda como variável de projecto a temperatura inicial da peça T_0 . Durante o processo a temperatura da peça altera-se dependendo de parâmetros como a tensão de cedência do material, a velocidade de enformação e o atrito, devendo o seu valor máximo ser limitado por aspectos metalúrgicos e de qualidade do produto final.

4. PESQUISA BASEADA NUM ALGORITMO GENÉTICO

Para resolver o problema de optimização formulado anteriormente foi desenvolvido um algoritmo genético [11]. Toda a informação é manipulada usando um formato binário com um número de bits definido para cada variável. O objectivo da pesquisa evolucionária é obter em cada geração o incremento do melhor mérito da população. O problema de optimização original pode ser rescrito

$$\text{Maximizar } F(\mathbf{b}) = \bar{F} - \Pi(\mathbf{b}) - \Psi_1(\mathbf{b}) \quad (11)$$

com

$$\Psi_1(\mathbf{b}) = \begin{cases} 0 & , \text{ se } \bar{T} \text{ fim}(\mathbf{b}) \leq T_a \\ \xi \left[\frac{\bar{T} \text{ fim}(\mathbf{b})}{T_a} - 1 \right]^\eta & , \text{ se } \bar{T} \text{ fim}(\mathbf{b}) > T_a \end{cases} \quad (12)$$

onde ξ e η são constantes calculadas considerando dois graus de violação das restrições e \bar{F} é uma constante arbitrária estabelecida com a finalidade de se obter mérito positivo.

O algoritmo genético desenvolvido baseia-se em quatro operadores principais suportados por uma estratégia elitista onde se preserva um núcleo da população composto pelos melhores indivíduos cujo material genético é transferido para as gerações seguintes. A nova população de soluções \mathbf{P}^{t+1} é gerada a partir da anterior \mathbf{P}^t usando os operadores genéticos *Seleção*, *Crossover*, *Eliminação/Substituição* e *Mutação*, tendo como objectivo a melhoria do melhor *Mérito* da população.

Na Figura 1 está esquematizado o algoritmo de optimização considerado. O primeiro passo é a geração aleatória da população inicial de vectores de projecto \mathbf{b} . Para cada um destes vectores é feita a simulação numérica do forjamento usando o modelo termo-mecânico desenvolvido. O operador *Seleção* é activado com o cálculo da função de mérito. Segue-se a ordenação dos indivíduos da população baseada no respectivo Mérito e a escolha dos progenitores que vão dar origem à descendência. Cada progenitor é seleccionado de forma aleatória e equiprovável: um pertence ao grupo da população com melhor Mérito (elite) e o outro é seleccionado do grupo restante com mérito inferior. A operação de *Crossover* baseia-se numa técnica de cruzamento uniforme multi-ponto aplicada às *strings* binárias dos cromossomas seleccionados [12]. Este *Crossover* é aplicado com uma probabilidade de escolha $P(c)$ do material genético do cromossoma com melhor Mérito. A descendência criada pelo *Crossover* é posteriormente reunida à população original. Proceder-se a nova ordenação da população alargada e é aplicado o operador *Eliminação/Substituição*. Este operador desempenha um papel importante na medida em que elimina as soluções com características genéticas similares. Este aspecto é crucial afim de se evitar o *incesto* nas gerações seguintes, isto é, o cruzamento de indivíduos (progenitores) com elevado grau de parentesco. As soluções eliminadas são substituídas por outras geradas aleatoriamente.

Após a substituição anteriormente referida procede-se a nova ordenação e eliminam-se as piores soluções com o objectivo de repor a dimensão da população. Segue-se o operador *Mutação* que altera o código binário do segmento do cromossoma correspondente a uma variável de projecto seleccionada aleatoriamente. A mudança é operada sobre um cromossoma de uma solução seleccionada de forma aleatória no grupo que constitui a elite da população. A operação de *Mutação* torna possível a exploração de regiões do domínio de projecto não mapeadas anteriormente e ao mesmo tempo garante a diversidade da população gerada.

Finalmente as condições de paragem são avaliadas com base nas variações do mérito médio dos melhores indivíduos da população. Para o efeito define-se a dimensão do grupo de referência. Se durante um número predefinido de gerações o mérito médio do grupo de referência não evoluir favoravelmente, o processo evolutivo está terminado. Caso contrário, a população evolui para a geração seguinte retornando à simulação numérica do forjamento para os vectores de projecto que definem a geração seguinte, \mathbf{P}^{t+1} .

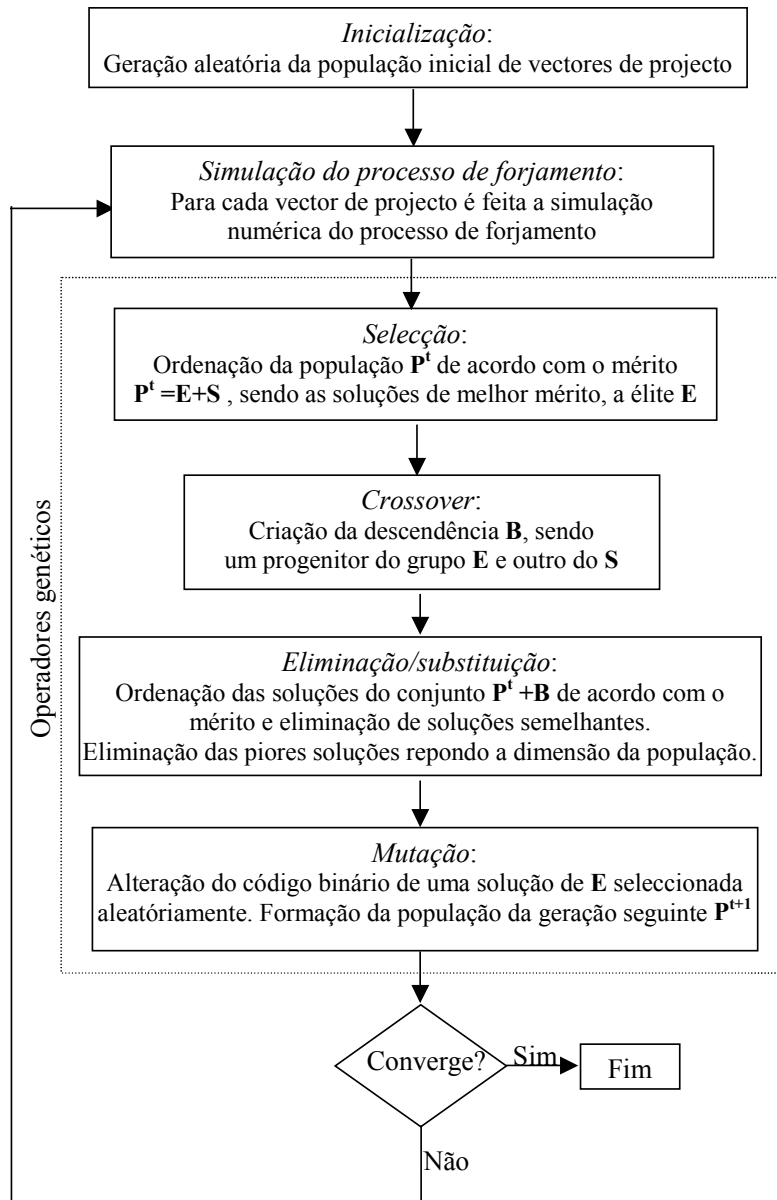


Figura 1. Algoritmo de optimização desenvolvido para o processo de forjamento.

5. EXEMPLO NUMÉRICO

O exemplo apresentado é a simulação numérica da compressão axissimétrica de um cilindro de uma liga de alumínio AL6016T6 [8]. A peça inicial é um provete cilíndrico com 20mm de altura e 25mm de diâmetro. Dada a simetria apenas se considera um quarto do cilindro que foi subdividido em elementos isoparamétricos lineares de 4 nós. A Figura 2 apresenta a geometria do problema. A matriz considera-se rígida sem geração interna de calor e foi discretizada utilizando o mesmo tipo de elementos. Entre a peça e a ferramenta considera-se uma lei de atrito de factor constante $m_f = 0.8$. A fracção de trabalho plástico de deformação que se transforma em calor é igual a 90%. O coeficiente de condutibilidade térmica do material considerado é igual a $k = 155 \text{ N/s K}$.

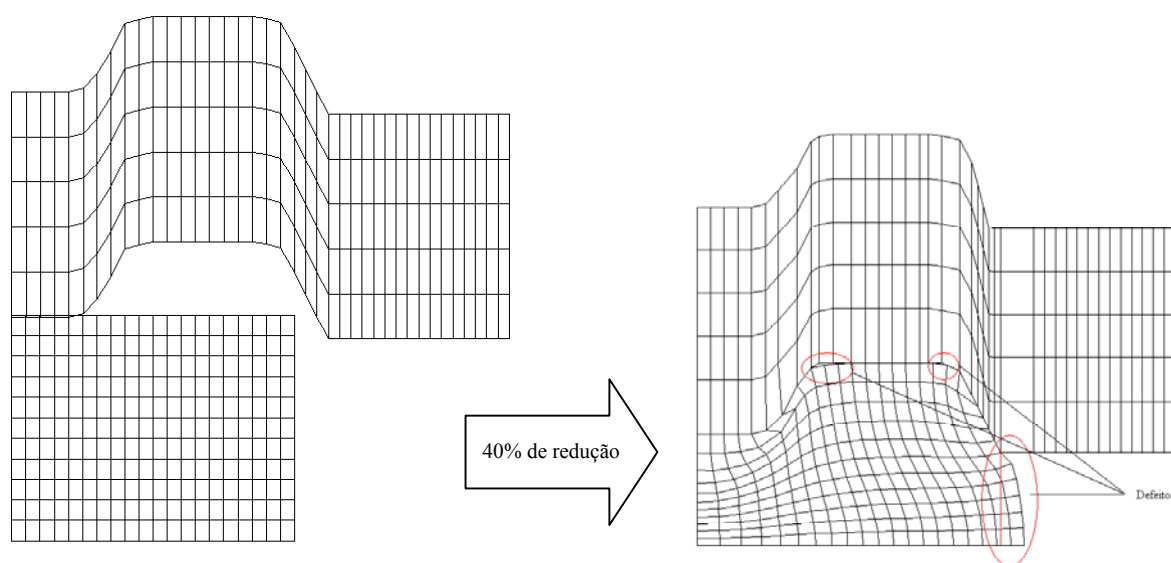


Figura 2. Discretização da peça e da ferramenta efectuada através de elementos finitos.

Com o exemplo aqui apresentado pretende-se otimizar o forjamento de uma peça em forma-H. A simulação apresentada na Figura 2 corresponde ao forjamento numa única etapa do provete em forma de cilindro usando uma matriz com a geometria prescrita para a peça final. A redução em altura efectuada pela simulação é de 40%. Tal como está indicado na Figura 1, o produto final apresenta vários defeitos que incluem o não preenchimento do molde e o chamado efeito de barril. Com o processo de optimização pretende-se simular o forjamento do provete cilíndrico em duas etapas sendo a geometria da ferramenta da primeira etapa determinada por uma curva B-spline cúbica e a geometria da matriz da etapa final igual à forma prescrita para o produto final. O forjamento optimizado deverá produzir uma peça com a forma-H prescrita e sem defeitos. Para tal considerou-se um vector de projecto \mathbf{b} com 7 variáveis: as primeiras seis componentes da variável \mathbf{b} correspondem aos desvios dos pólos da B-spline e a sétima componente da variável de projecto é a temperatura inicial da peça a

forjar. São impostas restrições às variáveis de projecto geométricas $-2 \leq b_i \leq 2$ mm, $i=1, \dots, 6$ e à variável de temperatura inicial da peça $473 \text{ K} \leq T_0 = b_7 \leq 623 \text{ K}$. Na peça a temperatura máxima admissível durante o forjamento é de $T_a = 723 \text{ K}$, a fim de evitar defeitos introduzidos pelas elevadas temperaturas experimentadas pela peça.

Ao fim de 134 gerações o processo evolutivo conduziu à solução óptima para o forjamento em duas etapas. A evolução do melhor mérito em cada geração é apresentado na Figura 3. Tratando-se de um processo elitista observa-se uma função em escada uma vez que o aparecimento de uma solução melhor e portanto de uma solução com maior mérito não surge em cada nova geração.

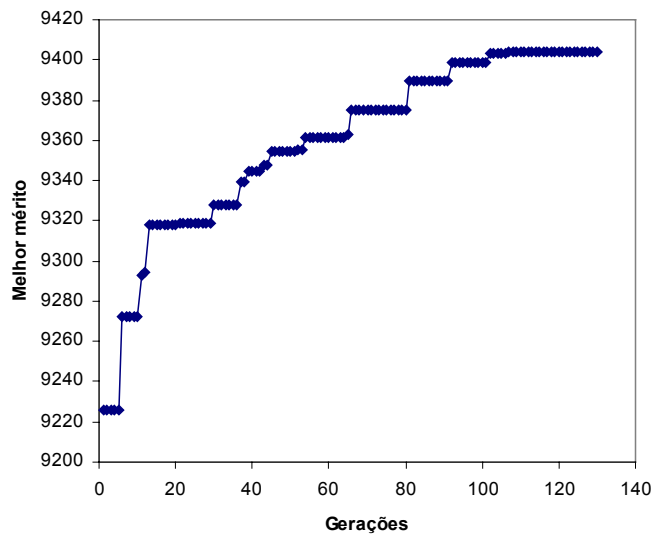


Figura 2. Evolução do melhor mérito de cada geração ao longo do processo evolutivo.

As Figuras 4 e 5 apresentam a simulação correspondente à solução óptima. A solução óptima $\mathbf{b}^T = [0.533, 0.066, -0.533, 1.666, 2.866, -1.733, 562.]$ corresponde ao vector de projecto óptimo. As primeiras 6 componentes estão em mm e correspondem à geometria da matriz da primeira etapa e a última componente de unidades grau Kelvin corresponde à temperatura inicial da peça a forjar.

No final da segunda etapa obtém-se um produto com geometria muito próxima da prescrita. A matriz no final da segunda etapa é totalmente preenchida e o efeito em forma de barril é diminuto. Um aspecto importante da optimização relaciona-se com o aquecimento da peça durante o processo de enformação. A temperatura final da peça regista um valor da ordem dos 570 K. Durante a simulação do forjamento óptimo a peça não experimentou temperaturas superiores ao admissível.

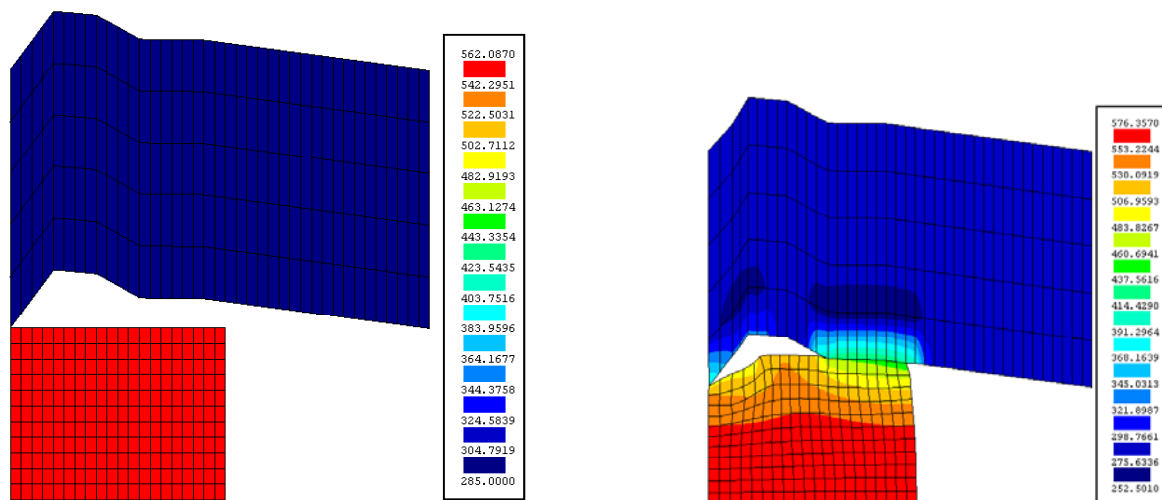


Figura 4. Simulação da primeira etapa do forjamento óptimo.

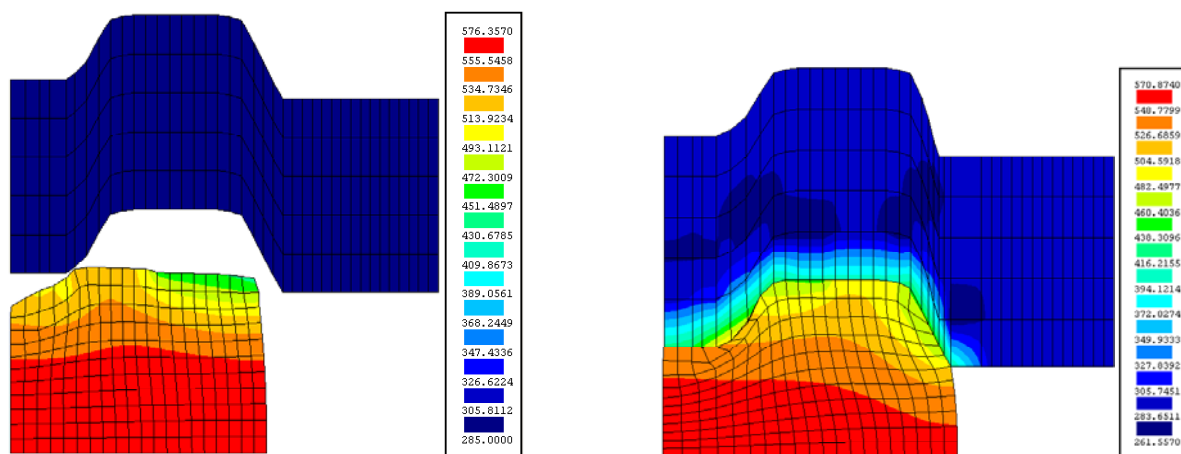


Figura 5. Simulação da etapa final do forjamento óptimo.

6. CONCLUSÕES

Apresentou-se um modelo baseado em técnicas inversas e pesquisa evolucionária proposto para o projecto óptimo de peças forjadas a quente. Para além de minimizar os gastos de energia associados ao processo de enformação, pretendeu-se otimizar a forma da ferramenta

inicial e seleccionar a temperatura inicial óptima da peça a forjar. Técnicas de optimização apoiadas em simulações numéricas permitem eliminar potenciais causas de defeitos e evitar não só experiências de forjamento reais com gastos elevados de tempo e material como também reduzir os desperdícios de material devido à necessidade de operações de maquinaria posteriores ao forjamento. O trabalho de simulação e optimização foi desenvolvido num computador portátil Pentium III. O tempo de computação envolvido para simular cada processo de forjamento em duas etapas foi cerca de 2 minutos e o tempo total do processo de optimização ultrapassou em pouco as 24 horas.

REFERÊNCIAS

- [1] O.C. Zienkiewicz e R.L. Taylor, *The finite element method*, McGraw Hill, Vol. I (1989).
- [2] S. Kobayashi, S. Oh e T. Altan, *Metal Forming and the Finite Element Method*, Oxford University Press, New-York (1989).
- [3] J-L. Chenot, E. Massoni e L. Fourment, Inverse problems in finite element simulation of metal forming processes, *Engineering Computations*, **13** (2/3/4),190-225 (1996).
- [4] C.F. Castro, *Métodos Inversos em Processos de Enformação Plástica*, Tese de Doutoramento, Universidade do Porto, Portugal (2000).
- [5] C.F. Castro, L. Costa Sousa, C.A.C. António e J.M.A. César de Sá., An efficient algorithm to estimate optimal preform die shape parameters in forging, *Engineering Computations*, 18 (7/8), 1057-1077 (2001).
- [6] C.F. Castro, C.A.C. António e L.C. Sousa, Optimisation of shape and process parameters in metal forging using genetic algorithms, *J. Materials Proc. Technology*, **146**, 356-364 (2004).
- [7] J.M. César de Sá, L. Costa Sousa e M.L. Madureira, Simulation model for hot and cold forging by mixed methods including adaptive mesh refinement, *Engineering Computations*, **13** (2/3/4), 339-360 (1996).
- [8] L.C. Sousa, C.F. Castro, C.A.C. António e A.D. Santos, Inverse methods in design of industrial forging processes, *J. Materials Proc. Technology*, **128**, 266-273 (2002).
- [9] L.M. Costa Sousa, *Modelação Termomecânica de Processos de Enformação Plástica por Formulações Mistas*, Tese de Doutoramento, Universidade do Porto, Portugal (1993).
- [10] N. Rebelo e S. Kobayashi, A coupled analysis of viscoplastic deformation and heat transfer - applications, *Int. J. Mech. Science*, **22**, 707-718 (1989).
- [11] K. DeJong, Evolutionary computation: Recent developments and open issues, *Evolutionary Algorithms in Engineering Computer Science EUROGEN99*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 43-54 (1999).
- [12] W.M. Spears e S.K. DeJong, On the virtues of parametrized uniform crossover, *Proceedings of Fourth International Conference on Genetic Algorithms*, Morgan Kaufmann, 230-236 (1991).