

ESTUDO DO DESGASTE EM UMA MATRIZ DE FORJAMENTO À QUENTE PELA TÉCNICA NUMÉRICA DE ELEMENTOS FINITOS¹

*Frederico de Castro Magalhães²
Antônio Estáquio de Melo Pertence³
Haroldo Béria Campos⁴
Maria Teresa Paulino Aguilar⁵
Paulo Roberto Cetlin⁶*

Resumo

O desgaste é uma das principais causas das falhas de matrizes de forjamento a quente. A experiência tem mostrado que não é fácil descrevê-lo matematicamente, em virtude das não linearidades das influências dos parâmetros de importância no fenômeno. Desse modo, este trabalho analisa a previsão do desgaste de matrizes de forjamento a quente de corpos moedores, empregando o modelo de desgaste de Archard e a simulação numérica através de elementos finitos.

Palavras-chave: Forjamento a quente; Matrizes; Corpos moedores; Desgaste; Elementos finitos.

PREDICTION OF WEAR IN HOT FORGING TOOLS BY FINITE ELEMENT ANALYSIS

Abstract

Wear is one of the main mechanics causing the failure of hot forging dies. Experimental results indicate that it is difficult to describe mathematically this phenomenon, due to the non-linearities of the influences of the parameters of importance in wear. The present work analyses the prediction of the wear in dies for hot forging of milling bodies, employing Archard's approach and a numerical simulation based on finite elements.

Key words: Hot forging; Dies; Milling bodies; Wear; Finite elements.

¹ *Contribuição técnica ao 64° Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Aluno de Pós-Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da UFMG, fredmag@br.inter.net*

³ *Professor, UFMG, Departamento de Engenharia Mecânica.*

⁴ *Professor Associado, UFMG, Departamento de Engenharia Mecânica.*

⁵ *Professor Associado, UFMG, Departamento de Engenharia de Materiais e da Construção Civil.*

⁶ *Professor Titular, UFMG, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.*

1 INTRODUÇÃO

Conforme estudo realizado por Robert,⁽¹⁾ as ferramentas de conformação a quente são empregadas em três tipos de matrizes industriais: matrizes de forjamento a quente e a morno, moldes e matrizes de fundição de ligas não ferrosas e matrizes de extrusão de ligas não ferrosas. Nas aplicações de forjamento, destaca-se o forjamento a quente de aços, especialmente aqueles para peças automobilísticas,⁽²⁾ onde há uma alta exigência dimensional em seus componentes.⁽³⁾

Na operação de forjamento a quente, o tarugo a ser forjado pode encontrar-se a temperaturas acima de 1.000°C. Quanto maior for o tempo de contato entre o tarugo e as ferramentas, maior será a temperatura alcançada por estas,⁽⁴⁾ levando a perda gradual da dureza da superfície das matrizes, por revenimento do aço. Este fenômeno acentua o desgaste mecânico e térmico das matrizes e facilita sua deformação plástica. Desta forma, identificam-se, comumente, 4 mecanismos de falha de matrizes para o forjamento a quente: desgaste, deformação plástica, fadiga mecânica e mecânica, durante a operação de forjamento a quente. A figura 1 ilustra a ocorrência de tais fenômenos.⁽⁴⁾

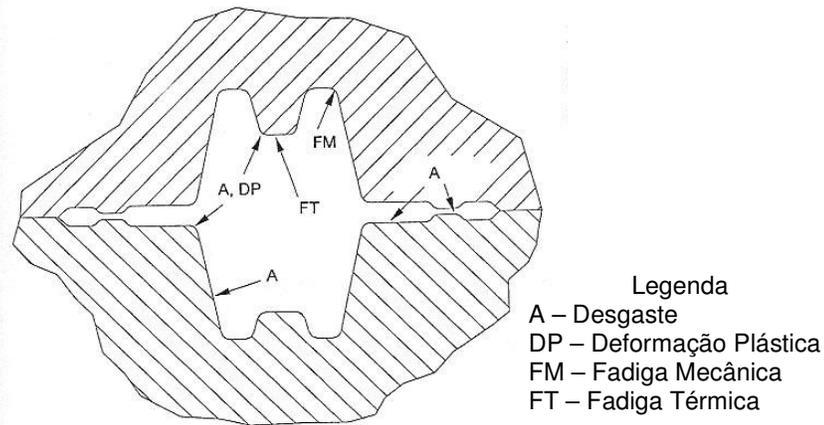


Figura 1. Mecanismos de desgastes presentes na ferramenta de forjamento a quente.

O desgaste está habitualmente associado à perda ou remoção progressiva de material de uma superfície e é comumente dividido nos seguintes tipos: (I) Adesivo, (II) Abrasivo, (III) Oxidação ou outras reações químicas e (IV) Fadiga térmica. Comumente, consideram-se os dois primeiros tipos como os mais importantes.

Summerville Venkatesan e Subramanian,⁽⁵⁾ considera que o mecanismo de desgaste predominante no forjamento a quente é o abrasivo, que se origina na ação das numerosas partículas duras que se interpõem entre as superfícies do material a ser forjado e da ferramenta (abrasão entre 3 corpos). A abrasão pode ainda ocorrer diretamente pelo contato e movimento entre dois corpos, onde o mais duro deles, desgasta o mais macio (abrasão entre 2 corpos).

A equação fenomenológica que geralmente é utilizada na análise do desgaste, é a Equação (1) de Archard:⁽⁶⁾

$$W = k \int \frac{P_i V_i}{H_i} . dt \quad (1)$$

W é o volume de material removido por desgaste de abrasão, P_i é a carga normal aplicada na matriz, V_i é a velocidade de deslizamento, H_i é a dureza superficial e K é o coeficiente de desgaste por abrasão, que depende de vários

fatores. A Tabela 1 mostra a faixa de valores para o coeficiente de desgaste por abrasão, $K_{\text{abrasão}}$ (adimensional).

Tabela 1 – Valores para o coeficiente de abrasão⁽⁷⁾

Mecanismo de desgaste por abrasão	$K_{\text{abrasão}}$
Abrasão entre dois corpos	1 (sem abrasão)
	10^{-4} (com lubrificação)
Abrasão entre três corpos	10^{-2} (sem abrasão)
	10^{-6} (com lubrificação)

O objetivo do presente trabalho foi investigar numericamente, através do aplicativo comercial DEFORM 2D, evolução do desgaste de uma ferramenta destinada ao forjamento a quente de corpos moedores (bolas para moinho), aplicando a equação de Archard, e comparar as dimensões finais do produto e das matrizes superior e inferior com aquelas obtidas industrialmente, visando verificar a aplicabilidade industrial da simulação numérica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O ferramental construído pode ser visto na Figura 2, e visava o forjamento a quente de corpos moedores esféricos com diâmetro nominal de 90 mm, prevendo-se a formação de rebarba entre as matrizes. Para assegurar o exato posicionamento e evitar um possível deslocamento relativo das matrizes superior e inferior foram utilizados pinos guias, indicados na Figura 2. O material utilizado foi o aço ferramenta H13, que apresentou uma dureza média de 52 HRC depois de temperado e revenido. O material dos corpos moedores foi o aço ABNT 1045. A concepção do ferramental produzido se enquadra no forjamento a quente de matrizes abertas com a formação de rebarba.



Figura 2. Matrizes superior e inferior empregadas no forjamento de corpos moedores.

O forjamento utilizou uma prensa mecânica de 450 Ton, que foi regulada para que, no final do seu curso, a distância entre as matrizes superior e inferior fosse de 3 mm, definindo assim, a espessura final da rebarba.

De acordo com Grünning,⁽⁸⁾ a fim de evitar a flambagem do tarugo a sua altura não deve exceder a 2,5 vezes o seu diâmetro. Assim sendo, foi usado um tarugo cilíndrico, no aço ABNT 1045, com diâmetro de 76,2 mm e altura de 120 mm, aquecido a uma temperatura de 950°C. Esse mesmo tarugo foi posicionado em pé, apoiado na matriz inferior, que foi pré-aquecida até 200°C, juntamente com a matriz

superior. As matrizes recebiam a aplicação de um desmoldante a base de grafite durante o intervalo de forjamento entre o forjamento sucessivo de dois corpos moedores. Após o forjamento de 950 peças, foram medidas as dimensões das matrizes superior e inferior, do último corpo moedor forjado e de sua rebarba.

2.1 Método dos Elementos Finitos

O aplicativo numérico, DEFORM 2D® (SFTC – Scientific Forming Technologies, Ohio, USA), empregado para simular o forjamento e o desgaste, utiliza a formulação implícita de integração no tempo, onde, a solução da equação de governo que rege o equilíbrio é obtida pela consideração no tempo $t+\Delta t$. Sendo conhecidos o deslocamento e a velocidade no tempo t , para obter estes valores no tempo $t+\Delta t$, o equilíbrio de forças no tempo é dado pela Equação (2):

$$M\ddot{U}_{t+\Delta t} + C\dot{U}_{t+\Delta t} + KU_{t+\Delta t} = R_{t+\Delta t} \quad (2)$$

Em problemas que envolvem não-linearidades, geralmente é utilizado o método incremental de Newton-Raphson para se obter o valor de $\ddot{U}_{t+\Delta t}$. Nele, por exemplo, o deslocamento da matriz superior de forjamento é dividido em pequenos incrementos e em cada um deles, é calculado o vetor deslocamento. Este método requer a montagem e a inversão da matriz de rigidez a cada novo incremento, o que representa um aumento no tempo de processamento.

Em virtude das matrizes superior e inferior e do material a ser forjado apresentarem geometrias de revolução em torno de um mesmo eixo, o conjunto matrizes/material foi reduzido a um estado de deformação axissimétrica, conforme a figura 3.

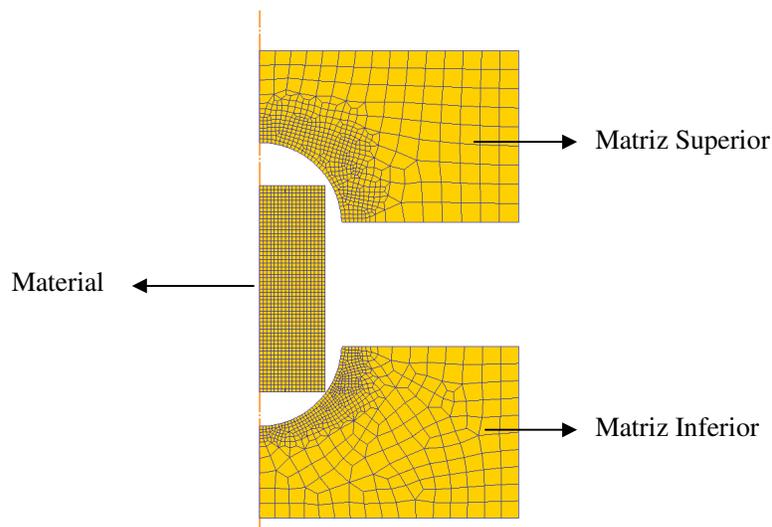


Figura 3. Modelagem do conjunto.

O aço ABNT 1045 foi modelado como material isotrópico e rígido-plástico, com uma malha de 1.000 elementos quadrados, conforme a Figura 3. A curva de fluxo para descrever o comportamento do aço ABNT 1045 durante o forjamento é função da deformação, da taxa de deformação e da temperatura $\bar{\sigma}_{ef} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}_{ef}, \dot{\epsilon}_{ef}, T)$ e

suas propriedades mecânicas e térmicas foram obtidas diretamente da biblioteca do aplicativo. As matrizes superior e inferior também foram modeladas como materiais isotrópicos e rígido-plásticos, com 500 elementos quadrados. A malha é mais densa, com elementos com 0,75 mm, na região de contato com o material a ser forjado, garantindo assim, boa convergência dos resultados. Uma malha mais grosseira, (elementos com 5 mm), foi empregada no restante das matrizes, sem prejuízo para os resultados. Foi utilizado um fator de atrito de 0,3 nas interfaces das matrizes/material.

2.2 Transferência de Calor

A evolução térmica do material e das matrizes, no processo de forjamento a quente, envolve a geração de calor causada pela deformação plástica do material e pelo atrito material/ferramenta e a dissipação de calor por transmissão ao meio ambiente.

O aplicativo numérico considera todos os efeitos descritos no parágrafo anterior. Empregou-se uma temperatura ambiente de 25°C, e as condutividades térmicas dos materiais foram retiradas da biblioteca do aplicativo numérico, utilizando-se um coeficiente de transferência convectiva de 50 Watt/m².K.

2.3 Desgaste

Para descrever o desgaste nas matrizes de forjamento a quente, o aplicativo numérico utiliza a abordagem generalizada de Archard, descrita pela Equação (3):

$$W = \int K \cdot \frac{F^a \cdot v^b}{H^c} \cdot dt \quad (3)$$

Para os aços ferramenta, o aplicativo sugere a=b=1 e c=2. K é um coeficiente normalmente calibrado experimentalmente, e no presente caso, foi tomado k=300 para o forjamento de 950 peças.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o forjamento de 950 corpos moedores, foram medidos os diâmetros do corpo moedor na região compreendida pela rebarba e perpendicular a essa, obtendo-se os valores mostrados na Figura 4. Estes valores indicam um aumento e uma ovalização das dimensões das matrizes.

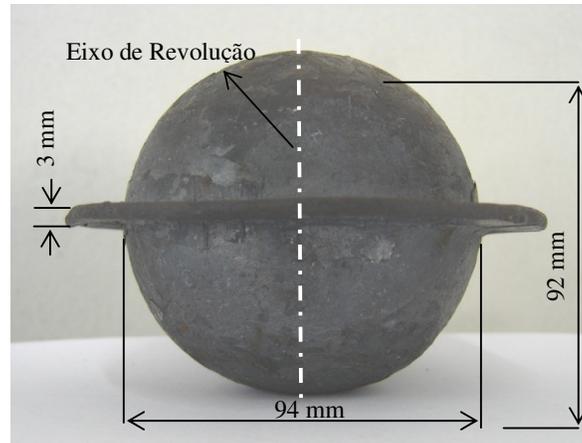


Figura 4. Medições dos diâmetros do corpo moedor, com rebarba, em duas direções.

O desgaste abrasivo previsto numericamente, após 950 peças forjadas, foi muito semelhante para as matrizes superior e inferior. A Figura 5 ilustra tal desgaste para a matriz inferior. Através da Figura 4 pode-se verificar que o diâmetro do corpo moedor na região da rebarba foi de 94 mm, enquanto que o diâmetro perpendicular a essa região, no eixo de revolução, foi de 92 mm, uma diferença de 2 mm, remetendo a uma ovalização do produto forjado.

A Figura 5 mostra que o desgaste predito é bastante uniforme, e da ordem de 1 mm, ao longo de toda a região de contato material/matriz. Por outro lado, somente este desgaste conduziria a um diâmetro horizontal final de do produto de 92 mm, e não ao diâmetro de 94 mm, medido experimentalmente (Figura 4). Outro possível mecanismo atuante, e que poderia causar alterações dimensionais no produto final, seria a deformação plástica das matrizes, associado à queda do limite de escoamento do material (H13) causado pelo seu aquecimento.

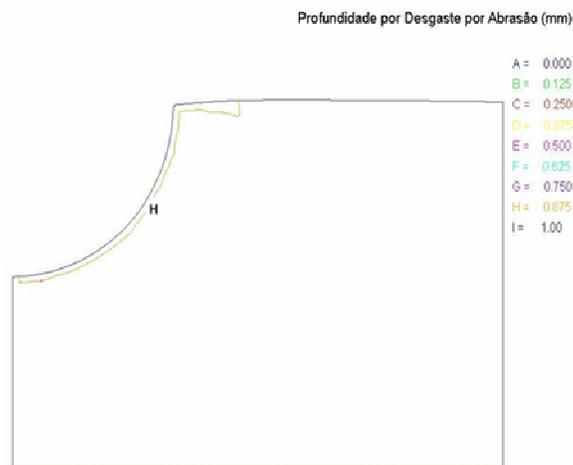


Figura 5. Profundidade de desgaste por abrasão na matriz inferior.

A Figura 6 mostra o resultado da simulação numérica onde se analisou, exclusivamente, tal possibilidade. Nesta simulação, levou-se em conta a queda das tensões de escoamento do material com a temperatura e as tensões aplicadas nas matrizes durante o forjamento. A figura 6 mostra que a deformação plástica é mais pronunciada na região do diâmetro horizontal do corpo moedor.

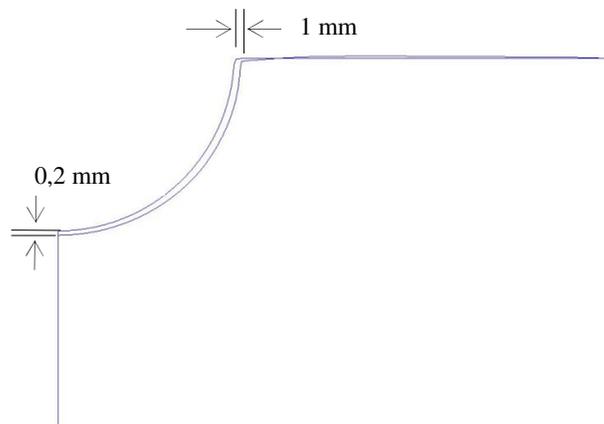


Figura 6. Deformação plástica apresentada pela matriz inferior de forjamento.

A Tabela 2 apresenta uma comparação entre as dimensões finais obtidas industrialmente e aquelas previstas numericamente (incluindo o desgaste e a deformação plástica das matrizes).

Tabela 2 – Comparativo das Dimensões dos Diâmetros

	Industrial	Numérico
Diâmetro na região da rebarba (mm)	94	93,75
Diâmetro no eixo de revolução (mm)	92	91,5
Espessura da rebarba (mm)	3	3,25

4 CONCLUSÕES

A simulação numérica do processo de forjamento a quente de corpos moedores permitiu uma avaliação adequada da variação dimensional das matrizes ao longo de sua utilização.

A variação dimensional das matrizes prevista no presente caso foi causada pela deformação plástica e pelo desgaste das matrizes.

A simulação numérica do forjamento a quente de corpos moedores revelou-se uma ferramenta de interesse na avaliação da vida útil das matrizes empregadas no processo.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES e ao CNPq pelo suporte para a concretização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 ROBERTS, G.; KRAUSS, G.; KENNEDY, R. Tools Steels. 5.ed. Materials Park, Ohio: ASM International, p. 1-123. P. 219-250, (1998);

- 2 BYRER, T.G.; SEMITIAN, A.L.; VOLLMER, D.C. Forging Handbook. Metals Park, Ohio: ASM, p. 195-217, (1985);
- 3 LEE, R.S.; JOU, J.L. *Application of numerical simulation for wear analysis of warm forging die*. Journal of Materials Processing Technology, v.140, p. 43-48, (2003);
- 4 BEHRENS, B.A. *Finite element analysis of die wear in hot forging processes*. CIRP Annals – Manufacturing Technology, v.57, p.305-308, (2008);
- 5 SUMMERVILLE, E.; VENKATESAN, K.; SUBRAMANIAN, C. *Wear processes in hot forging press tools*. Mater. Des., v.16, n.5, p. 289-294, (1995);
- 6 SHIVPURI, R.; BABU, S. ASM Handbook: Metalworking: Bulk Forming, v.14A, p.62-82, (2005);
- 7 RODRIGUES, J.; MARTINS, P. Tecnologia Mecânica. V.01, p.562-569, (2005);
- 8 GRUNNING, K. Técnica da Conformação. p. 38-64, (1996);