



COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MATRIZES DE FORJAMENTO A QUENTE MONTADAS SOB INTERFERÊNCIA¹

Frederico de Castro Magalhães²
Antônio Eustáquio de Melo Pertence³
Haroldo Béria Campos³
Maria Teresa Paulino Aguilár⁴
Paulo Roberto Cetlin⁵

Resumo

No processo de forjamento a quente as matrizes devem possuir uma elevada resistência ao desgaste e às solicitações de compressão e choque (tenacidade). O desgaste e a deformação plástica podem causar problemas dimensionais inaceitáveis no produto, conduzindo a dispendiosos sucateamento ou recuperação da matriz. O objetivo do presente trabalho é investigar e comparar numericamente, através do aplicativo comercial DEFORM 2D, a influência da montagem com interferência, fazendo uso de um anel de pressão, na evolução do desgaste (aplicando a equação de Archard) e na deformação plástica de uma ferramenta destinada ao forjamento de corpos moedores (bolas para moinho)

Palavras-chave: Forjamento a quente; Matrizes; Anel de pressão; Desgaste; Elementos finitos.

MECHANICAL BEHAVIOR OF HOT FORGING DIES MOUNTED UNDER INTERFERENCE

Abstract

Hot forging dies should display high strength, toughness and low wear. Plastic deformation and wear of the dies lead to their costly refitting or disposal. The objective of the present paper is the analysis of the role of interference mounted rings, placed around the forging dies, on the plastic deformation and wear of a die employed in the production of spherical milling bodies. The situation was analyzed through the Finite Element Method, employing the DEFORM 2D software.

Key words: Hot forging; Dies; Pressure ring; Wear; Finite elements.

¹ Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

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

³ Professor Associado, UFMG, Departamento de Engenharia Mecânica.

⁴ Professor Associado, UFMG, Departamento de Engenharia de Materiais e da Construção Civil.

⁵ Professor Titular, UFMG, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1 INTRODUÇÃO

No forjamento a quente o material a uma temperatura adequada é deformado entre duas matrizes que, ao se deslocarem uma em direção a outra, imprimem ao material a forma negativa de suas cavidades. Tais matrizes devem possuir uma elevada resistência ao desgaste e às solicitações de compressão e choque (tenacidade).⁽¹⁾

No presente caso, analisa-se o forjamento de um tarugo cilíndrico até a forma de uma bola, e a Figura 1 ilustra a matriz inferior empregada. O forjamento é realizado por compressão axial, que se decompõe em componentes radiais e circunferências na matriz, da forma ilustrada na Figura 1. A componente radial atua como pressão sobre a parede interna da cavidade, que, associada ao movimento relativo entre o material sendo forjado e a matriz, conduz ao desgaste da ferramenta.⁽²⁾ O complexo estado de tensões vigente na matriz, associado à queda na resistência mecânica de seu material associado ao seu aquecimento causado pelo contato com o material aquecido, pode causar deformações plásticas nesta matriz. O desgaste e a deformação plástica podem causar problemas dimensionais inaceitáveis no produto, conduzindo aos dispendiosos sucateamento ou recuperação da matriz. Finalmente, existe a possibilidade que as tensões trativas circunferências conduzam à fratura (parcial ou total) das matrizes, comumente inutilizando-as.

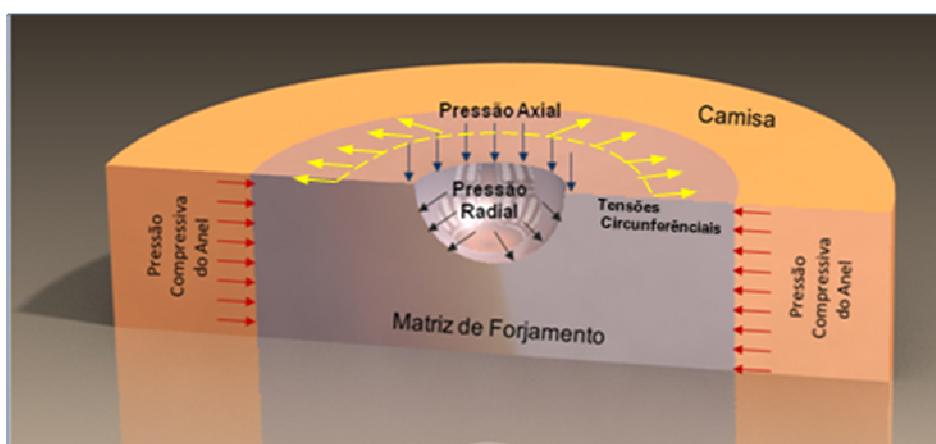


Figura 1. Efeito da pressão em uma matriz de forjamento a quente provida de um anel de pressão.

Visando diminuir as tensões trativas circunferenciais, é comum o encamisamento, sob interferência das matrizes, utilizando anéis como o ilustrado na figura 1, e que submetem a matriz a uma tensão radial de compressão.

Summerville et al.,⁽³⁾ considera que o mecanismo de desgaste predominante no forjamento a quente é o abrasivo, que se origina (a) na ação de partículas duras que se interpõem entre as superfícies do material a ser forjado e da ferramenta (abrasão entre 3 corpos) e/ou (b) 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) generalizada de Archard:⁽⁴⁾

$$W = \int K \cdot \frac{P^a \cdot v^b}{H^c} \cdot dt \quad (1)$$

W é o volume de material removido por desgaste de abrasão, P é a carga normal aplicada na matriz, V é a velocidade de deslizamento entre os dois corpos em contato, H 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⁽⁴⁾

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 e comparar numericamente, através do aplicativo comercial Deform 2D, a influência da montagem com interferência, fazendo uso de um anel de pressão, na evolução do desgaste (aplicando a equação de Archard) e na deformação plástica de uma ferramenta destinada ao forjamento a quente de corpos moedores (bolas para moinho).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os ferramentais projetados (com e sem anel de pressão) podem ser vistos 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. As matrizes utilizaram o aço ferramenta H13, com dureza média inicial de 52 HRC e a camisa o aço carbono ABNT 1020. 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.

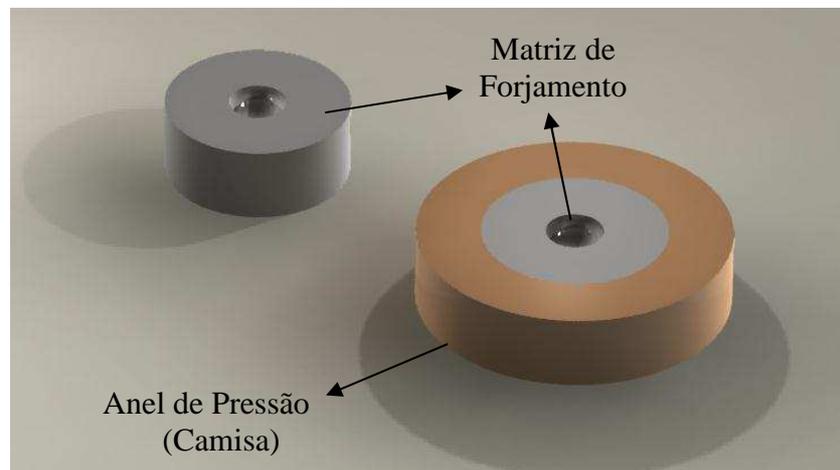


Figura 2. Concepção da matriz com e sem anel de pressão.

Para o cálculo inicial da interferência da camisa externa com a matriz de forjamento, (montagem de fora para dentro), empregou-se a norma DIN 7190,⁽⁵⁾ onde a valor da interferência é em função das propriedades elásticas dos materiais e de suas dimensões, através da equação (2).

$$Z=(K_{II} + K_I).D_a.P_a \quad (2)$$

Z é a interferência em μm , K_I e K_{II} são coeficientes que dependem das propriedades elásticas das matrizes, D_a é o diâmetro de ajuste (mm) dado pela equação (3) e P_a é a pressão exercida no ajuste (Kg/mm^2) através da equação (4).

$$D_a = 4 \sqrt{\frac{\sigma_{e\text{Matriz}}}{\sigma_{e\text{Anel}}}} \cdot \sqrt{D_{\text{Matriz}} \cdot D_{\text{Anel}}} \quad (3)$$

$\sigma_{e\text{Matriz}}$ é a tensão de escoamento da matriz e $\sigma_{e\text{Anel}}$ é a mesma tensão para o anel, D_{Matriz} é o diâmetro interno da cavidade e D_{Anel} é diâmetro externo do anel.

$$P_a = \sigma_{e\text{Matriz}} \cdot \frac{\left(1 - \left(\frac{D_{\text{Matriz}}}{D_a}\right)^2\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{D_a}{D_{\text{Anel}}}\right)^2\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{\sigma_{e\text{Matriz}}}{\sigma_{e\text{Anel}}} \cdot \left(\frac{D_{\text{Matriz}}}{D_a}\right)^2\right)\right)}{2 \cdot \left(1 - \left(\frac{D_{\text{Matriz}}}{D_{\text{Anel}}}\right)^2\right)} \quad (4)$$

Após o forjamento de 950 peças, foram medidas as dimensões da cavidade das matrizes de forjamento.

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 (U) e a velocidade (\dot{U}) no tempo t , para obter estes valores no tempo $t+\Delta t$ faz-se uma estimativa inicial destes valores, que são então ajustados pela solução numérica da equação de equilíbrio das forças (equação 5), buscando a minimização do resíduo $R_{(t+\Delta t)}$:

$$M\ddot{U}_{t+\Delta t} + C\dot{U}_{t+\Delta t} + KU_{t+\Delta t} = R_{t+\Delta t} \quad (5)$$

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.

Como as matrizes superior e inferior, os anéis de pressão e o material a ser forjado, apresentam geometrias de revolução em torno de um mesmo eixo, o conjunto matrizes/anel de pressão/material foi reduzido a um estado de deformação axissimétrica, conforme a Figura 3.

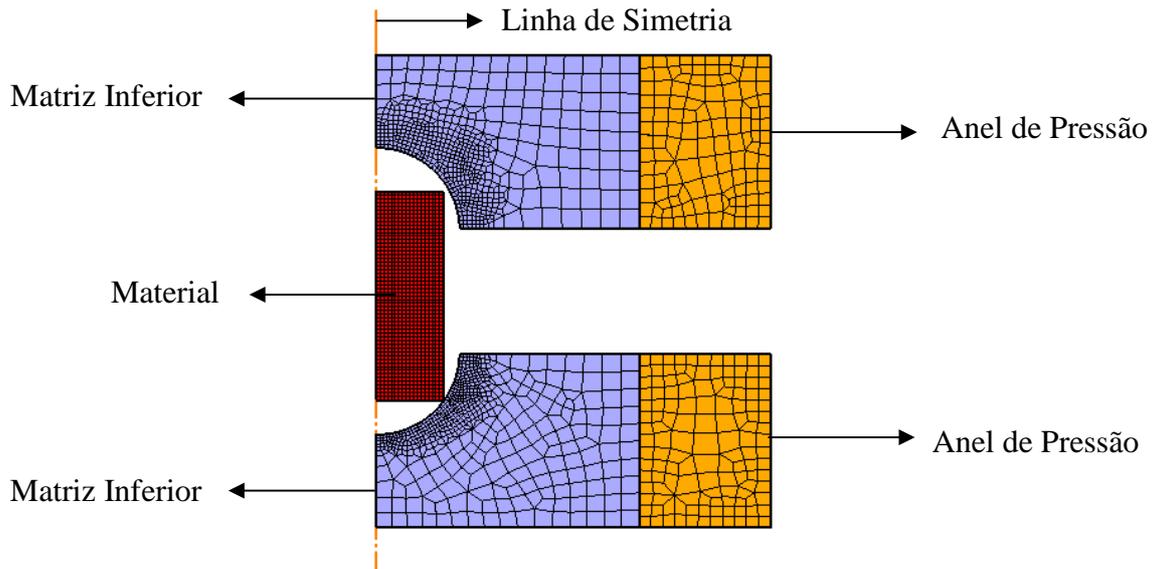


Figura 3. Modelagem do conjunto.

O aço ABNT 1045 foi modelado como material isotrópico e rígido-plástico, com uma malha de 1.000 elementos quadrados; sua equação constitutiva em função da deformação, da taxa de deformação e da temperatura e suas propriedades térmicas foram obtidas diretamente da biblioteca do aplicativo. As matrizes superior e inferior (aço H13) e os anéis de pressão (aço ABNT 1020) também foram modelados como materiais isotrópicos e rígido-plásticos, com 700 e 250 elementos quadrados, respectivamente. Para as matrizes superior e inferior, foi gerada uma malha é mais densa, com elementos com 0,75 mm, na região de contato do 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. Os anéis foram discretizados com elementos de 5mm. Foi utilizado um fator de atrito de 0,3 nas interfaces das matrizes/material.

2.2 Transferência de Calor

A evolução térmica do material, das matrizes e dos anéis de pressão 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. A temperatura inicial do material foi 950°C, 250°C para as matrizes e 150°C para o anel.

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 (1).

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

Para o cálculo da interferência foi adotado o diâmetro interno de 90mm para a matriz, 500mm para o diâmetro externo do anel, $896\text{MPa}^{(6)}$ para a tensão de escoamento para o aço H13 e $330\text{MPa}^{(6)}$ para o aço 1020, K_I igual a $0,039 \cdot 10^{-3}^{(5)}$ e K_{II} igual a $0,016 \cdot 10^{-3}^{(5)}$. Empregando as Equações (3) e (4) determinou-se, através da Equação (2), que a interferência seria aproximadamente de 3mm.

Para uma melhor compreensão da influência da montagem com interferência sobre a tensão efetiva e o desgaste da matriz, foram avaliadas graficamente as suas variações sobre a matriz inferior, entre a quina (ponto P_0) e o fundo da cavidade (ponto P_f) indicados na Figura 4. A região I refere-se ao fundo da matriz, a região II à região dos primeiros contatos do material com a matriz durante o forjamento, e a região III corresponde à parte superior da cavidade, incluindo a zona de formação da rebarba. A distância entre os pontos P_0 e P_f , sobre a cavidade da matriz, foi determinada considerando $\frac{1}{4}$ do comprimento de uma circunferência com raio de 45 mm. A distância entre o ponto P_0 e o ponto inicial de contato entre o material e a matriz (indicado na Figura 4) foi de 27 mm.

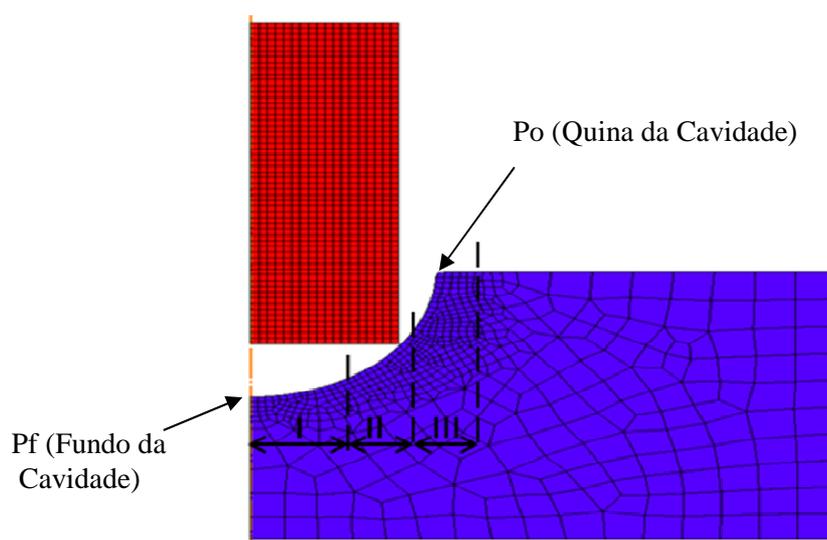


Figura 4. Identificação das três regiões para análise na matriz inferior e a posição inicial do tarugo.

A Figura 5 mostra a distribuição da tensão efetiva sobre a matriz com e sem anel de pressão, prevista pela simulação, após 950 ciclos de forjamento, considerando-se as 3 regiões mostradas na Figura 4. Para a montagem sem o anel de pressão a maior tensão efetiva ocorreu na quina da cavidade (região III), enquanto para a montagem com interferência isso ocorreu na região II. À medida que se progride para a parte interna da matriz, em direção às regiões II e I, observa-se uma queda na tensão efetiva, que depois aumenta, atingindo os valores de 563 MPa e 450 MPa, para a montagem com e sem anel de pressão, respectivamente. A diferença de $\sim 110\text{MPa}$ para a tensão efetiva entre os valores com e sem o anel de interferência, manteve-se praticamente constante ao longo das regiões II e I.

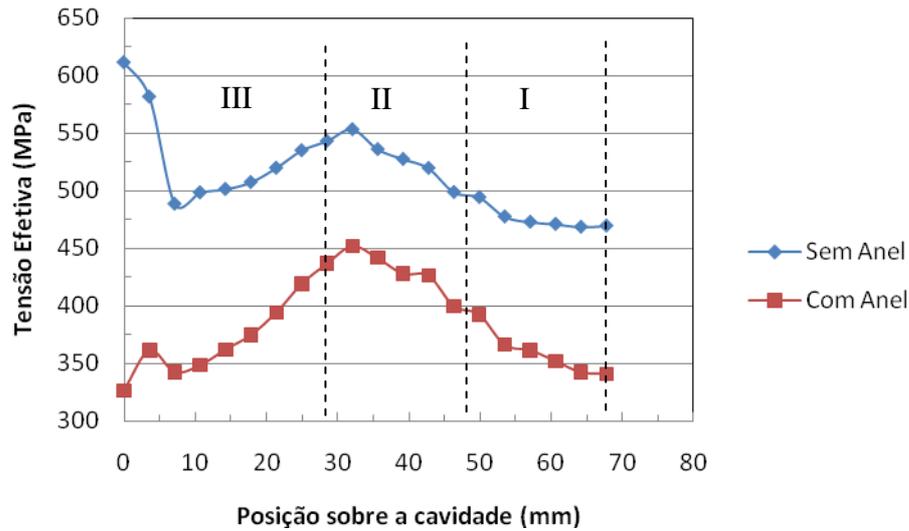


Figura 5. Distribuição da tensão efetiva sobre a cavidade da matriz.

A Figura 6 mostra a distribuição da deformação efetiva na superfície da matriz, predita numericamente para as duas situações sob análise. Constatou-se que a montagem com interferência reduziu significativamente as deformações plásticas, propiciando um produto final (corpo moedor) mais esférico (pequenas alterações no raio) do que produtos obtidos através do forjamento sem o anel externo.

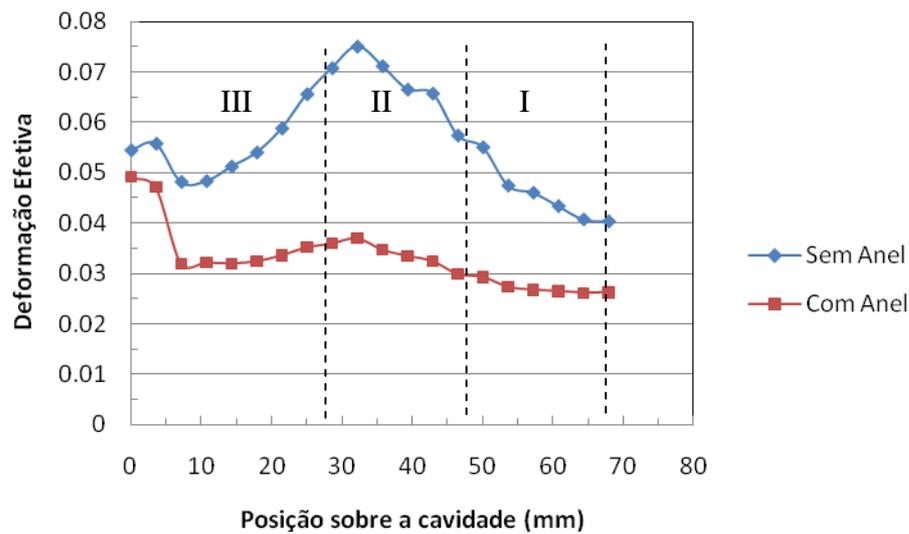


Figura 6. Distribuição da deformação efetiva sobre a cavidade da matriz.

A maior deformação plástica para a montagem com interferência ocorreu na região III, mais precisamente no ponto P_0 , provavelmente associado a uma maior queda de dureza do material da matriz, seja por ação direta do aquecimento, seja por revenimento de sua estrutura causado por este aquecimento. Tanto para a montagem sem anel quanto com anel, as maiores alterações dimensionais ocorreram na região II, onde há o contato inicial do material com a matriz.

A Figura 7 mostra as alterações dimensionais previstas numericamente na matriz, tanto na ausência quanto na presença do anel de interferência. É interessante observar que, a partir dos resultados aqui apresentados, conclui-se que a tensão compressiva proveniente da montagem do anel com interferência atua mais significativamente nas regiões II e III.

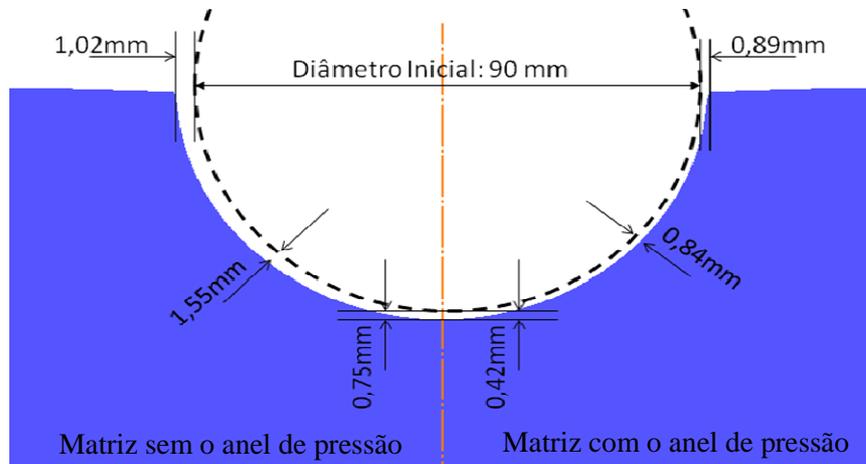


Figura 6. Distribuição da deformação efetiva sobre a cavidade da matriz.

Uma das vantagens das simulações numéricas é prever o comportamento dos materiais, assim como as tensões e as deformações plásticas, em diversas condições de trabalho. Com o intuito de minimizar a deformação plástica na cavidade da matriz superior e inferior, foram simuladas montagens com interferências de 4 mm, 5 mm e 6mm (Figura 7).

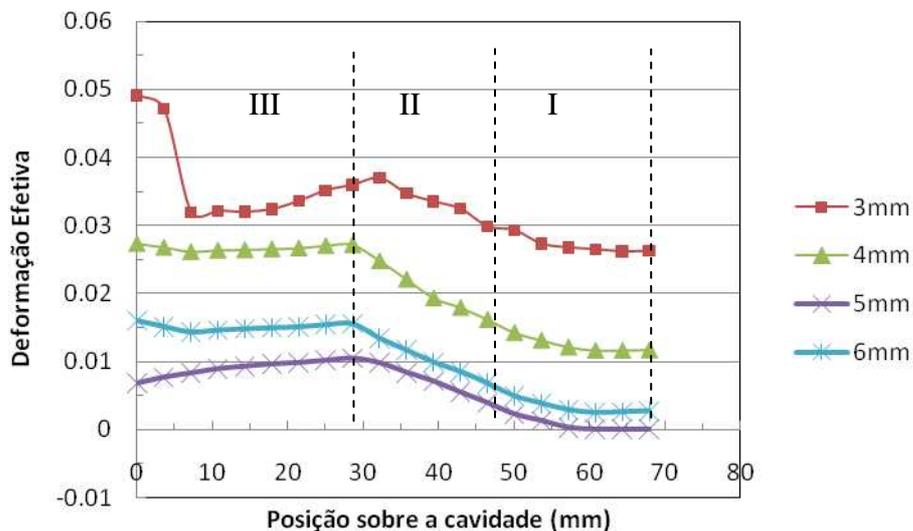


Figura 7. Distribuição da deformação efetiva sobre a cavidade da matriz para algumas interferências.

Percebe-se que a partir da interferência de 4mm as deformações plásticas caem significativamente nas regiões I e II. A Figura 7 mostra que as interferências com 5 e 6mm seriam as mais indicadas, uma vez que os valores da deformação plástica foram os menores em todas as regiões, proporcionando um número maior de peças forjadas antes do sucateamento ou recondicionamento da matriz.

As temperaturas de aquecimento necessárias para cada interferência são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 – Temperaturas necessárias para as montagens com interferências

Interferência no diâmetro (mm)	Temperatura (°C)
3	835
4	1.110
5	1.390
6	1.670

Construtivamente, as interferências de 5 mm e 6 mm seriam impossíveis de se obter, em virtude das temperaturas de aquecimento serem próxima e superior a temperatura de fusão do aço (1.400°C).

A Figura 8 mostra a profundidade de desgaste da após 950 ciclos de forjamento. Os maiores danos ocorreram na região III (máximo de 0,875 mm) e na região II (máximo de 0,630 mm para a montagem sem anel e 0,563 com anel). O maior desgaste na região III era esperado, uma vez que, considerando a abordagem de Archard, nessa região são desenvolvidas as maiores pressões de contato e velocidades de deslizamento. Por outro lado, o maior desgaste na região II provavelmente está associado ao fato que é nesta região que ocorre o contato inicial do tarugo com a matriz (27 mm abaixo do ponto P₀, como mostrado na Figura 4). É interessante observar que na região III, entre a posição 7,5 mm e 25 mm, a previsão do desgaste apresentado pela montagem com o anel de pressão foi ligeiramente maior do que a montagem sem anel.

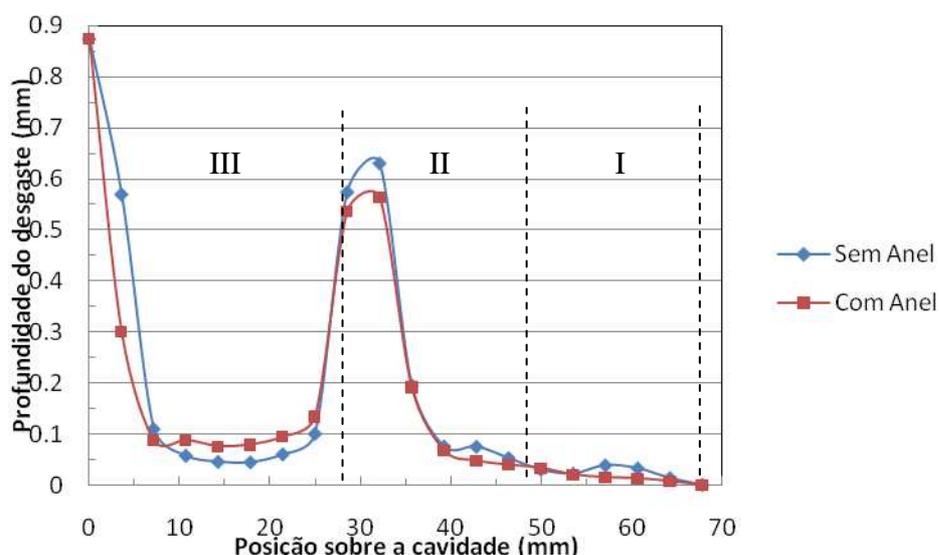


Figura 8. Profundidade do desgaste ao longo da matriz inferior.

4 CONCLUSÕES

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

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

O uso de um anel de pressão (camisa) não diminui o desgaste das matrizes nem elimina sua deformação plástica.

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 ,CNPq e a FAPEMIG pelo suporte para a concretização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 ROBERTS, G.; KRAUSS, G.; KENNEDY, R. Tools Steels. 5th ed. Materials Park, Ohio: ASM International, p. 1-123. P. 219-250, (1998);
- 2 SUMMERVILLE, E.; VENKATESAN, K.; SUBRAMANIAN, C. *Wear processes in hot forging press tools*. Mater. Des., v.16, n.5, p. 289-294, (1995);
- 3 SHIVPURI, R.; BABU, S. ASM Handbook: Metalworking: Bulk Forming, v.14A, p.62-82, (2005);
- 4 RODRIGUES, J.; MARTINS, P. Tecnologia Mecânica. V.01, p.562-569, (2005);
- 5 GRUNNING, K. Técnica da Conformação. p. 38-64, (1996);
- 6 METALS HANDBOOK. Properties and Selection: Iron and Steels. 8 ed. Ohio. American Society for Metals – ASM International, vol.1, 1998.