

ESTUDO NUMÉRICO DA INFLUÊNCIA DO POSICIONAMENTO DE UM TARUGO NAS CAVIDADES INTERNAS DE UMA MATRIZ DE FORJAMENTO A QUENTE.

Gilmar Cordeiro da Silva
Samara Christina Rodrigues Soares
Izabela Ângela Santos

Departamento de Engenharia Mecânica Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Instituto Politécnico da PUC Minas ,
Belo Horizonte, CEP 30.535-910, Brasil.
e-mails: gilmarcord@gmail.com; samaracrs91@gmail.com; izabelasantos72@gmail.com

Frederico de Castro Magalhães

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte,
CEP 31.270-901, Brasil.
e-mail: fredmag.castro@gmail.com

Resumo. No forjamento a quente em matriz fechada a qualidade dimensional e forma dos produtos são dependentes da geometria das matrizes, temperatura, taxa de deformação, dimensões iniciais do tarugo, do seu posicionamento em relação as matrizes, entre outros. Em 2015, a produção mundial de componentes forjados foi, em torno de, um milhão de toneladas, assim, estudos numéricos para melhor compreensão do processo são viáveis. Esse trabalho analisou, numericamente, o efeito da posição horizontal e vertical do tarugo inicial no preenchimento das cavidades das matrizes no forjamento a quente de uma conexão de alta pressão no formato de “Tê”. Para a realização do estudo foi empregado o software QForm VX. As modelagens numéricas nas posições horizontal e vertical geraram diferentes resultados, com um tarugo de diâmetro 44,45mm e altura 45mm e em nenhuma das posições houve completo preenchimento das cavidades internas, porém, a posição horizontal apresentou melhores resultados de preenchimento. Uma nova análise, em um tarugo de mesmo diâmetro e altura de 57mm, foi realizada para a posição horizontal, onde houve total preenchimento das cavidades internas com uma força final de forjamento de 1,9MN.

Palavras chave: Forjamento a quente. Estudo numérico. Matriz fechada. QForm VX.

1. INTRODUÇÃO

As exigências da indústria metal mecânica e automobilística quanto ao processo de forjamento merece destaque devido à necessidade de fabricação de componentes mecânicos/estruturais complexos com precisão dimensional e melhoria de suas propriedades mecânicas, Schuler (1998). As análises ainda são baseadas em erros e acertos que ocasionam em elevado tempo de produção dos ferramentais, desgaste excessivo das matrizes, deformação parcial do material e a necessidade de uma quantidade maior de sobremetal, e consequentemente elevado tempo e custo de usinagem, Kalpakjian e Schmid (2009). Dessa forma, para o aprimoramento do processo de forjamento, tornam-se essenciais estudos nos campos experimentais, matemático e numéricos para controlar e melhorar o processo, reduzindo dessa forma, os números de paradas de produção para testes e correções. Nesse caso tem-se utilizado o método dos elementos finitos aliados aos principais parâmetros (temperatura de trabalho, deformação, taxa de deformação) e a capacidade dos softwares numéricos de analisar a influência desses parâmetros no produto final e no processo. (ASM Handbook, 2009a; ASM Handbook, 2009b).

Na última década, estudos numéricos focaram em descrever o processo de forjamento em 2D (duas dimensões) por meio das tensões e das deformações, as quais o material é submetido durante o seu processamento. Os resultados numéricos apresentam uma precisão aceitável, porém, ainda existem variações em relação aos resultados reais, o que pode ter como causa as não linearidades presentes durante o processo (condições de atrito) e a falta da regra de fluxo adequada para descrever o material a ser forjado em altas taxas de deformação, Hawryluk e Jakubik (2016). Na maioria desses estudos numéricos, não foi verificada a influência do posicionamento inicial do tarugo em relação às matrizes no aspecto geométrico do produto final forjado, uma vez que as simulações foram realizadas em 2D. Este trabalho simulou numericamente, através do software QForm VX, o efeito do posicionamento (horizontal e vertical) de um tarugo em relação às matrizes, no forjamento a quente de uma peça de aço de baixo carbono com formato em “Tê”, usualmente, empregado na indústria petroquímica. Empregando-se o Método dos Elementos Finitos, foram avaliados os aspectos geométricos da peça e as forças de forjamento para as posições iniciais horizontal e vertical do tarugo relativas às

matrizes.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A composição química do aço da peça foi determinada via espectrômetro de emissão óptica e os valores obtidos são apresentados na Tab. 1 (% em peso). Esses valores referem-se à média dos resultados de três ensaios.

Tabela 1 – Composição química do aço empregado para a confecção da peça (% em peso). (Elaborado pelos autores)

%C	%Mn	%Si	%Cr	%Mo	%Fe
0,19	0,267	0,0107	0,0056	0,0022	99,2

A partir da composição química obtida, definiu-se a liga C15 para o material da peça entre as disponíveis na biblioteca do software e suas propriedades mecânicas como ponto de fusão, calor específico e sua curva de tensão deformação.

A Equação (1) descreve a regra de fluxo de materiais metálicos para o cálculo da tensão efetiva em cada incremento da simulação numérica. (Hensel e Spittel, 1978).

$$\sigma_f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) = \sigma_0 \cdot A \cdot e^{-m_1 \cdot T} \cdot \varepsilon^{m_2} \cdot \dot{\varepsilon}^{m_3} \quad (1)$$

Em que: σ_f é a tensão efetiva, σ_0 é a tensão de escoamento para a temperatura de 20°C, T é a temperatura (°C), ε é a deformação efetiva, $\dot{\varepsilon}$ é a taxa de deformação e A, m1, m2 e m3 constantes adimensionais, referentes à sensibilidade do material em função da temperatura e da deformação.

De acordo com Grüning (1986), no forjamento, a razão entre a altura e o diâmetro não deve exceder a 2,5. Estudo iterativo por Matlab, conforme ASM Handbook (2003) determinou-se as dimensões do tarugo: diâmetro 44,45mm e altura 45mm, observando barras cilíndricas comerciais, o que viabiliza a aquisição da matéria-prima. A Fig. 1 mostra as principais dimensões da peça forjada, referência para o dimensionamento e modelagem geométrica das matrizes superior e inferior. O modelo final da peça foi posicionado no centro de blocos cilíndricos seguindo as recomendações de Lange (1985).

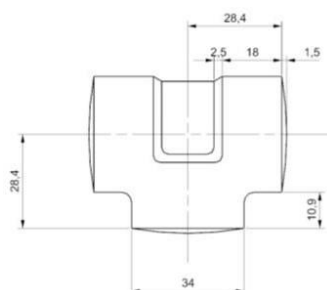


Figura 1. Dimensões finais da peça obtida industrialmente. (Elaborado pelos autores)

Os canais de rebarba foram dimensionados conforme Tomov, *et al.*, 2004. As matrizes foram modeladas geometricamente em um software do tipo CAD (*computer aided design* - desenho assistido pelo computador) e o tarugo no software QForm VX como material isotrópico e rígido plástico, com malha inicial de 2.778 elementos tetraédricos de 4,9 mm e 807 nós, e posicionados na horizontal e vertical, Fig. 2, em relação às matrizes superior e inferior.

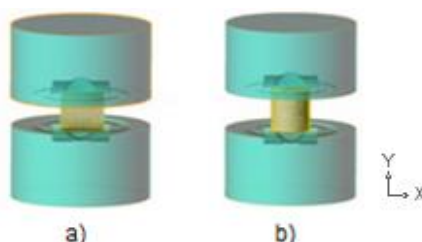


Figura 2. Tarugo cilíndrico discretizado e o seu posicionamento inicial em relação às matrizes: (a) posicionado horizontalmente. (b) posicionado verticalmente. (Elaborado pelos autores)

Optou-se pelos elementos tetraédricos devido à flexibilidade na discretização e geração de malha adaptativa, principalmente, quando há mudança na dimensão como a rebarba no processo de forjamento, que é o caso desse estudo.

Na solução das variáveis nos pontos nodais, a velocidade primária foi constante e atuante diretamente na taxa de deformação volumétrica. A equação variacional é apresentada na Eq. (2), conforme Kobayashi, *et al.*, 1989.

$$\int_V \sigma_f \varepsilon dV + \beta \int_V \dot{\varepsilon} \dot{\varepsilon}_v dV - \int_S F_i \delta v_i dS = 0 \quad (2)$$

Em que σ_f , ε , $\dot{\varepsilon}_v$ e δv_i são, respectivamente, a tensão efetiva, deformação efetiva, taxa de deformação volumétrica e variável arbitrária do campo de velocidade, β é uma constante arbitrária positiva, F_i representa forças de trações superficiais e V e S são o volume e superfície da peça. Conforme Kumar, *et al.*, 2014, adotou-se nas simulações a temperatura de 1000°C para o tarugo cilíndrico.

As matrizes superior e inferior foram modeladas como materiais isotrópicos e elásticos e aquecidas a uma temperatura de 250°C. (Kumar, *et al.*, 2014). O material aplicado foi o AISI H13 e suas propriedades, como tensão limite de escoamento, índice de endurecimento e condutividade térmica, foram empregadas segundo a biblioteca do software para este aço. A malha gerada automaticamente no QForm VX com elementos de 0.40mm, é mais densa na região de mudança de raios e na bacia da rebarba. Outra malha com elementos de 7mm foi empregada na parte externa das matrizes. Pelo fato das matrizes superior e inferior apresentarem formas simétricas, tanto o número de elementos tetraédricos (241.300) quanto o número de nós (51.513) foram iguais.

Empregou-se o valor de 25°C para descrever as temperaturas do meio ambiente e da solução água/grafite (lubrificante). Os parâmetros térmicos dos materiais (tarugo cilíndrico e matrizes) foram obtidos da biblioteca do aplicativo QForm VX e na ausência de outra propriedade, essa foi obtida dos trabalhos de Chun (2007) e Sjostrom (2004). Durante o forjamento a quente e o resfriamento das matrizes foram empregados os seguintes coeficientes de transferência de calor: Forjamento – Tarugo/Matriz (15kW/m².K), Matriz/Matriz (11kW/m².K). Resfriamento – Matriz/Matriz (11kW/m².K). Face da matriz em contato com o lubrificante: (45kW/m².K). No caso do processo de forjamento a quente, a distribuição de temperatura no tarugo e/ou nas matrizes pode ser obtida pelo equilíbrio da Eq.(3) segundo Kobayashi, *et al.*, 1989.

$$\int_V k_1 T_{,i} \delta T_{,i} dV + \int_V \rho c \dot{T} \delta T dV - \int_V k \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} \delta T dV - \int_S q_n \delta T dS = 0 \quad (3)$$

Onde $k_1 T_{,i}$ é a taxa de transferência de calor, k_1 é condutividade térmica, $\rho c \dot{T}$ é a taxa de energia interna e q_n é o fluxo de calor normal à fronteira, incluindo as perdas entre a peça/ambiente, peça/matriz, matriz/ambiente. Para as simulações numéricas, 90% da energia mecânica foi convertida em calor. Assim como no processo real de forjamento, foi adotado nas simulações numéricas o lubrificante à base de água/grafite, considerando o coeficiente de atrito Coulombiano igual a 0,4. Na matriz inferior foram aplicados deslocamentos nulos ($\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0$), isto é, permanece fixa durante toda a simulação do processo. Para a matriz superior ($\Delta x = \Delta z = 0$), ou seja, há apenas deslocamentos ao longo do eixo y representado na Fig. 2. O deslocamento ao longo do eixo y, na direção negativa, é atribuído ao uso de uma prensa hidráulica com velocidade nominal no eixo y de 50mm/s e capacidade máxima de 5MN. As simulações numéricas foram interrompidas quando a distância relativa (Δh) entre a matriz superior e inferior era igual a zero.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma análise preliminar foi realizada a fim de verificar se as considerações empregadas no modelo numérico (regra de fluxo, atrito, critério de remalha) e as dimensões do tarugo cilíndrico eram capazes de registrar o escoamento do material, assim como a influência do posicionamento inicial do tarugo em relação às matrizes no preenchimento adequado de suas cavidades internas. A Figura 3 mostra as peças finais obtidas para as posições horizontal e vertical do tarugo cilíndrico.

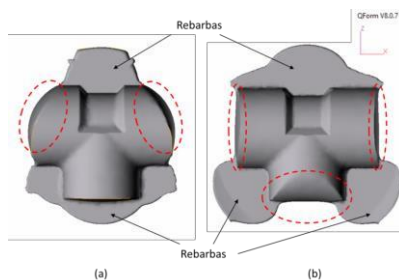


Figura 3. Aspectos finais das peças numéricas para as posições iniciais do tarugo (a) vertical (b) horizontal. (Elaborado pelos autores)

Com o diâmetro 44,45mm e comprimento 45mm, os resultados indicaram que o posicionamento inicial do tarugo

(horizontal e vertical) teve uma influência significativa nas direções de escoamento do material e na formação da rebarba, consequentemente, no preenchimento ou não das cavidades internas das matrizes. Para ambas as posições (horizontal e vertical) do tarugo, não ocorreram o preenchimento total das cavidades internas, regiões destacadas dentro das linhas tracejadas vermelhas, porém, na posição horizontal (Fig. 3b), o escoamento do material mostrou-se mais favorável para o preenchimento dessas regiões.

Inicialmente, a malha foi gerada pelo software QForm 3D. Devido na região da bacia de rebarba ocorreram maiores deformações plásticas da peça em virtude da sua menor espessura em relação às demais dimensões do corpo, fez-se necessário um refinamento da malha nessa seção visando à uniformidade da deformação. Nas cavidades internas da matriz, esta uniformidade objetivou descrever os contornos geométricos do “Tê” com maior precisão.

Apesar do deslocamento da matriz superior para a posição vertical do tarugo ser maior do que da posição horizontal, a sua força final de forjamento foi menor (0,77MN). De acordo com Lange (1985), na etapa final do forjamento, há um aumento significativo da força em decorrência da formação da rebarba. Observando a Fig. 3, tal fato era esperado, pois para a posição vertical do tarugo (Fig.3a) houve a formação de duas áreas de rebarba enquanto que para a posição horizontal (Fig.3b) três áreas distintas de rebarba foram formadas. A Figura 4 mostra as evoluções da força de forjamento da matriz superior em função do deslocamento para as posições estudadas. Tendo em vista que a posição horizontal é a mais propícia para o preenchimento das cavidades internas das matrizes, foi realizada uma nova simulação numérica, em que o comprimento do tarugo foi alterado para 57mm mantendo o diâmetro comercial de 44,45mm. Esse comprimento foi determinado seguindo as recomendações da forjaria que cedeu a peça com formato de um “Tê”. As demais condições de contorno permaneceram inalteradas. Inicialmente, o tarugo cilíndrico foi discretizado com 2.850 elementos e 840 nós, e no final da simulação a peça com formato de “Tê” juntamente com a rebarba apresentaram elementos e 26.131 nós.

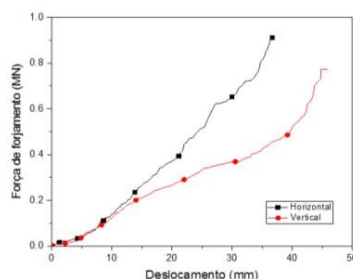


Figura 4. Evoluções das forças da matriz superior para os tarugos posicionados verticalmente e horizontalmente. (Elaborado pelos autores)

A Figura 5 mostra o resultado numérico obtido para o novo comprimento (57mm) do tarugo cilíndrico posicionado horizontalmente. Observou-se que as novas dimensões do tarugo juntamente com o seu posicionamento horizontal foram suficientes para o preenchimento das cavidades internas das matrizes, resultando em uma peça isenta de defeitos.

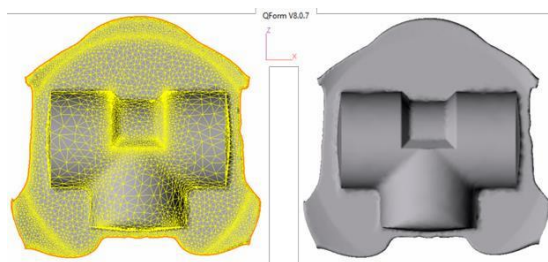


Figura 5. Resultado numérico no comprimento de 57mm: (a) aspecto final da malha (b) geométrica da peça (Elaborado pelos autores)

Foram realizadas simulações variando o número de elementos até obter-se a convergência dos resultados, com duração média de 30 minutos em todas as configurações estudadas.

A evolução da força apresentou o mesmo perfil do tarugo horizontal da Fig. 4, porém, a força final de forjamento foi 1,9MN, aproximadamente 3 vezes maior do que foi observado para o tarugo proposto inicialmente. Apesar do preenchimento das cavidades internas, o fluxo do material mostrou-se heterógeno, pois nas extremidades da peça com a forma de “Tê” houve pouca concentração de material, ao contrário das demais regiões. Para um fluxo mais homogêneo, sugere-se uma pré-forma do tarugo onde o seu comprimento caiba inteiramente dentro da cavidade interna da matriz inferior.

Uma vez garantida à integridade geométrica da peça com a forma de um “Tê”, foi possível avaliar a troca térmica existente do tarugo e das matrizes no momento final do processo de forjamento, ou seja, com o máximo contato da peça sobre as matrizes. A Figura 6 apresenta a distribuição espacial da temperatura para a peça no final do forjamento.

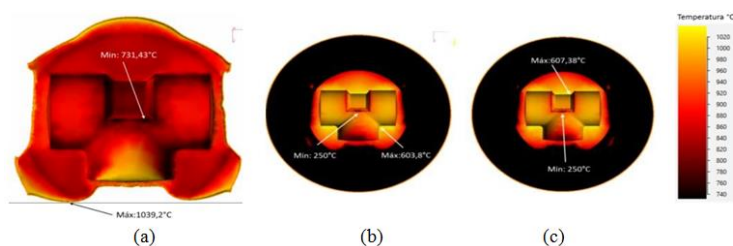


Figura 6. Distribuição da temperatura no final do forjamento. (a) rebarba, (b) matriz superior, (c) Matriz inferior (Imagem gerada no software QForm VX)

Através da Fig. 6(a) pôde-se observar maior resfriamento da superfície da parte central da peça (731°C) proveniente do maior tempo de contato peça/matriz. Já o maior aquecimento da peça (1039°C) foi observado na região da rebarba, decorrente das grandes deformações plásticas ocorridas nessa região. As Figuras 6(b) e (c) mostram a distribuição da temperatura no final do processo de forjamento para as matrizes superior e inferior. Os valores das temperaturas foram praticamente iguais tanto no valor mínimo (250°C) quanto no valor máximo (~605°C). Apesar das diferentes localizações, o maior valor da temperatura é justificado não só pelas condições extremas de pressão (fonte de calor por atrito), mas também pela geometria da matriz (raio de concordância) que acumula muito calor durante o processo de forjamento. Este maior aquecimento pode causar queda da dureza superficial da matriz devido ao revenimento. Estes fatos sugerem ser esta a região mais susceptível ao desgaste por abrasão e à deformação plástica.

4. CONCLUSÕES

O posicionamento inicial do tarugo cilíndrico (vertical e horizontal) em relação às matrizes de forjamento influenciou significativamente tanto no preenchimento interno das cavidades internas das matrizes quanto nos valores das forças de forjamento. A posição horizontal do tarugo mostrou-se mais favorável ao preenchimento das cavidades internas das matrizes.

Para o processo de forjamento a quente, onde há elevadas deformações plásticas, principalmente nas rebarbas, o emprego de elementos tetraédricos juntamente com o processo remalha do aplicativo QForm VX foram capazes de capturar, numericamente, a geometria final da peça.

Apesar do preenchimento das cavidades internas com as novas dimensões do tarugo cilíndrico na posição horizontal, as simulações numéricas mostraram que as matrizes superior e inferior estão sujeitas ao processo de revenimento.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à PUC MINAS, ao CEFET-MG, ao CNPq, a Fapemig e a Forjas Mocam Ind. Com. Ltda pelo suporte para a concretização deste trabalho. E à QX2BOX e QForm pela disponibilidade do software.

6. REFERÊNCIAS

- ASM Handbook: Fundamentals of Modeling for Metals Processing. Vol. 22A Ed. Metals Park. American Soc. For Metals. 2009a.
- ASM Handbook: Metals Process Simulation. Vol. 22B Ed. Metals Park. American Soc. For Metals. 2009b.
- ASM Handbook: Forming and Forging, Vol. 14, Ed. Metals Park. American Soc. For Metals. 2003.
- Chun, L. Modeling of water and lubricant spray in hot metal working . Dissertation, Ohio State University, 2007.
- Grüning, K. Umformtechnik. Fried. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft GmbH, Braunschweig, 1986.
- Hawryluk, M., Jakubik, J. Analysis of forging defects for selected industrial die forging processes. Engineering Failure Analysis, 2016, 59, 396-409.
- Hensel, A, Spittel, T.; Kraft- und Arbeitsbedarf bildsamer Formgebungsverfahren, Leipzig: VEB Deutscher Verlag fur Grundstoffindustrie, 1978, p. 200–202.
- Kalpakjian, S., Schmid, S. R. Manufacturing Engineering and Technology. 16. Ed. New York: Prentice Hall, 2009.
- Kobayashi, S., Oh, S., Altan, T. 198. Metal Forming and the Finite-Element Method. Oxford University Press, 1ª edição.
- Kumar, R.; Sharma, P.K.; Singh, A.. A review on evaluate the life of the die materials. International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science. V. 2, n.5, maio de 2014. Disponível em: <http://ijates.com/images/short_pdf/1401338291_Ranjeet_Kumar1_318-324.pdf>. Acesso em: 2 nov. 2016.
- Lange, K. Handbook of Metal Forming. McGraw-Hill, 1985.
- Schuler GmbH. Metal Forming Handbook. 1 ed. Ed. Springer, 1998.
- Sjostrom, J. Chromium martensitic hot-work tool steels. Dissertation, Karlstad University Studies, 2004.
- Tomov, B., Radev, R., Gagov, V. Influence of flash design upon process parameters of hot die forgings. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 157-158, 620-623.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

Numerical study of the influence of the positioning of a billet in the filling of the internal cavities of a hot forging die.

Gilmar Cordeiro da Silva

Samara Christina Rodrigues Soares

Izabela Ângela Santos

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

gilmarcord@gmail.com; samaracrs91@gmail.com; izabelasantos72@gmail.com

Frederico de Castro Magalhães

Universidade Federal de Minas Gerais

fredmag.castro@gmail.com

Abstract. *In closed die hot forging the dimensional quality and final shape of the products are dependent of dies geometry, temperature, conversion rate, billet initial dimension and positioning of billet in relation to the die, among others. In 2015, worldwide production of forged mechanical components was approximately one million tons, so numerical studies for a better understanding of the process are fully viable. In this way, this work had as a proposal to analyze, numerically, the effect of the horizontal and vertical position of the billet in the filling of internal cavities of the die intended for the hot forging of a high pressure connection in the "T" format. The QForm VX software was used to perform these numerical studies. The numerical modeling in the horizontal and vertical positions generated different results, with a diameter of 44.45mm and height 45mm, in none of the positions were complete filling of the internal cavities, but the horizontal position presented better filling results. A new analysis, in a billet of the same diameter and height of 57mm, was performed for the horizontal position, where the internal cavities were completely filled with a final forging force of 1.9MN.*

Keywords: *Hot forging. Numerical study. Close die. QForm XV. Conformation*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.