

ESTUDO DA FADIGA TÉRMICA EM UMA MATRIZ DE FORJAMENTO

Pedro Ivo Alves Vianello

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte, MG, CEP: 31270-901.

e-mail: pivianello@yahoo.com.br

Anderson Junior dos Santos

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte MG, CEP: 31270-901 e Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Av. Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico, Belo Horizonte, MG, CEP: 30535-901.

e-mail: Ndersonsantos@hotmail.com

Alexandre Mendes Abrão

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte, MG, CEP: 31270-901.

e-mail: abrao@demec.ufmg.br

Frederico de Castro Magalhães

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte, MG, CEP: 31270-901.

e-mail: fredmag.castro@gmail.com

Resumo. Avaliar a vida útil de uma matriz de forjamento a quente é de grande relevância industrial. Desse modo, o objetivo deste trabalho é elaborar uma sub-rotina para o aplicativo QFORM VX capaz de prever, simultaneamente, via método dos elementos finitos, as regiões propícias à fadiga térmica e o número de ciclos para o início de suas fissuras em uma matriz de forjamento a quente. Mediante os parâmetros térmicos adotados, os resultados numéricos, obtidos através da sub-rotina, foram condizentes com os observados experimentalmente, tanto na identificação quanto na determinação no número ciclos para o início das fissuras térmicas, validando a sub-rotina proposta.

Palavras chave: Forjamento a quente. Fadiga térmica. Método dos elementos finitos. Aço ABNT H13

1. INTRODUÇÃO

O setor metalúrgico apresenta expressiva importância no cenário econômico brasileiro, com vasta cadeia produtiva dos segmentos ligado à metalurgia, usinagem e produção de manufaturados metálicos, sendo à base de outras atividades relevantes para o país, como a indústria automobilística, construção civil e bens de capital (AESM, 2018). Conforme o anuário estatístico do setor metalúrgico do ano de 2017 (2018), o PIB da metalurgia totalizou cerca de US\$ 40,7 bilhões participando com 1,3% do PIB brasileiro e 5,4% do PIB da indústria. Do total de 16 milhões de toneladas produzidas nesse setor, 146.000 toneladas foram referentes a produtos forjados em matrizes fechadas. Produzir uma peça forjada em matrizes fechadas com qualidade superficial e dimensional a um baixo custo de produção exige com que todas as etapas envolvidas na sua produção (corte, aquecimento, forjamento, rebarbação, etc) sejam constantemente monitoradas e revistas. Dentre essas etapas produtivas, o forjamento propriamente dito é o mais oneroso, uma vez que as matrizes podem representar de 10 a 30% do custo total de uma peça ou componente forjado (Buchmayr, 2016).

Conforme König e Klocke (2006), o tempo de serviço (vida útil) das matrizes fechadas de forjamento pode ser expresso pelo número de peças produzidas antes das suas rejeições, provenientes de algum tipo de falha que venha modificar as dimensões e/ou geometria do produto final ou até mesmo pela quebra das matrizes. Entre os mecanismos de falha presentes em uma matriz fechada de forjamento a quente, destacam-se: desgaste por abrasão, deformação plástica, fadiga mecânica e fadiga térmica.

Durante o seu tempo de serviço, determinadas regiões da matriz de forjamento a quente são submetidas ao aquecimento proveniente do material a ser forjado (950-1200°C) com a matriz previamente aquecida (250-300°C) e ao resfriamento, decorrente da aplicação do desmoldante. Esses ciclos térmicos promovem a fadiga térmica, que é caracterizada pela formação de fissuras na superfície das matrizes, e conforme a literatura, o seu início ocorre em média menos de 1% da vida útil das matrizes, caracterizando assim, uma fadiga de baixo ciclo (< 1.000 ciclos). A severidade

dos ciclos térmicos é determinada principalmente pela diferença de temperatura, temperatura máxima atingida e pelas taxas de aquecimento e resfriamento. As fissuras térmicas tendem a se desenvolverem em regiões isentas de qualquer concentrador de tensão. Para que haja à fadiga térmica de baixo ciclo, a amplitude da deformação térmica deve exceder a elástica (Main e Norstrom, 1979), que pode ser expressa pela Eq. (1).

$$\alpha(T_2-T_1) > 2 \frac{(1-\nu_1)\sigma_1}{E_1} + 2 \frac{(1-\nu_2)\sigma_2}{E_2} \quad (1)$$

Onde α é o coeficiente médio da expansão térmica, ν_1 e ν_2 são os coeficientes de Poisson, σ_1 e σ_2 são as tensões e E_1 e E_2 são os módulos de elasticidade para as temperaturas mínimas (T_1) e máximas (T_2) respectivamente. De acordo com os estudos de Main e Norstrom (1979) o número de ciclos para início das fissuras térmicas a baixo ciclo pode ser determinado pela Eq.(2).

$$N_f = \left[\frac{C \cdot \varepsilon_f}{\alpha(T_2-T_1) \frac{(1-\nu_1)\sigma_1}{E_1} \frac{(1-\nu_2)\sigma_2}{E_2}} \right]^{1/n} \quad (2)$$

Onde N_f é o número de ciclos para iniciar as fissuras térmicas, ε_f é a deformação verdadeira para a fratura, n e C são constantes que variam entre 0 e 1.

Existem poucos estudos industriais e numéricos que visam identificar tanto as regiões susceptíveis à fadiga térmica quanto determinar o número de ciclos para o seu início em matrizes de forjamento a quente, principalmente para aplicações específicas, como o empregado do aço ferramenta ABNT H13. Este trabalho procura complementar os estudos iniciados por Magalhães *et al.* (2014), nos quais através de uma sub-rotina, é possível, simultaneamente, identificar e determinar o número de ciclos para iniciar a formação de fissuras térmicas em regiões susceptíveis a fadiga térmica de baixo ciclo. Para isso, foi utilizado o aplicativo numérico QForm VX 8.1.4. Os resultados numéricos, obtidos via método dos elementos finitos, foram comparados com os resultados industriais para a validação da sub-rotina proposta.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a previsão numérica das regiões propícias à fadiga térmica e do número de ciclos para o seu início em uma matriz de corpos moedores foi desenvolvida uma sub-rotina baseada nas Eqs. (1) e (2) a ser implementada no aplicativo numérico QForm VX 8.1.4 (Quantor, Moscou, Rússia). Posteriormente, os resultados numéricos foram validados a partir de dados obtidos industrialmente.

2.1. Materiais

Para a realização desse estudo foi utilizado o conjunto de matrizes fechadas para o forjamento a quente de corpos moedores esféricos, com diâmetro nominal de 90 mm (Fig. 1a). O material empregado para as matrizes foi o aço ABNT H13, que apresentou uma dureza média de 52 HRC depois de temperado e revenido (Fig. 1b). Para o forjamento dos corpos moedores foram usadas barras cilíndricas do aço ABNT 1045, com diâmetro nominal de 76,2mm. Seguindo as recomendações de Grüning (1996) para evitar a flambagem do tarugo durante o seu forjamento, a sua altura não deve exceder a 2,5 vezes o seu diâmetro, sendo assim, definiu-se a altura de 120 mm. Quando aquecidos em fornos a óleo, observa-se a perda de massa dos tarugos, decorrente da formação de óxidos. Para contornar tal situação, os tarugos foram aquecidos em um forno de indução a uma temperatura final de 950°C.



Figura 1. (a) Corpo moedor forjado com rebarba e (b) matrizes de forjamento a quente.

Esse mesmo tarugo foi posicionado em pé, apoiado na matriz inferior, que foi pré-aquecida juntamente com a matriz superior a 250°C. Esse pré-aquecimento foi realizado para reduzir o choque térmico e o valor da temperatura atribuído foi o recomendado para o forjamento a quente de aços de médio carbono. O aquecimento das matrizes (ABNT H13) foi realizado mediante o uso de aquecedores a gás (GLP). Para a medição das temperaturas do tarugo e das matrizes foi

empregado um termômetro digital com termopares do tipo K. O tempo total ou ciclo de operação foi de 20 segundos, considerando o transporte do tarugo para a prensa de fricção, seu posicionamento na matriz inferior, sua conformação, a retirada do produto final e da aplicação do desmoldante a base de água mais grafite. Ressalta-se que a aplicação do desmoldante se deu entre um intervalo de um corpo moedor forjado.

2.2. Método dos elementos finitos

O aplicativo numérico QForm VX 8.1.4 empregado para simular os ciclos de forjamento dos corpos moedores utiliza a formulação explícita, onde as acelerações presentes no modelo proposto precisam ser calculadas a cada instante de tempo de integração. Geometricamente, o conjunto matrizes/material apresentou o mesmo eixo de revolução, portanto as simulações numéricas foram reduzidas a um estado de deformação axissimétrica.

O tarugo (aço ABNT 1045) foi modelado como material isotrópico e elasto-plástico, e discretizado inicialmente com 5760 elementos triangulares. Durante o processo de forjamento, os elementos que apresentaram maiores deformações, principalmente na região da bacia de rebarba, foram remalhados a fim de garantir uma melhor discretização da nova geometria do tarugo deformado. Ao final da etapa de forjamento a peça deformada foi discretizada com 7182 elementos triangulares. As curvas de escoamento para descrever o comportamento do aço ABNT 1045 durante os ciclos de forjamento do tarugo foi em função da deformação, da taxa de deformação e da temperatura e as suas propriedades mecânicas e térmicas foram obtidas diretamente da biblioteca do aplicativo QForm VX 8.1.4. Para simular simultaneamente as regiões propícias à fadiga térmica e o número de ciclos para o seu início, as matrizes inferior e superior foram modeladas como materiais isotrópicos e elásticos. Novamente, as propriedades mecânicas do aço ABNT H13 foram retiradas da biblioteca do aplicativo QForm VX 8.1.4. Para discretizar as matrizes, foi utilizado o mesmo de número de elementos triangulares (26178), e por serem elásticas, não foram remalhadas automaticamente, garantindo assim boa convergência nos resultados referente à fadiga térmica. Para retratar o fator de atrito nas interfaces das matrizes/material após a aplicação do desmoldante foi adotado o valor de 0,4, de acordo com o modelo de Lavanov (Semiatin, 2005).

2.3. Parâmetros térmicos e transferência de calor

A evolução térmica do tarugo e das matrizes fechadas, no ciclo de produção do copo moedor, envolve a geração de calor causada pela deformação plástica do tarugo, pelo atrito na interface tarugo/matrizes e pela dissipação de calor por convecção ao meio ambiente. Em todas as simulações numéricas, 95% da deformação plástica foi convertida em calor. Esse valor pode ser ajustado no aplicativo numérico QForm VX 8.1.4 e foi baseado no estudo de Chun (2007).

Adotou-se o valor de 25°C para representar a temperatura ambiente e do desmoldante a base de solução grafitada. Os parâmetros térmicos do tarugo (ABNT 1045) e das matrizes (ABNT H13) foram retirados da biblioteca do aplicativo QForm VX 8.1.4. Durante o forjamento foram empregados os seguintes coeficientes de transferência de calor: matriz/tarugo - 15 kW/m².K e matriz/matriz - 10 kW/m².K e na aplicação do desmoldante nas matrizes (resfriamento) matriz/matriz 10 kW/m².K e superfície em contato com o desmoldante: 30 kW/m².K.

2.4. Sub-rotina

Para a implementação da sub-rotina, escrita na linguagem LUA, vários ciclos de forjamento foram simulados numericamente até à obtenção do estado térmico estacionário na matriz inferior. Ressalta-se que as condições térmicas das matrizes do ciclo anterior foram transferidas para o ciclo posterior de forjamento, no intuito de se obter esse estado. Para aplicação das equações (1) e (2) foram atribuídos os seguintes valores para as variáveis: $\alpha = 13 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; ν_1 e $\nu_2 = 0,3$; E_1 e $E_2 = 180 \text{ GN m}^{-2}$; $n = 0,5$; $C = 0,1$ e $\varepsilon_{f1} = 0,69$. Esses valores foram retirados do trabalho de Maim e Norstrom (1979).

3. RESULTADOS

Assim como em Magalhães *et al.* (2014), foi observado numericamente que o estado estacionário da temperatura nas matrizes foi alcançado após a 66ª peça forjada. A Figura 2 mostra a distribuição da temperatura na cavidade interna da matriz inferior, no final do forjamento do 67º corpo moedor. Para comparar com as temperaturas medidas industrialmente, foram escolhidos três pontos: P1 – próximo ao canal de rebarba; P2 – ponto de contato inicial entre o tarugo/matriz inferior e P3 – ponto mais baixo da cavidade.

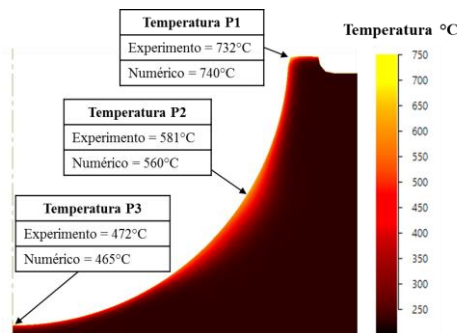


Figura 2. Mapeamento térmico da matriz inferior ao final da etapa de forjamento.

Quando iniciou-se a formação da rebarba do corpo moedor (final do processo), observou-se numericamente, o preenchimento interno da cavidade da matriz, fazendo com que as temperaturas nos pontos P1 e P3 atingissem 516°C e 740°C respectivamente. A alta temperatura observada no ponto P1 pode desenvolver outro possível mecanismo de falha, a deformação plástica, que está associada à queda do limite de escoamento do material (ABNT H13). Ao contrário do P2, ponto de apoio do tarugo na matriz inferior, o aumento foi gradativo desde o início (250 °C) até o final da etapa de forjamento (610°C). Após a retirada da peça forjada e a aplicação do desmoldante, tanto experimentalmente quanto numericamente, a temperatura estabilizou em 280°C nos pontos P1 e P2 e 255°C no ponto P3. Esse mesmo comportamento térmico na matriz inferior foi observado no estudo realizado por Chun (2007). Após a obtenção do estado estacionário das temperaturas máximas e mínimas, a sub-rotina foi implementada e identificou que as regiões submetidas às maiores variações térmicas são susceptíveis a fadiga térmica (cavidade interna da matriz, cor verde, Fig. 3).

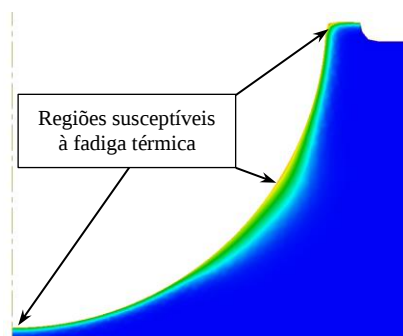


Figura 3. Previsão numérica da sub-rotina das regiões susceptíveis a fadiga térmica na cavidade interna da matriz.

Os resultados numéricos obtidos através da sub-rotina mostraram que a região vizinha ao ponto P1 apresentou o menor número de ciclos (293 ciclos) para o início da fadiga térmica (fissuras) seguidos, respectivamente, das regiões vizinhas aos pontos P2 (517 ciclos) e P3 (1867 ciclos) Fig. 4.

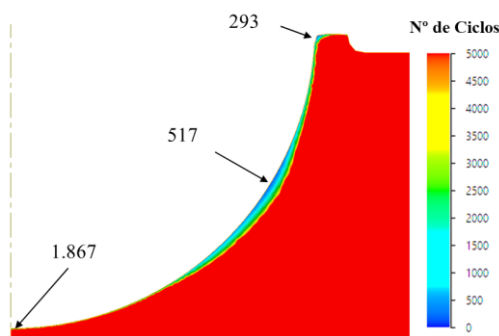


Figura 4. Predição do número de ciclos para o início da fadiga térmica.

Experimentalmente, não foi possível interromper o processo de forjamento após o 293º corpo moedor forjado, para verificar o início das fissuras térmicas previstas pela sub-rotina apenas na região vizinha ao ponto P2. Dessa forma, a

matriz foi verificada após 600 ciclos de forjamento, pois conforme a sub-rotina, toda a cavidade interna da matriz desenvolveu fissuras térmicas. A Figura 5 retrata o aspecto interno da cavidade da matriz para esse ciclo de forjamento.

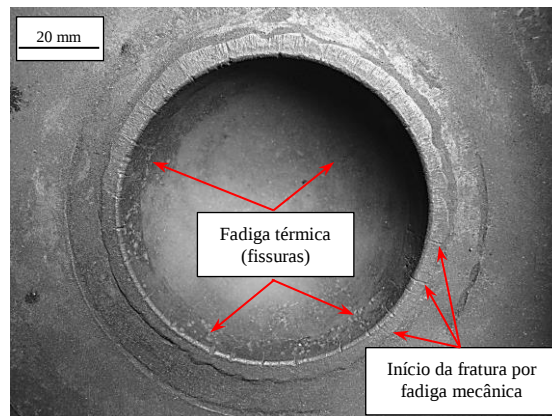


Figura 5. Vista superior do aspecto da cavidade da matriz após 600 corpos moedores forjados.

Foi possível identificar após 600 ciclos de forjamento, as regiões na cavidade interna que desenvolveram as fissuras térmicas (fadiga térmica), comprovando a aplicabilidade da sub-rotina proposta para a sua previsão. Em decorrência da fadiga térmica, foi possível identificar o início da quebra da matriz próxima ao canal de rebarba, fato também observado por Sjöström e Bergström (2005).

4. CONCLUSÕES

Tanto experimentalmente quanto numericamente, constatou-se que as regiões sujeitas as maiores variações de temperatura, são propícias ao desenvolvimento à fadiga térmica.

A sub-rotina implementada no aplicativo numérico QForm VX 8.1.4, para prever, simultaneamente, as regiões e o número de ciclos para o início da fadiga térmica, mostrou-se uma ferramenta útil na avaliação dos mecanismos de falha de uma matriz de forjamento a quente.

Os resultados numéricos obtidos através da sub-rotina proposta mostraram-se condizentes com observados experimentalmente, principalmente, nas regiões susceptíveis a fadiga térmica e o número de ciclos para o seu início.

3. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Forjas Mocam Ind. Com. Ltda, a QX2Box e a Quantor (Russia) para a concretização deste trabalho.

4. REFERÊNCIAS

- ANSM - Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico, 2018, 9 Sept. 2018 <http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1732813/ANU%C3%81RIO+METAL%C3%9ARGICO+2017_12.03.2018.pdf/4c1be82b-88d6-498a-aad8-671048438e20>.
- Buchmayr, B., 2016. "Damage, lifetime, and repair of forging dies". BHM, doi 10.1007/s00501-016-0566-3.
- Chun, L., 2007. *Modeling of water and lubricant sprays in hot metal working*. Dissertação de mestrado, Ohio State University, Ohio.
- Grünning, K., 1996. *Técnica da Conformação*, Polígono SA, São Paulo, 1ª Edição.
- König, W. e Klocke, F., 2006. *Fertigungsverfahren . Bd.4. Massivumformung*, VDI-Verlag, Dusseldorf.
- Magalhães, F.C., Figueiredo, R.B., Aguilar, M.T.P., Pertence, A.E.M., Campos, H.B., Cetlin, P.R., 2014. "Susceptibilidade à fadiga térmica de matrizes fechadas para forjamento a quente". In *Tecnol. Metal. Mater. Miner.* Vol. 11 (2), p. 131-137.
- Maim, S. e Norstrom, L.A., 1979. "Material-related model for thermal fatigue applied to tool steels in hot-work applications. *Metal Sciene*; Vol. 13(9), p.544-550.
- Semiati, S.L., 2005. *Metalworking: Bulk Forming*. ASM Handbook, Vol. 14A, Materials Park, ASM International.
- Sjöström, J., Bergström, J., 2005, "Thermal fatigue in hot-working tools". In *Scand. J. Metall.* ,Vol. 34, p. 221-231.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

THERMAL FATIGUE IN HOT FORGING DIES

Pedro Ivo Alves Vianello

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte, MG, CEP: 31270-901.

e-mail: pivianello@yahoo.com.br

Anderson Junior dos Santos

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte MG, CEP: 31270-901 e Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Av. Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico, Belo Horizonte, MG, CEP: 30535-901.

e-mail: Ndersonsantos@hotmail.com

Alexandre Mendes Abrão

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte, MG, CEP: 31270-901.

e-mail: abrao@demec.ufmg.br

Frederico de Castro Magalhães

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte, MG, CEP: 31270-901.

e-mail: fredmag.castro@gmail.com

Abstract. Hot forging is one of the grounds of the industrialized society. Thus, the aim of this work is to elaborate a subroutine for the QFORM VX numerical software, to predict, simultaneously, the regions susceptible to thermal fatigue and the number of cycles for the thermal fatigue cracking. The numerical modeling with the appropriate thermal parameters provided results consistent with the industrial ones, allowing the validation of the proposed subroutine.

Keywords: Hot forging. Thermal fatigue. Finite element method.

RESPONSIBILITY NOTICE

The author(s) is (are) the only responsible for the printed material included in this paper.