

Vida em fadiga termomecânica de matrizes de forjamento - parte 1

por DIEGO RAFAEL ALBA, THOMAS G. DOS SANTOS, LÍRIO SCHAEFFER

O valor de um produto forjado é calculado por seus custos de manufatura e engloba os mais diversos aspectos. Uma grande percentagem é devido ao custo de retrabalho das matrizes de forjamento. Entenda quais os métodos de avaliação disponíveis e quais foram os avanços feitos nas últimas décadas relacionados a predição da vida em fadiga de matrizes de forjamento.

Matrizes¹ para operações de forjamento a quente estão sujeitas a esforços cíclicos mecânicos e térmicos, os quais influenciam diretamente no comportamento em fadiga do ferramental². O início e a propagação de trincas na superfície da matriz são induzidos simultaneamente pelos gradientes térmicos que atuam na camada próxima a superfície de contato matriz/geratriz e também pelas altas tensões devido aos carregamentos mecânicos. Embora avanços tenham sido alcançados neste tema, atualmente a vida em fadiga de matrizes ainda é difícil de ser estimada através de experimentos, ou através de simulações numéricas [1, 2].

Em processos de forjamento a quente são impostas às matrizes altas tensões durante o período de forjamento, bem como no período de extração do componente forjado quando as matrizes

são resfriadas através do uso de lubrificantes. As superfícies das matrizes e as camadas logo abaixo são submetidas a ciclos mecânicos e térmicos os quais são caracterizados por altas amplitudes e altas frequências [1, 3].

Por estas razões, conforme mostrado na figura 1, diferentes mecanismos de falha prevalecem: desgaste, deformação plástica e trincas devido à fadiga termomecânica [2, 4]. Diferentemente do desgaste e da deformação plástica, onde o dano acontece gradualmente durante o serviço e afeta o acabamento do produto final, as trincas devido à fadiga podem surgir, mas seu efeito no componente forjado não é evidente [3]. Desta forma, a falha por fadiga é repentina, pois o tempo entre a trinca atingir seu tamanho crítico e propagar instavelmente é curto [1].

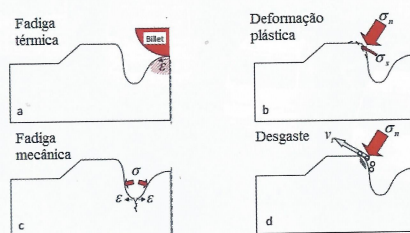


Figura 1 - Mecanismos de falha de matrizes para forjamento a quente. (a) Fadiga térmica; (b) deformação plástica; (c) fadiga mecânica e (d) desgaste [3]

Nestes casos, a produção é interrompida e as matrizes defeituosas devem ser substituídas, o que leva ao aumento de custos e atraso na produção. Portanto, o tempo de vida de matrizes é uma consideração importante do ponto de vista de redução de custos associados a substituição de ferramentas, aumento de produ-

tividade e qualidade do produto final.

Trincas devido a fadiga, como mostrado na figura 2, são geralmente vistas como uma cadeia de pequenas trincas na superfície da ferramenta, e este é um importante mecanismo limitador da vida do ferramental [1, 5, 6]. As propriedades do material e a complexa interação com o estado cíclico dos carregamentos térmicos e mecânicos oriundos do processo determinam o comportamento do material durante os ciclos de forjamento [7, 8].

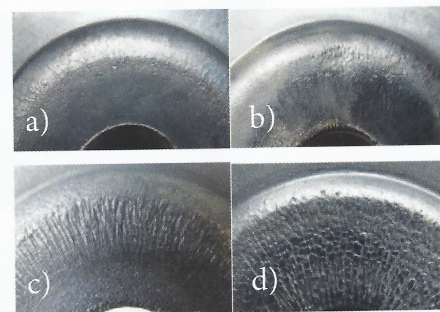


Figura 2 - Trincas devido a fadiga formadas na superfície de uma matriz de forjamento a quente após (a) 500 forjamentos, (b) 1.850 forjamentos, (c) 4.300 forjamentos e (d) 6.900 forjamentos [8]

➤ FADIGA MECÂNICA

A falha por fadiga é uma das principais formas de falha de componentes na indústria do forjamento. De maneira oposta às falhas por desgaste e deformação plástica, a fadiga mecânica não leva a produtos fora da especificação, mas pode levar a pequenas falhas de acabamento e também ao descarte das matrizes. Fadiga mecânica é um dano progressivo e localizado que ocorre quando o material é submetido a carregamento cíclico [9].

Até mesmo tensões abaixo do limite de escoamento do material podem levar a falha devido a fadiga. Após o instante em que as matrizes estão completamente preenchidas com o material a ser forjado, as tensões na superfície da ferramenta tendem a crescer significativamente. Este tipo de falha é mais comum na última etapa de forjamento onde a geratriz já foi conformada na sua pré-forma e está próxima da sua geometria final [3]. Nesta última etapa, as matrizes são preenchidas mais rapidamente para que o produto satisfaça os requisitos dimensionais e de tolerância. Isto cria regiões onde a tensão na ferramenta é muito grande o que pode levar a iniciação de trincas após apenas alguns ciclos de forjamento [3].

Geralmente, as trincas por fadiga se iniciam e propagam em regiões onde as deformações são mais severas. Os mecanismos de fadiga compreendem as seguintes fases sucessivas: nucleação ou iniciação da trinca (estágio I), propagação (estágio II), e ruptura final (estágio III) [9, 10]. As trincas normalmente iniciam na superfície do componente, visto que nessa região que ocorre as maiores tensões [3]. O campo de tensões na superfície é determinado por uma série de fatores, como por exemplo, a magnitude do carregamento, imperfeições metalúrgicas e de superfície as quais podem ser concentradores de tensão macroscópicos. De maneira similar, o material é composto por descontinuidades, anisotropia e não homogeneidades. Imperfeições na superfície, como entalhes, arranhões, riscos e falhas de fabricação são os locais mais óbvios para a nucleação de trincas. Descontinuidades superficiais e sub superficiais em zonas críticas também podem ser sítios de nucleação. Inclusões de outros materiais, precipitados frágeis, e descontinuidades no arranjo cristalino, como fronteiras de grão e fronteiras duplas, são exemplos de concentradores de tensão microscópicos na matriz do material [10, 11].

Embora a nucleação de trincas geralmente ocorra em entalhes ou em outras descontinuidades, até mesmo em superfície sem defeitos as trincas podem ocorrer. A formação de bandas de deslizamento é inerente a superfície dos materiais e pode levar a nucleação

[3, 10]. Elas são o resultado do acúmulo sistemático de pequenos deslizamentos na ordem de 1 nm. O movimento destas bandas leva a formação de intrusões e extrusões na superfície, levando a formação de trincas, conforme figura 3 [10].

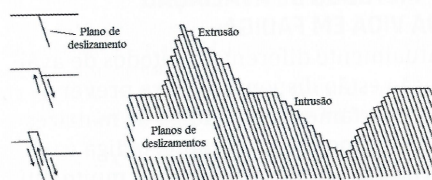


Figura 3 - Desenvolvimento de intrusões e extrusões durante a nucleação de trincas de fadiga [10]

O primeiro estágio consiste na nucleação de uma trinca e posterior crescimento a 45° em relação a direção de sollicitação conforme mostrado na figura 4. O crescimento nesta direção que corresponde a propagação em planos sujeitos a grandes tensões de cisalhamento [4, 11]. Quando o tamanho da trinca é suficiente para que o estado de tensões na ponta da trinca torne-se dominante, a trinca começa a propagar perpendicularmente a direção da tensão principal, passando então, ao estágio II [9].

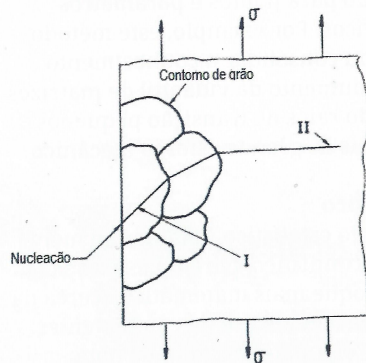


Figura 4 - Estágios de nucleação e crescimento de trinca [9].

Como previamente dito, o estágio II ocorre quando a trinca modifica sua direção e propaga no plano normal a direção do carregamento. Portanto, este comportamento é governado pelo valor da tensão normal e o crescimento neste estágio ocorre de forma ordenada. A velocidade de propagação do estágio II é dependente do fator de intensidade

de tensões e possui uma característica única chamada marcas de praia [4, 10]. Provavelmente, marcas de praia são um dos maiores indicativos de falha devido a fadiga. Elas indicam o ponto onde a trinca se iniciou e podem ocorrer devido as variações de carregamento durante a ciclagem ou à oxidação³ da superfície da fratura durante períodos em que a trinca não se propaga quando o componente não está sob sollicitação alguma [10, 12]. A figura 5 mostra a falha por fadiga ocorrida em um martelo de queda. Os pontos A mostram o ponto de nucleação da trinca e os pontos B mostram as marcas de praia devido a fadiga cíclica [13].

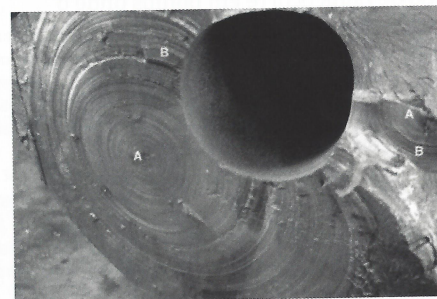


Figura 5 - Detalhes da fratura de um martelo de queda [13]

O estágio III ocorre quando a trinca atinge seu valor crítico, o que acarreta na ruptura final do componente. Neste estágio, a seção útil remanescente não é suficiente para suportar os carregamentos impostos. A trinca propaga-se instavelmente o que leva a ruptura repentina [9].

¹Matriz : ferramental construído para conformar um material de seu estado inicial (bruto) para um estado final (acabado), de ciclo intermitente, que resulta em um componente/peça/produto, único ou que compõe partes de outro produto.

²Ferramental: É a gama de moldes, matrizes, estampos e dispositivos que tem o objetivo de conformar um material de seu estado inicial (bruto) para um estado final (acabado), que resulta em um componente/peça/produto, único ou que compõe partes de outro produto.

³Oxidação: antigamente, o termo oxidação significava combinar-se com o oxigênio. Quando se adquiriu o conhecimento da estrutura dos átomos verificou-se que, quando um elemento ou uma substância combinava-se com o oxigênio, perdia elétrons. Atualmente, o termo significa perder elétrons, não necessariamente em presença de oxigênio [9].

► FADIGA TÉRMICA

Fadiga térmica consiste em trincas na superfície do material devido a tensões cíclicas térmicas. Matrizes para forjamento experimentam altas taxas de aquecimento na sua superfície e repentino resfriamento devido aos processos de lubrificação pós-eta de forjamento [3]. Devido à pequena camada aquecida e resfriada e às diferentes temperaturas nas redondezas, este processo cria tensões compressivas e trativas as quais podem atingir valores acima da tensão de escoamento do material podendo nuclear trincas na superfície após alguns ciclos de forjamento [5, 14]. Normalmente, este tipo de falha ocorre em pontos onde o tempo de contato entre matriz e geratriz é suficientemente grande. Este tempo de contato longo causa um grande gradiente de temperaturas na superfície da ferramenta criando deformações [3, 6].

Trincas devido a fadiga térmica são resultado de rápidas alterações na temperatura da superfície da ferramenta. Os ciclos de temperatura podem induzir tensões altas o suficiente para impor um incremento de deformação plástica na superfície da ferramenta [4, 15]. Trincas na superfície se desenvolvem geralmente em poucos milhares de ciclos, ou até mesmo antes, e consequentemente, este tipo de falha está no campo da fadiga de baixo ciclo (10^3 a 10^4 ciclos) [2, 3, 6]. Oxidação e fluência do material contribuem significativamente para o início de tais trincas. O mecanismo de fadiga térmica é geralmente observado como uma rede de pequenas trincas na superfície da matriz, e tais trincas em algumas ocasiões somente penetram até certo limite da camada superficial. Esta rede de trincas degrada a qualidade da superfície da ferramenta e, consequentemente, o acabamento superficial dos produtos [1, 8]. Isto pode, em última instância, aumentar o custo de produção devido à cara manutenção, falhas catastróficas das matrizes, e retrabalho dos produtos forjados. Altos níveis de resistência ao escoamento em altas temperaturas, alta dureza, baixa temperabilidade, resistência à fluência e ductilidade, são algumas das propriedades necessárias do material para que se evite a fadiga térmica. Aços

ferramentas de trabalho a quente, como por exemplo, AISI H11, H13, H20, H21 ou H22, se apresentam como ótimos candidatos para a utilização em ferramentas de forjamento a quente [16-18].

► MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA VIDA EM FADIGA

Atualmente diferentes métodos de avaliação estão disponíveis para prever o comportamento em fadiga de matrizes de forjamento. Entretanto, fadiga é um processo empírico⁴/científico muito difícil de prever com exatidão. Entre estes métodos salientamos os que seguem.

Determinístico/Empírico

O método determinístico é baseado em observações realizadas durante o processo. Por exemplo, se um par de matrizes forjou 1.500 componentes até a ser observada a nucleação de trincas devido a fadiga, supõe-se que o próximo par terá uma vida útil de aproximadamente 1.500 ciclos também. Ele é considerado determinístico, pois baseia-se no que já foi observado, mas sem o equacionamento matemático para uma melhor compreensão do processo [3].

Este tipo de análise é geralmente utilizado para pontos e parâmetros específicos. Por exemplo, este método permitiu consolidar o conhecimento para o aumento da vida útil de matrizes evitando raios de transição pequenos em locais de grande esforço mecânico.

Estatístico

O método estatístico é similar ao método determinístico, porém baseia-se em um enfoque mais matemático acerca da predição da vida útil de componentes. Através de uma determinada população, que tende sempre a aumentar, analisa-se a confiabilidade do ferramental. Consideram-se os dados relacionados ao ferramental, usualmente número de ciclos até falha, e ajustam-se estes dados a uma distribuição estatística. Desta forma, obtêm-se a distribuição de dados relacionados às amostras avaliadas. Então, estes são relacionados a fim de atingir uma taxa de sucesso aceitável. A medida estatística da probabilidade de que um componente mecâni-

co não falhe é denominada confiabilidade (R) e está diretamente relacionada à probabilidade de falha (pf) [12].

A probabilidade de falha p_f é obtida através de uma função de densidade de probabilidade, a qual representa a distribuição de eventos para um determinado intervalo. As distribuições mais comuns em problemas de engenharia são a distribuição gaussiana, ou normal, e a distribuição de Weibull [12].

Teórico/Mecânico

O método teórico é o único método o qual pode descrever a vida das matrizes antes mesmo de sua fabricação. Este método consiste em avaliar o processo, por exemplo, através de análise em elementos finitos⁵ e análise mecânica de possíveis zonas de falha para definir pontos concentradores de tensão e definir o comportamento em fadiga do material. Na última década, muitos esforços têm sido despendidos para modelar a propagação de trincas através de métodos de elementos finitos [3, 4, 19].

Dentre os métodos teóricos/mecânicos três abordagens fundamentais são utilizadas para projeto e análise de fadiga em componentes metálicos. Estes métodos são denominados método da vida sob tensão, método da vida sob deformação e método da mecânica da fratura linear elástica (LEFM) [2, 12]. As premissas de projeto de cada uma das abordagens são diferentes, mas se complementam para uma melhor predição de vida em fadiga. Todas abordagens tentam prever o número de ciclos até a falha, N, para um específico carregamento. Vida entre $1 < N < 10^3$ ciclos é considerada fadiga de baixo ciclo (Lowcycle fatigue – LCF) enquanto que a fadiga é alto ciclo (High cycle fatigue – HCF) é considerada quando $N > 10^3$ ciclos [2, 4, 9, 12].

⁴Empírico: É o conhecimento que se adquire no decorrer do dia, por meio de tentativa e erro.

⁵Elementos finitos: É uma forma de resolução numérica de um sistema de equações diferenciais parciais. É uma análise matemática que consiste na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos, mantendo as mesmas propriedades do meio original.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Berti, G. A. and M. Monti; Thermo-mechanical fatigue life assessment of hot forging die steel. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2005. 28(11): p. 1025-1034.
2. Chen, C., et al.; A review on remanufacture of dies and moulds. *Journal of Cleaner Production*, 2014. 64: p. 13-23.
3. Santaella, M. L.; Thermo-mechanical fatigue of hot forging tools - prediction, analysis and optimization methods through six-sigma, in *Faculty of Georesources and Materials Engineering*. 2012, RWTH Aachen University: Alemanha. p. 200.
4. Grobaski, T. C.; Preliminary research for the development of a hot forging die life prediction, in *Mechanical Engineering*. 2004, Ohio University: EUA. p. 119.
5. Chander, S. and V. Chawla; Failure of Hot Forging Dies—An Updated Perspective. *Materials Today: Proceedings*, 2017. 4(2): p. 1147-1157.
6. Lavtar, L., et al.; Analysis of the main types of damage on a pair of industrial dies for hot forging car steering mechanisms. *Engineering Failure Analysis*, 2011. 18(4): p. 1143-1152.

7. Velay, V., et al.; Thermal fatigue of a tool steel: Experiment And Numerical Simulation. in *6th International Tooling Conference*. Karlstad University, Sweden. 2002.
8. Gronostajski, Z., et al.; The failure mechanisms of hot forging dies. *Materials Science and Engineering: A*, 2016. 657: p. 147-160.
9. Branco, C. M., A. A. Fernandes, and P. M. S. T. Castro; Fadiga de estruturas soldadas. 1986: Fundação Calouste Gulbenkian.
10. Campbell, F. C.; *Fatigue and Fracture: Understanding the Basics*. 2012: ASM International.
11. Lampman, S. R. et al.; *ASM Handbook: Fatigue and fracture*. 1996: ASM International.
12. Nisbett, K. and R. Budynas; *Shigley's Mechanical Engineering Design*. 10th ed. ed. 2014, EUA: McGraw-Hill Education. 1105.
13. Irisarri, A., A. Pelayo; Failure analysis of an open die forging drop hammer. *Engineering Failure Analysis*, 2009. 16(5): p. 1727-1733.
14. Persson, A., S. Hogmark, and J. Bergström; Simulation and

- evaluation of thermal fatigue cracking of hot work tool steels. *International Journal of Fatigue*, 2004. 26(10): p. 1095-1107.
15. Jhavar, S., C. Paul, and N. Jain; Causes of failure and repairing options for dies and molds: A review. *Engineering Failure Analysis*, 2013. 34: p. 519-535.
 16. Berti, G. A. and M. Monti; Improvement of life prediction in AISI H11 tool steel by integration of thermo-mechanical fatigue and creep damage models. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2009. 32(3): p. 270-283.
 17. Persson, A.; Strain-based approach to crack growth and thermal fatigue life of hot work tool steels. *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 2004. 33(1): p. 53-64.
 18. Ebara, R.; Fatigue crack initiation and propagation behavior of forging die steels. *International Journal of Fatigue*, 2010. 32(5): p. 830-840.
 19. Behrens, A., et al.; Numerical analysis of tool failure in hot forging processes. *Obróbka Plastyczna Metali*, 2008. 19: p. 11-17.



Autor principal Diego Rafael Alba - Graduação em Engenharia Mecânica e Mestrado em Engenharia de Materiais, Minas e Metalúrgica pela UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul). Atualmente aluno de doutorado do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M) da UFRGS. Pesquisas relacionadas aos processos de conformação mecânica e análises numérica dos processos através do método dos elementos finitos. Experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase em Propriedades Mecânicas dos Metais e suas ligas, atuando principalmente nas áreas de conformação dos metais, soldagem em estado sólido, fadiga e análise de falha. Experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em projeto de componentes e equipamentos para indústria rodoviária e de Óleo & Gás. eng.diego.alba@gmail.com

Co-autor Thomas Gomes dos Santos - Possui graduação em Fabricação Mecânica pela Universidade Federal de Santa Maria (2015). Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Processos de Fabricação, atuando principalmente nos seguintes temas: usinagem, forjamento, extensômetros e análises numéricas. thomas.santos@ufrgs.br

Co-autor Lirio Schaeffer - Coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da UFRGS. Engenheiro Mecânico pela UFRGS, com doutorado na área de Conformação pela Universidade Técnica de Aachen (RWTH-Aachen). Pesquisador na área de Mecânica, Metalurgia e Materiais pelo CNPq, professor das disciplinas relacionadas aos processos de fabricação por conformação mecânica da UFRGS e vinculado ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M) desta universidade. Autor de diversos livros relacionados ao tema de Conformação Mecânica. schaeffer@ufrgs.br

