

DETERMINAÇÃO NUMÉRICA DE REGIÕES DE MATRIZES DE FORJAMENTO A QUENTE SUJEITAS À FADIGA TÉRMICA¹

Frederico de Castro Magalhães²

Roberto Braga Figueiredo³

Maria Teresa Paulino Aguilar⁴

Antônio Eustáquio de Melo Pertence⁵

Haroldo Béria Campos⁵

Paulo Roberto Cetlin⁶

Resumo

As forjarias vem procurando, constantemente, aços ferramentas que proporcionam um melhor rendimento produtivo, por meio da maximização da vida útil das matrizes, reduzindo assim, os custos de produção. A vida útil das ferramentas (matrizes) é comumente expressa pelo número de peças forjadas (ciclo de produção), antes de serem rejeitadas pela presença de algum mecanismo de falha, que venha alterar as dimensões e/ou a geometria do produto final ou até mesmo ocasionar a quebra das matrizes. Entre os mecanismos de falha, presentes nas matrizes de forjamento a quente, destaca-se a fadiga térmica, que é ocasionada pelo aquecimento e resfriamento cíclicos em que as matrizes são submetidas. Este trabalho teve como objetivo desenvolver uma subrotina para um aplicativo numérico, empregando o método dos elementos finitos, capaz de prever regiões propícias a fadiga térmica. Os resultados numéricos foram comparados com os resultados industriais para a validação da subrotina proposta.

Palavras-chave: Forjamento a quente; Fadiga térmica; Elementos finitos; Aço H13.

THE NUMERICAL DETERMINATION OF REGIONS OF THERMAL FATIGUE IN HOT FORGING DIES

Abstract

Hot forging benefits from tool steels that provide high productive performance and maximize die life, thereby reducing production costs. The lifetime of the dies is commonly expressed by the number of forgings (production cycle) before being rejected by the presence of a failure mechanism, associated with unacceptable dimensions and or geometry of the end product or even breakage of the dies. One of the failure mechanisms of hot forging dies, is thermal fatigue, caused by cyclic heating and cooling. A subroutine was developed for a numerical application, using the finite element method, in order to locate die regions susceptible to thermal fatigue. The numerical results were compared with results for the validation of the proposed subroutine.

Key words: Hot forging; Thermal fatigue; Finite elements; H13 steel.

¹ *Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Engenheiro mecânico, Dr. Pós Doutorado. Depto. Engenharia de Materiais e Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Belo Horizonte, MG, Brasil.*

³ *Engenheiro mecânico. Professor Adjunto, Departamento de Engenharia de Materiais e da Construção Civil, UFMG. Belo Horizonte, MG, Brasil.*

⁴ *Engenheiro metalurgista. Professora Titular, Departamento de Engenharia de Materiais e da Construção Civil, UFMG. Belo Horizonte, MG, Brasil.*

⁵ *Engenheiro mecânico. Professor Associado, Depto. de Engenharia Mecânica, UFMG. Belo Horizonte, MG, Brasil.*

⁶ *Engenheiro mecânico. Professor Titular, Depto. de Engenharia Mecânica, UFMG. Belo Horizonte, MG, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Os produtos metálicos semi-acabados são caracterizados por não apresentarem a forma final. São fabricados por meio de processos primários e secundários de fabricação, tais como laminação, forjamento, extrusão e trefilação. Para o processo de forjamento a quente, frequentemente utiliza-se como matéria-prima aços carbonos e ligados e para as matrizes os aços ferramenta AISI H11, H12 e H13, sendo AISI H13 um dos mais utilizados.⁽¹⁾ Os produtos forjados apresentam uma boa resistência mecânica e certa precisão dimensional⁽²⁾ e são empregados, largamente, na indústria petroquímica, mecânica e automobilística. Em 2011, a produção mundial de produtos forjados a quente foi de 4 milhões de toneladas.⁽³⁾ A Figura 1 mostra uma conexão semi-acabada destinada para a indústria petroquímica.



Figura 1. Conexão semi-acabada forjada a quente.

As forjarias tem preferência por aços ferramentas que proporcionam um melhor rendimento produtivo, por meio da maximização da vida útil das matrizes, e assim, reduzindo os custos de produção. A vida útil das ferramentas (matrizes) é comumente expressa pelo número de peças forjadas (ciclos de produção), antes de serem rejeitadas pela presença de algum mecanismo de falha, que venha alterar as dimensões e/ou a geometria do produto final ou até mesmo ocasionar a quebra das matrizes. Entre os mecanismos de falha presente em uma matriz de forjamento a quente, destacam-se: fadiga mecânica, fadiga térmica, deformação plástica e desgaste por abrasão. A Figura 2 retrata possíveis regiões onde estes mecanismos de falha podem atuar.⁽²⁾

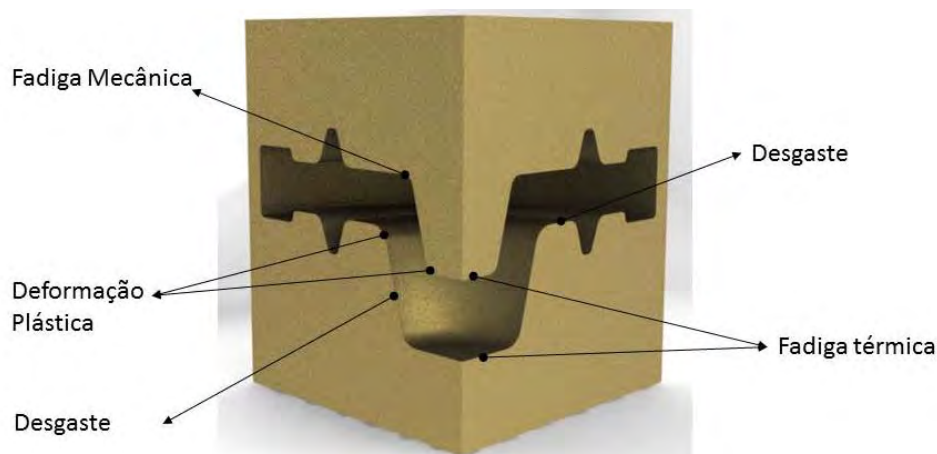


Figura 2. Mecanismos de falhas presentes na ferramenta de forjamento a quente.

Durante a sua vida útil, as matrizes de forjamento a quente, são submetidas a aquecimentos e resfriamentos cíclicos que geram tensões térmicas, propiciando a formação de fissuras que tem origem na superfície das matrizes. A Figura 3 apresenta o aspecto típico da malha de trincas térmicas na superfície de uma matriz, no aço H13, destinada para o forjamento de união em prensas excêntricas.⁽⁴⁾ A literatura apresenta que o início das trincas térmicas ocorre em média, a menos 1% da vida útil do ferramental.⁽⁵⁾

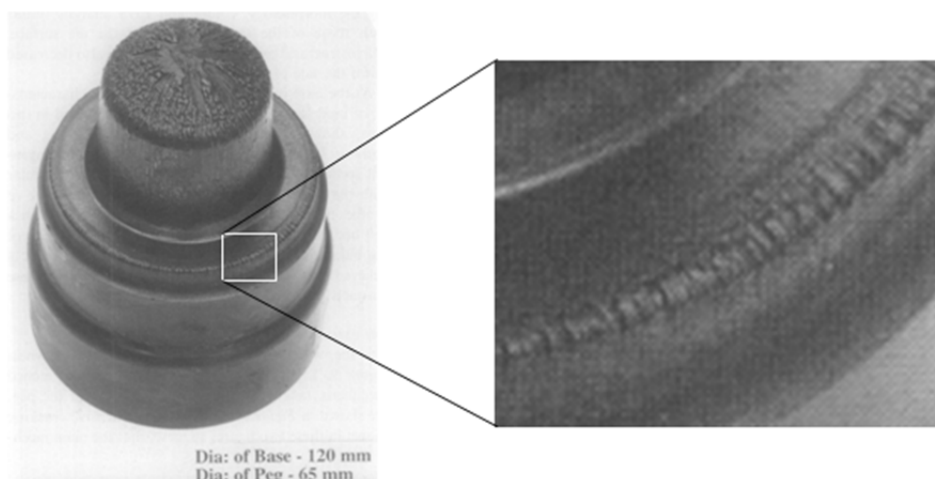


Figura 3. Malha de trincas térmicas observadas na matriz de forjamento a quente.⁽⁴⁾

Existem poucos estudos experimentais e numéricos que objetivam determinar o número de ciclos de produção das matrizes em relação à fadiga térmica, principalmente, para aplicações específicas, como o uso do aço AISI H13 no forjamento a quente. Entre os estudos experimentais já realizados, destaca-se o trabalho de Maln e Norstron,⁽⁶⁾ que visa o desenvolvimento e aplicação de modelos matemáticos específicos para os aços ferramenta, com o objetivo de simplificar o entendimento prático das tensões e deformações envolvidas no processo de conformação a quente. Neste trabalho foi desenvolvida uma subrotina para o aplicativo numérico Deform2D, capaz de prever regiões propícias à fadiga térmica em uma matriz de corpos moedores. Os resultados numéricos foram comparados com os resultados industriais para a validação da subrotina proposta.

No campo geral da fadiga de baixo ciclo (<1.000 ciclos), onde as deformações plásticas em cada ciclo excedem as deformações elásticas, pode-se dividir em duas categorias: térmica, se a temperatura não é constante com o tempo e isotérmica, se a temperatura é constante ao longo do tempo.⁽⁷⁾

Segundo Spera⁽⁷⁾ a fadiga térmica é definida como a deterioração gradual dos materiais que sofrem aquecimentos e resfriamentos alternados, durante os quais, a livre expansão térmica é parcial ou completamente restringida. Esta restrição à livre expansão térmica origina tensões térmicas que podem provocar a iniciação e propagação de fissuras nas superfícies das matrizes. A severidade dos ciclos térmicos é determinada, principalmente, pela diferença de temperatura, pela temperatura máxima atingida, e pela a velocidade de aquecimento e resfriamento. Desse modo, as fissuras térmicas tendem a se desenvolverem em regiões, nas quais não se têm nenhum tipo de concentrador de tensão.

De acordo com os estudos de Maln e Norstron,⁽⁶⁾ para que ocorra a fadiga térmica de baixo ciclo, a amplitude da deformação térmica deve exceder a deformação elástica, que pode ser expressa pela Equação 1:

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

Onde α é o coeficiente médio da expansão térmica, ν_1 e ν_2 são os coeficientes de Poisson, σ_2 e σ_1 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.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Para a previsão das regiões propícias à fadiga térmica em uma matriz de corpos moedores, foi inicialmente desenvolvida uma simulação utilizando o aplicativo numérico Deform 2D. Posteriormente os resultados foram validados a partir de dados industriais.

2.1 Materiais

A Figura 4 mostra o ferramental construído para o forjamento a quente de corpos moedores esféricos com diâmetro nominal de 90 mm, prevendo-se a formação de rebarba entre as matrizes. Tanto o canal quanto a garganta de rebarba seguem a norma DIN⁽⁸⁾ (Figura 5). Para assegurar o exato posicionamento e evitar um possível deslocamento relativo horizontal das matrizes superior e inferior foram utilizados pinos guias, indicados na Figura 4.



Figura 4. Matriz superior e inferior empregadas no forjamento dos corpos moedores.

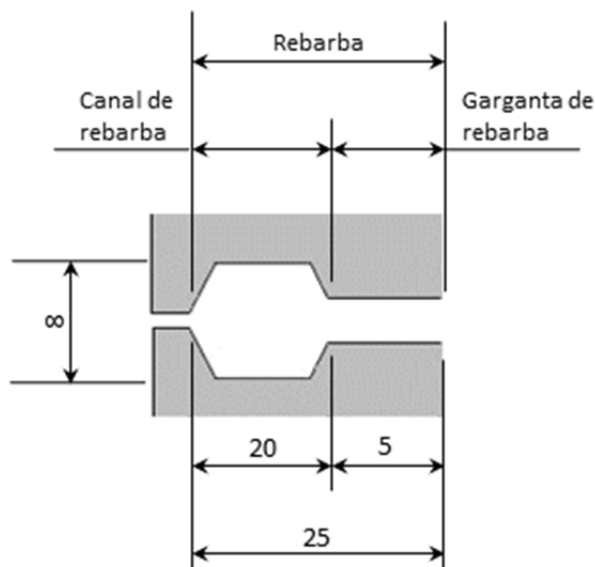


Figura 5. Geometria do canal e dimensões da bacia de rebarba.

O material utilizado para as matrizes foi o aço ferramenta AISI H13, que apresentou uma dureza média de 52 HRC depois de temperado e revenido. Para os corpos moedores foi usado o aço carbono AISI 1045. As Tabelas 1 e 2 mostram a composição química do aço ferramenta AISI H13 e do aço carbono AISI 1045.

Tabela 1. Composição química do aço ferramenta AISI H13 empregado para a confecção das matrizes

%C	%Mn	%Si	%Cr	%Mo	%V
0,36	0,40	1,10	5,20	1,50	0,90

Tabela 2. Composição química do aço carbono AISI 1045 empregado para a confecção dos corpos moedores

%C	%Mn	%Si	%S	%P	%Cr
0,46	0,72	0,23	0,021	0,015	0,05

De acordo com Grunning,⁽⁹⁾ a fim de evitar a flambagem, a altura do tarugo não deve exceder a 2,5 vezes o seu diâmetro. Assim sendo, foi utilizado um tarugo cilíndrico, no aço carbono AISI 1045, com diâmetro de 76,2 mm e altura de 120 mm, aquecido em um forno de indução a uma temperatura média de 950°C. Esse mesmo tarugo foi posicionado em pé, apoiado na matriz inferior, que foi pré-aquecida a 200°C, temperatura recomendada para o forjamento do aço carbono, juntamente com a matriz superior. O aquecimento das matrizes foi realizado por meio de aquecedores a gás (GLP). Para o monitoramento das temperaturas do tarugo e das matrizes foi empregado um termômetro digital do tipo K. O tempo total ou ciclo de operação foi de 20 segundos, considerando o transporte do tarugo para a prensa mecânica, seu posicionamento, sua conformação, a retirada do produto final e da aplicação do desmoldante a base de 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, Deform 2D (SFTC – Scientific Forming Technologies, Ohio, USA), empregado para simular o ciclo de forjamento dos corpos moedores, 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 $t+dt$. Para determinar possíveis regiões propícias à fadiga térmica de baixo ciclo por meio da Equação 1, durante o estado estacionário de temperatura, fez-se necessário a implementação de uma subrotina.

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 (Figura 6).

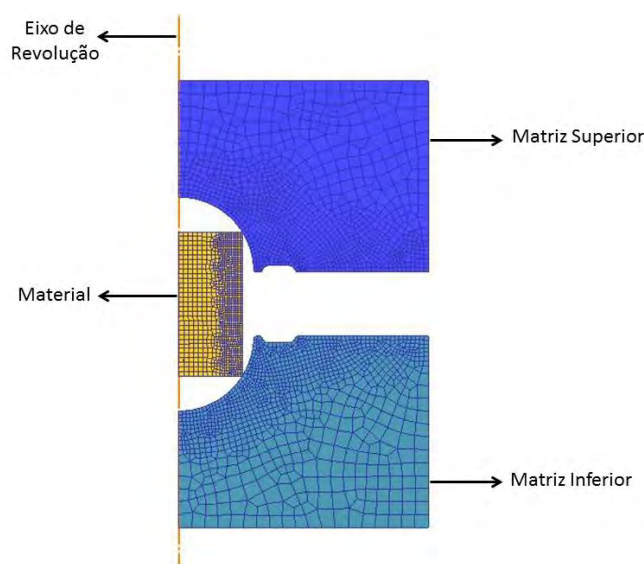


Figura 6. Modelagem numérica do conjunto.

O aço AISI 1045 foi modelado como material isotrópico e rígido-plástico, com uma malha de 1.000 elementos quadrados, conforme a figura 5. Para evitar a remalha automática do tarugo, que pode comprometer os resultados numéricos, decidiu-se que a malha seria mais densa no lado voltado para a bacia de rebarba (elementos com 0,2 mm). A curva de fluxo para descrever o comportamento do aço carbono AISI 1045 durante os ciclos de forjamento é em função da deformação, da taxa de deformação e da temperatura $\sigma_{ef} = \sigma(\varepsilon_{ef}, \dot{\varepsilon}_{ef}, T)$ e suas propriedades mecânicas e térmicas foram obtidas diretamente da biblioteca do aplicativo numérico. As matrizes superior e inferior também foram modeladas como materiais isotrópicos e elásticos. A malha é mais densa, com elementos com 0,2mm, na região de contato com o material a ser forjado, garantindo assim, boa convergência dos resultados. Uma malha mais grosseira, (elementos com 1 mm), foi empregada no restante das matrizes, sem comprometer os resultados. Foi utilizado um fator de atrito de 0,3 nas interfaces das matrizes/material.⁽¹⁰⁾

2.3 Transferência de Calor e Parâmetros Térmicos

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, pelo atrito material/ferramenta e pela dissipação de calor por transmissão ao meio ambiente. Empregou-se o valor de 25°C para descrever a temperatura ambiente e a solução grafitada. Os parâmetros térmicos dos materiais foram retirados da biblioteca do aplicativo numérico e na falta de alguma propriedade, essa foi obtida dos trabalhos

de Chun,⁽¹¹⁾ Sjostrom.⁽⁵⁾ Durante o forjamento e o resfriamento das matrizes foram empregados os seguintes coeficientes de transferência de calor:

- Forjamento – Matriz/Tarugo: 15 kW/m².K e Matriz/Matriz: 11 kW/m².K;
- Resfriamento – Matriz/Matriz: 11 kW/m².K e Face em contato com desmoldante: 45 kW/m².K.

2.4 Estado Estacionário de Temperatura e Subrotina

Para descrever o estado estacionário de temperatura, foram avaliadas numericamente as evoluções das temperaturas, em ciclos sucessivos de forjamento, nos três pontos destacados na matriz inferior (Figura 7). Estes pontos foram escolhidos uma vez que as temperaturas máximas ocorrem na superfície da cavidade da matriz. O ponto P1 encontra-se na borda superior da cavidade, P2 no ponto de contato entre material/matriz e P3 no ponto mais baixo da cavidade. Ressalta-se que as condições térmicas do ciclo anterior foram transferidas para o ciclo posterior de forjamento, no intuito de se obter esse estado. As simulações numéricas em que envolveram o uso do desmoldante foram baseadas nos estudos de Chun.⁽¹¹⁾

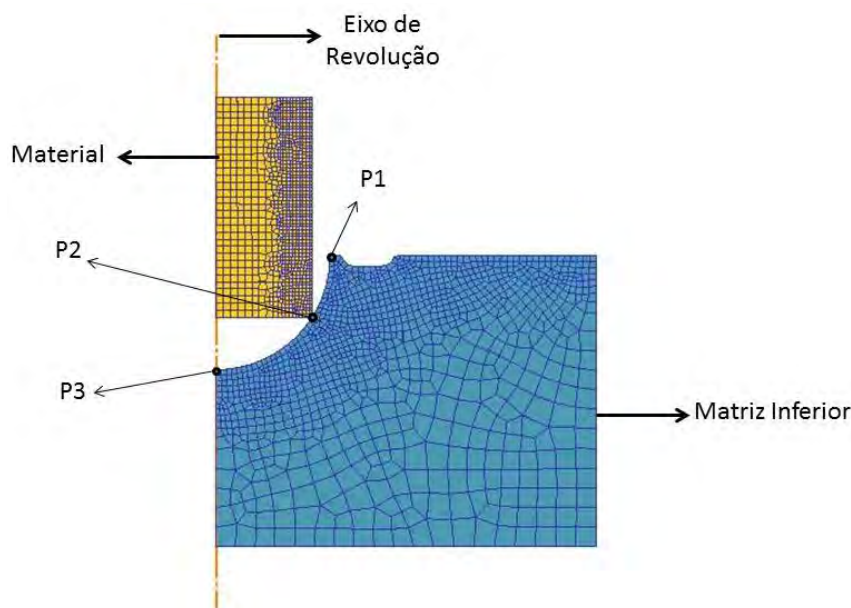


Figura 7. Pontos escolhidos para avaliação do gradiente térmico na matriz inferior.

Uma vez obtido o estado estacionário da temperatura, os módulos de elasticidade, os coeficientes de Poisson e as tensões referentes às temperaturas máximas e mínimas, foram introduzidos na subrotina, determinando assim, regiões sujeitas à fadiga térmica, equação 1. As propriedades mecânicas e térmicas do aço H13 eram retiradas do aplicativo numérico e dos trabalhos de Chun⁽¹¹⁾ e Sjostrom.⁽⁵⁾

A Figura 8 mostra a representação esquemática do algoritmo usado no projeto da subrotina.

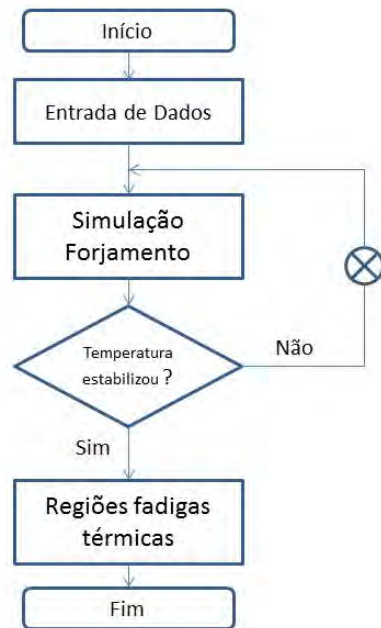


Figura 8. Fluxograma do algoritmo implementado no aplicativo numérico Deform 2D.

3 RESULTADOS

As simulações numéricas mostraram que ciclo estacionário das temperaturas nos pontos P1, P2 e P3 teve início após a 66^a peça forjada. O gráfico da Figura 9 mostra as evoluções das temperaturas nos estados estacionários para esses pontos no 67^o ciclo de forjamento e as médias das máximas temperaturas medidas industrialmente nos respectivos pontos.

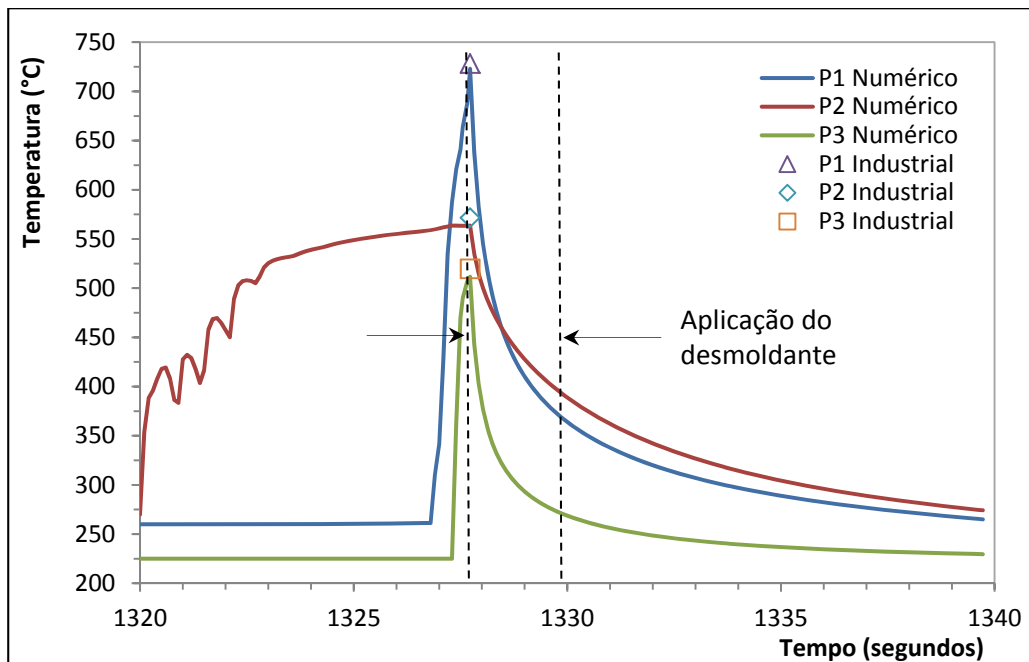


Figura 9. Perfis térmicos dos pontos P1, P2 e P3 no 67^o ciclo de forjamento e as máximas temperaturas industriais.

Tanto no início (1.320 segundos) quanto no final do ciclo de forjamento (1.340 segundos), as temperaturas nos pontos P1 e P2 foram semelhantes. A não existência de contato com o tarugo nos instantes iniciais do processo de forjamento

do corpo moedor faz com que as temperaturas nos pontos P1 e P3 permaneçam constantes, ao contrário do ponto P2, que representa o ponto de apoio do tarugo com a matriz, faz com que a temperatura aumente de forma gradativa de 260°C até 560°C ($\Delta T=300^\circ\text{C}$). Quando se inicia a formação de rebarba devido ao preenchimento total da cavidade da matriz, as temperaturas nos pontos P1 e P3 apresentam um aumento significativo de 465°C e 280°C respectivamente. Após a conformação do tarugo, 1.328 segundos, fez-se a aplicação do desmoldante por dois segundos. Durante a aplicação do desmoldante, as temperaturas nos três pontos escolhidos decaem rapidamente, e uma vez terminada a sua aplicação, o decaimento torna-se mais suave. Este mesmo comportamento foi observado por Chun.⁽¹¹⁾

Por apresentar a maior temperatura no decorrer do processo (722°C), o ponto P1 pode desenvolver outro possível mecanismo de falha, a deformação plástica, que esta associada à queda do limite de escoamento do material (AISI H13), capaz de alterar as dimensões do produto final nesta região.

Com base na Equação 1, a subrotina mostrou que na cavidade da matriz, onde ocorrem as maiores variações térmicas, é favorável ao desenvolvimento da fadiga térmica (cor vermelha), Figura 10, condizendo com o que foi observado nas matrizes dos corpos moedores, Figura 11, e no trabalho de Sjostrom.⁽⁵⁾



Figura 10. Mapeamento das áreas sujeitas à fadiga térmica obtida pela subrotina.

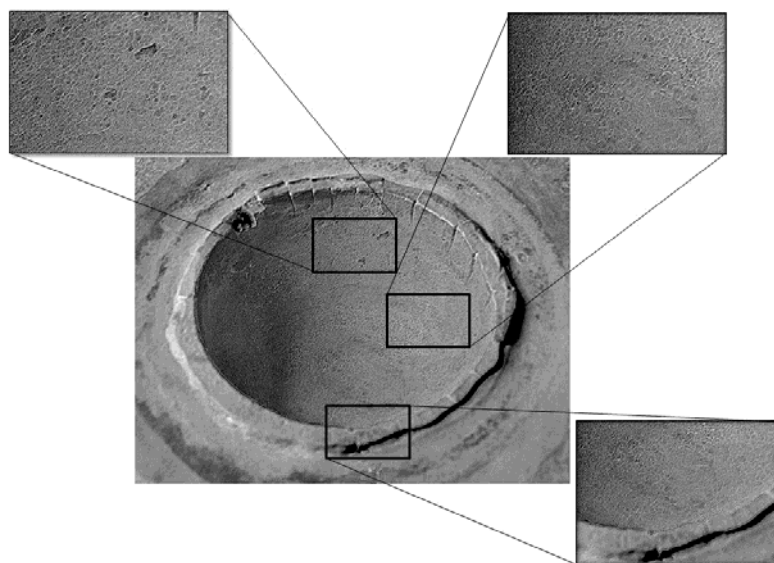


Figura 11. Fadigas térmicas observadas ao longo da cavidade da matriz inferior após 950 ciclos de forjamento.

4 CONCLUSÕES

Os valores dos coeficientes de transferência de calor empregados nas simulações numéricas, para determinar as evoluções das temperaturas nos ciclos de forjamento, geraram resultados condizentes com os que foram obtidos industrialmente.

A cavidade da matriz, por estar sujeita aos maiores gradientes térmicos, é propícia ao desenvolvimento as fissuras térmicas, fato comprovado industrialmente e pelos resultados numéricos obtidos pela subrotina implantada no aplicativo Defom2D.

A subrotina implementada no aplicativo Deform 2D, para 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 Stahleisenliste (Hrsg-VDEh) 9. Auflage, Dusseldorf, VerlagSthaleissen, 1998.
- 2 König, W., Klocke, F. Fertigungsverfahren. Bd. 4. Massivumformung, Dusseldorf, VDI-verlag, 1995.
- 3 www.metaform.de (acessado em agosto de 2012).
- 4 Summerville, E., Venketesan, K., Subramanian, C. Wear processes in hot forging press tools. *Materials & Design*, Vol.15, 289-294, 1995.
- 5 Sjostrom, J. Chromium martensitic hot-work tool steels. Dissertation, Karlstad University Studies, 2004.
- 6 Malm, S., Norstrom, L. A. Material-related model for thermal fatigue applied to tool steels in hot-work applications. *Metal Science*, September, 544-550, 1979.
- 7 Spera, D.A. "What is thermal Fatigue"; Thermal fatigue of materials and components. ASTM-STP612, pag.3.
- 8 Lange, K. Umformtechnik. Bd.2, Massivumformung, Berlin, Springer-Verlag, 1998.
- 9 Grunning, K. Técnica da Conformação. Pp. 38-64, 1996.
- 10 Metals Handbook. Forming and Forging, Vol.14. Ed. Metals Park. American Soc. For Metals.
- 11 Chun, L. Modeling of water and lubricant sprays in hot metal working. Dissertation, Ohio State University, 2007.