

ALEXANDRE POLOZINE - susirot@terra.com.br
 LÍRIO SCHAEFFER - schaefer@ufrgs.br
 DIEGO RODOLFO SIMÕES DE LIMA - diego.lima@ufrgs.br



Particularidades importantes de aquecimento da ferramenta de forjamento

O presente trabalho mostra particularidades importantes sobre o aquecimento da ferramenta de forja, visualizado por meio do sensor de temperatura superficial desenvolvido no Brasil.

A qualidade e o custo da peça forjada dependem tanto de propriedades físico-químicas da matéria-prima como do processo de fabricação. Assim, para otimizar a qualidade e o custo da peça, o processo de forjamento deve ser cuidadosamente planejado.

São numerosos os fatores que interferem no processo de forjamento. Um desses fatores, de grande importância, é a temperatura da ferramenta de forjamento [1].

A temperatura da ferramenta interfere, durante o forjamento, no estado térmico do tarugo forjado. Quanto maior a temperatura da ferramenta, menor o gradiente de temperatura no material forjado e a qualidade da peça tende a ser maior.

A temperatura da ferramenta é a influência dominante sobre sua vida útil, pois interfere na deformação plástica da ferramenta, nas propriedades do seu material, na fadiga térmica, na fratura, no atrito, na distribuição de tensões, na dureza (ver figura 1) e no desgaste da sua superfície [1].

Na prática, a temperatura ótima da ferramenta em um determinado processo de forjamento pode ser escolhida com base em recomendações empíricas. O valor dessa temperatura deve ser rigorosamente controlado.

AQUECIMENTO DA FERRAMENTA DE FORJAMENTO

Normalmente, o aquecimento da ferramenta de forjamento ocorre em duas etapas operacionais: o aque-

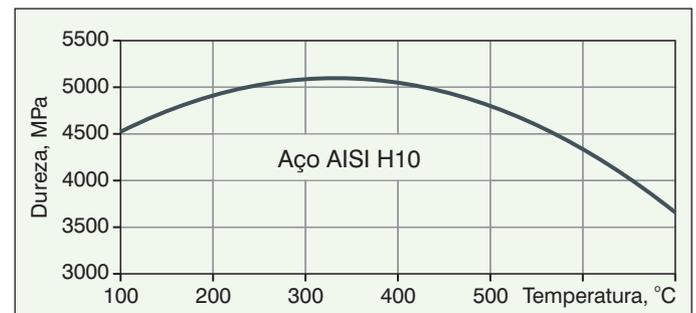


Figura 1 - Curva típica "dureza - temperatura" para o aço AISI¹ H10 [2]

cimento prévio por equipamento adicional, e ao final por contato com o material forjado.

Tanto no primeiro como no segundo caso, o aquecimento do material da ferramenta realiza-se através da sua superfície, como é mostrado na figura 2.

Em consequência disso, a temperatura da superfície de trabalho da ferramenta em aquecimento sempre está maior do que a no interior da mesma, ou seja, a superfície é mais vulnerável ao superaquecimento que pode causar a perda de propriedades mecânicas dela.

Assim, o campo de temperaturas da ferramenta é caracterizado por um conjunto de temperaturas regis-

¹AISI: do inglês American Iron and Steel Institute, que significa Instituto Americano de Ferro e Aço. Os aços ferramenta são classificados de acordo com a sua composição, aplicação ou meio de resfriamento. Os sistemas de classificação em uso atribuem aos aços códigos de identificação, compostos em geral de combinações de letras e números. No Brasil é seguida a classificação AISI, mas também é comum encontrar as classificações estabelecidas pela norma americana SAE (Society of Automotive Engineers = Sociedade de Engenheiros Automotivos) e pela norma alemã DIN (Deutsches Institut für Normung = Instituto Alemão de Normatização).

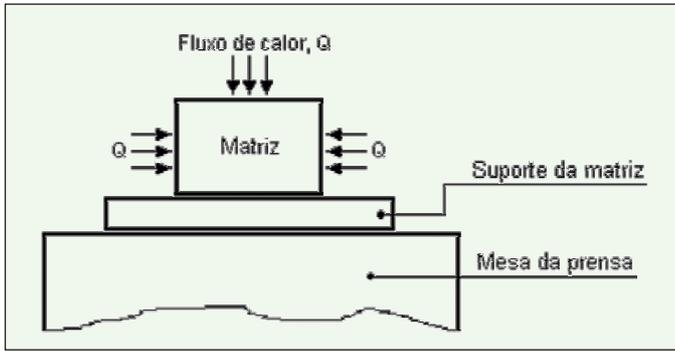


Figura 2 - Esquema de aquecimento da ferramenta de forjamento

tradas no volume e na superfície dela e não é homogêneo.

MEDIÇÃO DE TEMPERATURA DA FERRAMENTA DE FORJAMENTO

A medição de temperaturas dentro do material da ferramenta é uma tarefa habitual na engenharia e não é discutida no presente artigo.

Quanto à superfície, os métodos de medição de temperatura superficial desenvolvidos são insuficientes até o momento, e apresentam dificuldades na sua utilização. Os métodos de medições de temperatura superficial de corpos sólidos são divididos por dois grupos:

- Medição de temperatura sem contato com o corpo investigado; e
- Medição de temperatura superficial com contato.

A medição sem contato da temperatura superficial requer um equipamento caro e sofisticado. A medição de temperatura superficial com contato, por métodos tradicionais, fornece o erro de medição relativamente grande.

Método recomendado pela ASTM

A Sociedade Americana para Ensaio e Materiais (ASTM²) recomenda alguns métodos desenvolvidos exclusivamente para as medições de temperaturas superficiais. Um destes métodos, o mais adequado, é apresentado graficamente na figura 3.

A desvantagem deste método consiste na impossibilidade de instalar o ponto sensível do termopar³ diretamente na superfície examinada, ou seja, a junta de medição de termopar fica abaixo da superfície examinada, o que provoca certa incerteza [4] de medição de temperatura superficial. Com isso, vários pesquisadores de processos de transferência de calor procuraram soluções para diminuir a desvantagem mencionada, e nas últimas décadas o problema de incerteza na

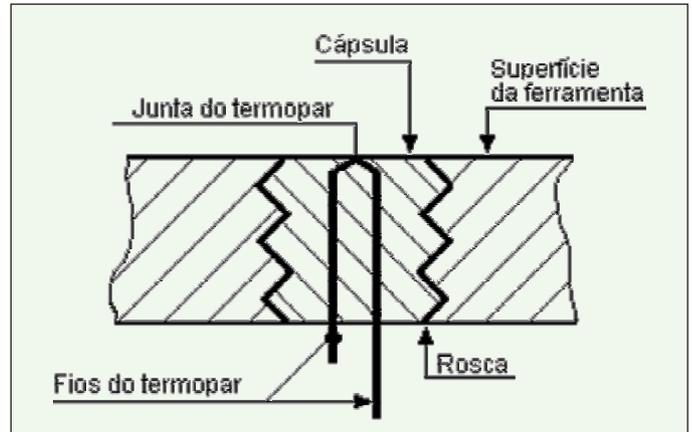


Figura 3 - Montagem para medição de temperaturas superficiais, recomendada pela ASTM [3]

medição de temperatura superficial foi resolvido parcialmente [5, 6]. Mas a montagem desenvolvida por eles é complicada demais para ser útil na área de forjamento.

Método desenvolvido no LdTM

A montagem experimental do método desenvolvido no Laboratório de Transformação Mecânica - LdTM da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS para determinar as temperaturas superficiais da amostra metálica é mostrada esquematicamente na figura 4.

Os equipamentos e materiais empregados na mon-

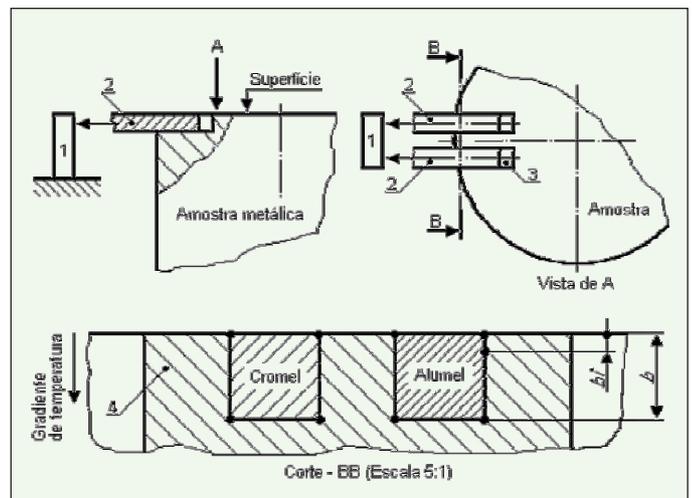


Figura 4 - Montagem para determinar as temperaturas superficiais da amostra metálica [4, 7, 8]

²ASTM: American Society for Testing and Materials. Foi fundada em 1898 nos Estados Unidos da América, por um grupo de cientistas e engenheiros, para analisar as frequentes quebras dos trilhos de trem. Como resultado, o grupo desenvolveu uma norma para o aço utilizado nas ferrovias. É responsável pela produção de normas para diversas áreas da indústria, sendo muito usadas na padronização de materiais, como ligas de aço, alumínio, polímeros e combustíveis.

³Termopar: são dispositivos elétricos com larga aplicação para medição de temperatura.

tagem e alguns elementos da mesma estão listados a seguir:

- 1 - Voltímetro;
- 2 - Fios de cromel⁴-alumel⁵;
- 3 - Canal superficial; e
- 4 - Amostra metálica.

A temperatura medida pelo sensor do LdTM corresponde à de um ponto $bi \ll b$ (*bi muito menor que b*), onde b é largura ou diâmetro dos fios empregados na montagem. Assim, o ponto de medição de temperaturas pode ser aproximado da superfície da amostra até uma distância desprezível. Em consequência, os resultados de outros pesquisadores podem ser ultrapassados com este novo sensor.

VISUALIZAÇÃO DO PROCESSO DE AQUECIMENTO DA FERRAMENTA

A visualização do processo de aquecimento da ferramenta foi feita na base de dados experimentais obtidos para dois casos típicos: aquecimento de matrizes por gás e aquecimento de matrizes por um aquecedor passivo. Os objetivos dos experimentos realizados foram:

- Aquecimento da ferramenta até as temperaturas recomendadas para o forjamento de aços e ligas leves; e
- Obtenção das curvas de aquecimento da mesma.

A descrição detalhada dos experimentos é apresentada nos itens a seguir neste capítulo.

Aquecimento de matrizes por gás

O experimento de aquecimento de matriz por gás foi realizado com base na montagem experimental mostrada na figura 5.

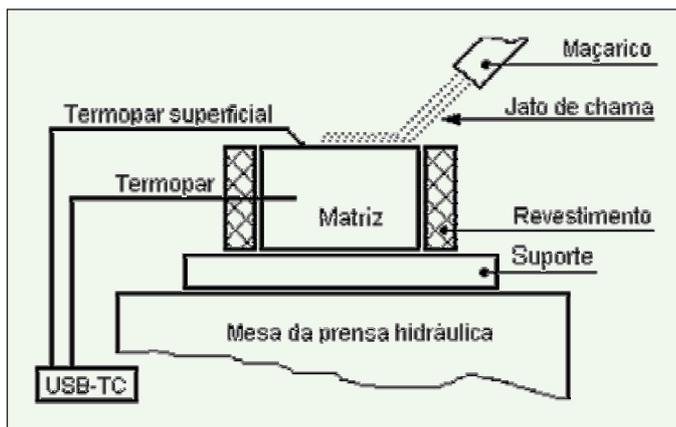


Figura 5 - Aquecimento da matriz por chama de gás

Aquecimento de ferramenta por aquecedores passivos

O experimento de aquecimento de ferramenta por aquecedores passivos foi realizado com base da montagem composta por uma prensa hidráulica, um forno, um sistema de aquisição e gravação de dados, duas matrizes revestidas em sua lateral por isolante térmico e seis aquecedores passivos de aço. O desenho esquemático desta montagem é mostrado na figura 6.

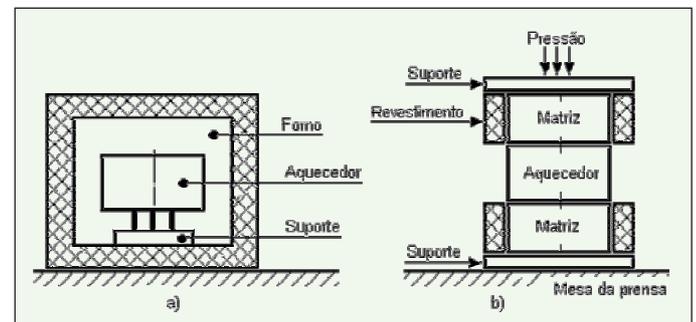


Figura 6 - Aquecimento da ferramenta por aquecedor passivo

As curvas de aquecimento da matriz por gás estão representadas na figura 7 e as curvas de aquecimento da matriz inferior por contato com os aquecedores passivos são mostradas na figura 8.

A descrição do processo de aquecimento da ferramenta, visualizado nas figuras 7 e 8, é a seguinte:

O aquecimento da matriz por gás é apresentado pelas duas curvas suaves: AB (temperatura da superfície da matriz) e A_1B_1 (temperatura do centro dela). O aque-

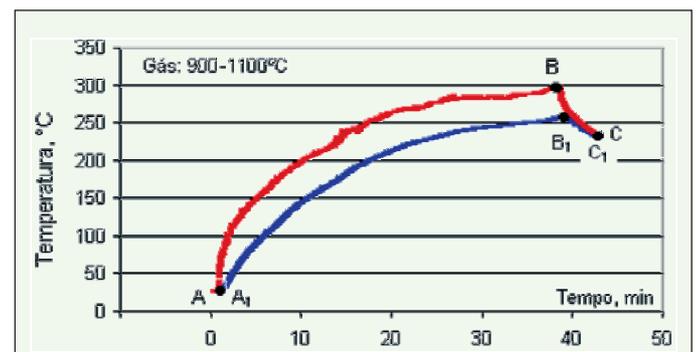


Figura 7 - Curvas de aquecimento da matriz por gás

⁴Cromel: é uma liga composta por cerca de 90% de níquel (Ni) e 10% de cromo (Cr) e é usada para fazer os condutores positivo de termopares. Pode ser usado até 1.100°C em atmosferas oxidantes. O nome é uma marca registrada da Hoskins Manufacturing Company.

⁵Alumel: é uma liga composta por cerca de 95% de níquel (Ni), 2% de manganês (Mn), 2% de alumínio (Al) e 1% de silício (Si). Esta liga magnética é usada para termopares e fios de extensão termopar. O nome é uma marca registrada da Hoskins Manufacturing Company. Em termopares, é muitas vezes utilizado em conjunto com o cromel para formar termopares tipo K.

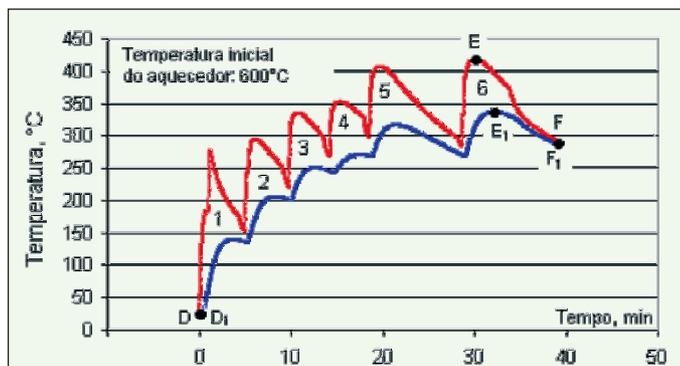


Figura 8 - Curvas de aquecimento da matriz inferior por aquecedores passivos

cimento começou no ponto A (temperatura 26°C, tempo 0), durou cerca de 40 minutos e terminou no ponto B (temperatura da superfície ≈ 300°C). A curva BC é a do resfriamento desta ferramenta por perdas térmicas para o meio ambiente. No mesmo período de tempo a temperatura do centro da matriz subiu de 26°C no ponto B para 257°C no ponto B₁, o que foi causado por condução térmica. A curva B₁C₁ é a do resfriamento do centro da mesma ferramenta.

O aquecimento da matriz inferior da ferramenta por aquecedores passivos é apresentado pelas curvas onduladas DE (temperatura da superfície da matriz) e D₁E₁ (temperatura do centro dela). O aquecimento começou no ponto D (temperatura 26°C, tempo 0), durou cerca de 30 minutos e terminou no ponto E (temperatura da superfície 417°C). A curva EF é a do resfriamento desta ferramenta por perdas térmicas para o meio ambiente. No mesmo período de tempo a temperatura do centro da matriz subiu de 26°C no ponto D₁ para 334°C no ponto E₁, o que foi causado por condução térmica. A curva E₁F₁ é a do resfriamento do centro da ferramenta.

Cada uma das ondas 1, 2, 3, 4, 5 e 6, mostradas na figura 8, corresponde ao processo pulsante de aplicação/retirada na ferramenta de um aquecedor passivo. O tempo de aplicação de cada um dos aquecedores durou cerca de 4 minutos. O lado esquerdo da onda corresponde ao processo de aquecimento da ferramenta por contato com um dos aquecedores (aquecimento por condução), e o lado direito da onda corresponde ao resfriamento da mesma.

Comparação dos métodos de aquecimento da ferramenta

A comparação do método de aquecimento da ferramenta por gás com o de aquecimento da mesma por

aquecedores passivos foi feita com a base de resultados experimentais. Esta comparação está apresentada pela tabela 1.

| Tipo de aquecedor | Gás | Tarugo(s) de aço |
|--|-----------------|------------------|
| Massa da ferramenta | 1 matriz | 2 matrizes |
| Temperatura inicial da ferramenta | 26°C | 26°C |
| Temperatura do aquecedor | 1.000°C (média) | 600°C (inicial) |
| Tempo de aquecimento do centro da matriz (de 26 a 250°C) | 35 min | 12,5 min |
| Tempo de aquecimento do centro da matriz (de 26 a 330°C) | - | 31 min |
| Temperatura máxima da superfície da matriz | 300°C | 417°C |
| Gradiente máximo* de temperatura na matriz | 52°C | 112°C |
| Gradiente médio** de temperatura na matriz | ≈ 4°C | ≈ 7°C |

Tabela 1 - Comparação dos métodos de aquecimento da ferramenta de forjamento

* O gradiente foi determinado entre a superfície e o centro da matriz.

**As medições de temperatura foram feitas três minutos depois de tirar o aquecedor da superfície da ferramenta.

ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES

A análise dos resultados experimentais mostrados na tabela 1 revelou algumas particularidades do processo de aquecimento da ferramenta que não são descritas nas referências de forma direta:

- A temperatura da superfície da matriz em aquecimento por chama do gás GLP⁶ é muito menor que aos dos pontos críticos de temperatura do aço ferramenta, ou seja, o aquecimento por gás GLP não faz ameaça de perda de propriedades mecânicas da superfície da ferramenta;
- O aquecimento da ferramenta por aquecedores passivos é muito mais potente do que o por gás, e gera no material da ferramenta os gradientes de temperatura maiores. Mesmo assim a temperatura da superfície da ferramenta não pode ultrapassar a temperatura inicial do aquecedor; e
- O processo de aquecimento da ferramenta por gás e também por aquecedores passivos requer um tempo relativamente grande. Portanto o aquecimento pode ser facilmente controlado.

A visualização do processo de aquecimento da ferramenta de forjamento fornece ao engenheiro uma variedade de detalhes na transferência de calor do aquecedor para a ferramenta. Isso facilita o entendimento do processo e a escolha adequada do método de aque-

⁶GLP: Gás Liquefeito de Petróleo.

cimento da ferramenta. As consequências práticas do método de visualização mais evidentes são:

- Não há necessidade de utilização, para o pré-aquecimento da ferramenta, de aquecedores especiais com a temperatura de gás pré-determinada, relativamente baixa e fixa; e
- Há possibilidade de monitoramento direto da temperatura da ferramenta tanto no processo de pré-aquecimento como no processo de forjamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASM International. *Cold and Hot Forgings: Fundamentals and Applications*. ASM International: Materials Park, Ohio, USA, 2004. 333p.
- [2] Dahl, C.; Vasquez, V.; Altan, T.; *Final Report on the Effect of Process Parameters on Die Failure and Die Life in Precision Forging*. ERC for Net Shape Manufacturing, Report No. 99-R-14. The Ohio State University, 1998.
- [3] American Society for the Testing of Materials; *Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement*. STP 470B. Philadelphia: ASTM, 1981. 252 p.
- [4] Polozine, A.; Schaeffer, L.; *Testing of Thermocouples in The High Gradient Temperature Field*. Scientific Bulletins of Rzeszow University of Technology (Mechanics73), Rzeszow, jun.2008. Rzeszow University of Technology, n. 253, p.239-244.
- [5] Chang, C. C.; Bramley, A. N.; *Determination of the heat transfer coefficient at the work piece-interface for the forging process*. Part. B-Journal of Engineering Manufacture, Westminster, 2002, Professional Engineering Publishing Ltd, v.216, n.8, p.1179-1186.
- [6] Kellow, M. A.; Bramley, A. N.; Bannister, F. K.; *The measurement of temperatures in forging dies*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, [Atlanta GA], 1969, Elsevier, v. 9, p. 239-260.
- [7] Polozine, A.; *Desenvolvimento da técnica analítica para determinar a resistência térmica de contato "material forjado - ferramenta" para o processo de forjamento*. Porto Alegre-RS, 2009. 180f. Tese de Doutorado em Engenharia - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/15577/stats>>.
- [8] Polozine, A.; Schaeffer, L.; Lima, D. R. S.; *New research tool for the study of thermal contact resistance of the blank - die interface*. Journal of Metal Working. St. Petersburg, jul. 2010, Polytechnics, n. 3 (57), p.20-25 (em russo).

Alexandre Polozine - Engenheiro em Tecnologia Geral da Construção de Máquinas pelo Instituto Politécnico de Kiev (KPI), Ucrânia; Mestre em Engenharia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e Doutor em Engenharia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Pós-Doutorando em Engenharia e pesquisador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) do Centro de Tecnologia, da Escola de Engenharia da UFRGS, atuando no Grupo de Estudos em Forjamento, Simulação e Ensaios.

Lírio Schaeffer - Engenheiro Mecânico e Mestre em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e Doutor na área de Conformação Mecânica pela Universidade Técnica de Aachen na Alemanha (Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule - RWTH). Coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) do Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS. Pesquisador na área de Mecânica, Metalurgia e Materiais do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), professor das disciplinas relacionadas aos processos de fabricação por conformação mecânica e vinculado ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Minas e Energia (PPGEM) da UFRGS. Consultor *ad-hoc* da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul, na Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Autor de vários livros sobre conformação mecânica.

Diego Rodolfo Simões de Lima - Engenheiro de Materiais pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e Mestre em Engenharia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Doutorando em Engenharia e pesquisador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) do Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, atuando no Grupo de Estudos em Forjamento, Simulação e Ensaios.