

METHODS TO DETERMINATION OF THERMAL PARAMETERS TO BULK-FORMING PROCESSES SIMULATION

Alexandre Polozine²
Alberto Moreira Guerreiro Brito³
Lirio Schaeffer⁴

ABSTRACT

The necessary thermal parameters for numerical simulation of forging processes can be classified in two groups: materials properties and process parameters. The materials properties are density, specific heat and the thermal conductivity. Process parameters are the heat transfer coefficients between the forged part and the tools, between forged part and the environment and between the tools and the environment. The parameters that command these thermal exchanges are:

- (1) The emissivity heat transfer coefficient that defines, in the high temperature region, the main losses of heat from the warm part to the environment during the transport of it to the forging equipment;
- (2) The convection heat transfer coefficient "h" that also influences the losses of warm part during the transport since the furnace until the press;
- (3) The conduction heat transfer coefficient "k" that defines the main losses of heat from the part to the tools during the forging.

In this work are presented two methods for determination of the emissivity coefficient and of convection heat transfer coefficient for the aluminum alloy ABNT 6061 and for steel SAE 1045.

KEY WORDS: Forging, Bulk-forming, Thermal Parameters, Simulation,

¹ Work to XXIII SENAFOR – VII International Forging Conference, Porto Alegre/RS, October 2003.

² Mechanical Engineer, Researcher Metalworking Laboratory/UFRGS.

³ Metallurgical Engineer, Master in Engineering, Researcher Metalworking Laboratory/UFRGS.

⁴ Head of Metalworking Laboratory/UFRGS.

A energia despreendida para deformar plasticamente metais em processos de conformação mecânica é convertida quase inteiramente em calor. Parte dessa energia aumenta a temperatura do componente sendo forjado e das ferramentas e parte é dissipada para o meio ambiente. O aumento de temperatura no componente tem efeito na tensão de escoamento do material e conseqüentemente na força e no trabalho de conformação. A precisão dimensional do forjado, por outro lado também será afetada, tanto pelo aquecimento do mesmo quanto pelo das ferramentas. Em função desses e outros aspectos, a quantificação dos fenômenos envolvendo a transferência de calor entre forjado e ferramentas, entre forjado e ambiente e entre ferramentas e ambiente tem assumido cada vez maior significado.

Por outro lado, o uso cada vez maior de sistemas de simulação por elementos finitos nos últimos anos tem exigido a determinação cada vez mais precisa de dados, tanto de materiais quanto de processos. Entre os dados de materiais pode-se citar, além da tensão de escoamento, o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson, a densidade, o calor específico, a condutibilidade térmica e o coeficiente de dilatação térmica. Entre os dados de processo ou condições de contorno, tem-se os coeficientes de troca de calor (forjado/matriz, forjado/ambiente e matriz/ambiente) e o atrito.

Todas essas propriedades influenciam e são influenciadas pela distribuição de temperaturas no sistema. A figura 1 resume os parâmetros de materiais e de processo exigidos para simulação [1].

Este trabalho trata da determinação dos coeficientes de troca de calor. Esta pode ocorrer, entre o forjado e o meio através de convecção e através de irradiação e entre o forjado e a matriz através de condução. A troca por convecção é descrita pela Lei de Newton, o que implica na determinação do coeficiente de convecção. Já a troca por irradiação pode ser expressa pela equação de Stefan-Boltzman e implica na determinação do coeficiente de emissividade [2]. A troca de calor entre o forjado e a matriz é a mais importante no processo de forjamento e também a mais difícil de ser determinada, pois implica na determinação de um coeficiente de condução [3]. A dificuldade reside no fato de que esse coeficiente não é uma propriedade do material como a condutibilidade térmica, mas depende das características da interface forjado/matriz (materiais, acabamento superficial, lubrificante, pressão interfacial, contaminantes – óxidos e bolhas de ar, etc). Por depender de tantos fatores o coeficiente de condução varia significativamente com as condições do processo. A tabela 1 mostra valores do coeficiente de condução (k) para diferentes condições, obtidos por diferentes pesquisadores [3 – 9].

Tendo em vista a dificuldade para determinação do coeficiente de condução, é necessário, em uma primeira etapa, determinar os coeficientes de convecção e de irradiação. Uma vez conhecidas a perda total de calor do corpo e as perdas por convecção e irradiação, a perda por transferência para a matriz pode ser determinada. Neste trabalho é apresentado um método para a determinação dos valores da emissividade e do coeficiente de transferência de calor por convecção dos corpos de prova de aço SAE 1045 e da liga do alumínio ABNT 6061. O desenvolvimento de um método para determinação do coeficiente de condução fica aqui como sugestão para futuros trabalhos.

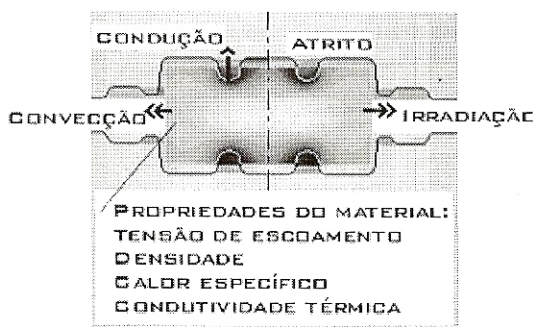


Figura 1: Parâmetros de materiais e de processo exigidos para simulação [1].

1. MODELO MATEMÁTICO DE RESFRIAMENTO DO CORPO DE PROVA NOS PROCESSOS COMBINADOS DE RADIAÇÃO, CONVECÇÃO E CONDUÇÃO.

O modelo matemático é baseado na Lei da Conservação de Energia do sistema termodinâmico do processo de resfriamento do corpo de prova. A variação, por unidade de tempo, da energia térmica do corpo de prova é igual à soma das energias perdidas, por unidade de tempo, nos processos de resfriamento do corpo por condução, irradiação e convecção:

$$Q = q_{\text{cond}} + q_{\text{rad}} + q_{\text{conv}}$$

onde:

q_{cond} é energia térmica perdida pelo corpo por unidade de tempo, no processo de condução, e pode ser expressa pela Lei de Fourier [1] na forma:

$$q_{\text{cond}} = -k \cdot A_k \cdot \frac{dT_k}{dx}$$

q_{rad} é energia térmica perdida pelo corpo de prova, por unidade de tempo, no processo de irradiação, e pode ser expressa pela equação de Stefan-Boltzman [2] na forma:

$$q_{\text{rad}} = \sigma \cdot A_{\text{rad}} \cdot \varepsilon(T) \cdot (T^4 - T_{\infty}^4)$$

q_{conv} é energia térmica perdida pelo corpo de prova, por unidade de tempo, no processo de convecção, e pode ser expressa pela Lei de Newton [1] na forma final de:

$$q_{\text{conv}} = h \cdot A_{\text{conv}} \cdot (\Delta T)$$

Considerando as equações (1), (2), (3) e (4), é possível reescrever a expressão (1) como a expressão (5), abaixo:

$$\begin{aligned} m \cdot C_p \cdot \frac{dT_m}{dt} &= \\ &= -k \cdot A_{\text{cond}} \cdot \frac{dT_k}{dx} + \sigma \cdot A_{\text{rad}} \cdot \varepsilon(T) \cdot (T^4 - T_{\infty}^4) + h(T, D, V) \cdot A_{\text{conv}} \cdot (T - T_{\infty}) \end{aligned}$$

onde:

k	– condutividade térmica do material do corpo através do qual o calor flui por condução;
A_{cond}	– área de transferência de calor por condução;
$\frac{dT_k}{dx}$	– gradiente de temperatura T_k na direção x do fluxo de calor;
σ	– constante de Stefan-Boltzman;
A_{rad}	– área da superfície irradiante;
$\epsilon(T)$	– coeficiente de emissividade da superfície irradiante, definido no intervalo $0 < \epsilon(T) < 1$;
T	– temperatura absoluta da superfície do corpo irradiante, em K;
T_g	– temperatura absoluta da superfície do invólucro (ar), em K.
h	– coeficiente de transmissão de calor por convecção, função da temperatura T da superfície A_{conv} , da geometria D do sistema resfriado e da velocidade V do fluido, ou seja: $h=h(T, D, V) > 0$, [10];
A_{conv}	– área de transmissão de calor por convecção;
ΔT	– diferença das temperaturas entre a superfície resfriada (T) e o ar (T_g);
m	– massa do corpo;
C_p	– calor específico do material do corpo de prova;
T_m	– temperatura média do corpo de prova;
$\frac{dT_k}{dx}$	– velocidade de resfriamento do corpo de prova.

Tabela 1: Valores do coeficiente de condução (k) para diferentes condições, obtidos por diferentes pesquisadores [3 – 9]

Processo	Descrição: compressão de anel sem lubrificante Peça: AA 2024; 420° C - Matriz: AISI H13; 50°C									
Pressão (Mpa)	0		0,85		15		95		150	
k (kW/m².K)	0,75		1,8		7,5		8,5		9,0	
Processo	Descrição: compressão de anel sem lubrificante Peça: AA 2024; 420° C - Matriz: AISI H13; 50°C									
Pressão (Mpa)	0		0,85		15		95		150	
k (kW/m².K)	0,9		2,5		7,0		7,5		7,5	
Processo	Descrição: compressão de anel com lubrificante Peça: AA 2024; 420° C - Matriz: AISI H13; 50°C									
Pressão (Mpa)	0		0,85		15		95		150	
k (kW/m².K)	1,5		6,0		15		19,5		18	
Processo	Descrição: compressão de anel sem lubrificante Peça: AA 2024; 420° C - Matriz: AISI H13; 50°C									
Pressão (Mpa)	0		0,85		15		95		150	
k (kW/m².K)	1,5		11		-		16		12,5	
Fonte:	Burte et al. [4]									
Processo	Descrição: compressão de anel Peça: aço N1019; 200°C - Matriz: aço Ma8; 20°C									
Pressão (Mpa)	0		30		120		180		300	
k (kW/m².K)	5		18,3		58,8		87,0		222	
Fonte:	Rosochowska et al. [5]									
Processo	Descrição: compressão de anel - Peça: AA 2024 Matriz: aço IN100 - Lubrificante: Renite S52 Velocidade de compressão: 1mm/s									
k(kW/m².K)	7,5									
Processo	Descrição: compressão de anel - Peça: AA 2024 Matriz: aço In100 Lubrificante: Renite S52 Velocidade de compressão: 56mm/s									
k(kW/m².K)	17									
Fonte	Semiatin et al. [6]									
Processo	Descrição: compressão de anel - Peça: Liga de alumínio Matriz: AISI H12 Lubrificante: MoS2 Pressão de contato: 6,9 Mpa									
k(kW/m².K)	10									
Fonte:	Descrição: compressão de anel - Peça: Liga de alumínio									
Processo	Matriz: AISI H12 Lubrificante: MoS2 Pressão de contato: 110 Mpa									
k(kW/m².K)	40									
Fonte	Janin [7]									
Processo	Forjamento a frio de alumínio sem lubrificante									
k(kW/m².K)	50-120									
Processo	Forjamento a frio de alumínio com lubrificante									
k(kW/m².K)	80-220									
Processo	Forjamento de alumínio com lubrificante Temperatura da peça: 200°C - Temperatura da matriz: ambiente									
k(kW/m².K)	15-30									
Fonte	Jewiet et al. [8]									
Processo	Descrição: compressão de cilindro - Diâmetro inicial: 25mm; Altura inicial: 37,5mm - Velocidade de compressão: 17mm/s Material: BS08M40; Temperatura inicial: 910°C Matriz: AISI H13; Temperatura inicial: 250°C									
[LN (h1/h0)]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
k(kW/m².K)	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39
Fonte:	Chang & Bramley [9]									

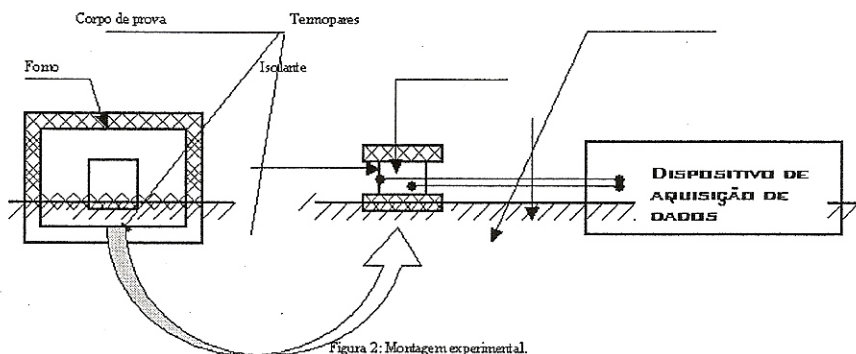
1. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A figura 2 mostra a montagem experimental desenvolvida para a determinação dos coeficientes de troca de calor por convecção e de emissividade. O experimento consiste basicamente na colocação de um corpo de prova, junto com dois termopares tipo "K" para medir as temperaturas em seu centro e em sua superfície, ligados a um dispositivo de aquisição de dados, em um forno aquecido a 570°C. O corpo de prova foi deixado no forno por duas horas sendo a temperatura, após esse período, de $(560 \pm 15)^{\circ}\text{C}$.

Ao fim do período de aquecimento o corpo de prova foi colocado entre duas placas de material isolante. As placas foram previamente aquecidas de modo a simular uma condição de resistência térmica infinita nas extremidades do corpo de prova. Uma vez entre as placas isolantes, o corpo de prova foi deixado resfriar por convecção natural, irradiação até 190°C no período de 0,5 hora (1800 segundos). Nesse processo de resfriamento o fenômeno da condução (para o ar na superfície) pode ser desprezado.

Durante o resfriamento as temperaturas lidas pelos termopares no centro e na superfície do corpo de prova foram registradas em função do tempo em um dispositivo de aquisição de dados marca Hottinger Baldwin Messtechnik, modelo Spider 8, cujas características podem ser encontradas em [11].

A figura 3 mostra o desenho dos corpos de prova utilizados. Foram realizados ensaios com o aço SAE 1045 e com a liga de alumínio ABNT 6061.



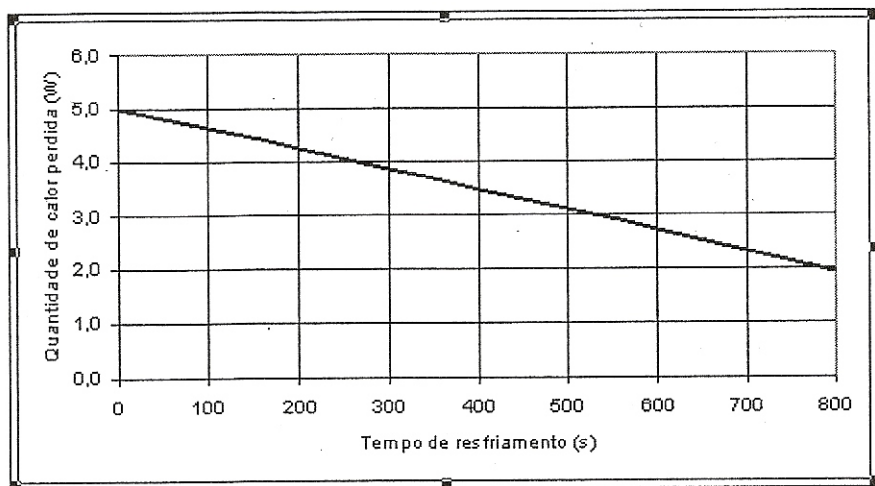


Figura 3: Corpos de prova utilizados

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. AVALIAÇÃO DO FLUXO DE CALOR ATRAVÉS DAS PLACAS DE MATERIAL ISOLANTE.

Para avaliar o fluxo de calor através das placas isolantes é preciso comparar o fluxo total de calor perdido pelo corpo de prova no experimento descrito acima com o fluxo total de calor perdido pelo mesmo corpo de prova em um experimento adicional descrito por Polozine & Schaeffer [12]. Comparando-se os resultados dos dois experimentos obtém-se, para a liga ABNT 6061:

$$q_{\text{cond}} = -(2 \times 10^{-9}) t^3 - (9 \times 10^{-7}) t^2 - (3,8 \times 10^{-3}) t + 4,995 \quad (6)$$

onde q_{cond} é a quantidade de calor perdida, em Watts, através das placas de isolante no experimento descrito no item 3; e t o tempo de resfriamento do corpo de prova em segundos. A mesma comparação de resultados permite estabelecer que essa quantidade de calor perdida por condução através das placas varia entre 9 e 10% da perda total de calor sofrida pelo corpo de prova. A incerteza nesses resultados foi calculada conforme descrito em [13] e estimada em $\pm 0,0001\%$.

A figura 4 mostra, graficamente, o resultado da expressão (6) para o intervalo de temperaturas entre 300 e 500°C.

IAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO DE CALOR POR MEIO DE CONVECÇÃO.

iente de transmissão de calor por meio de convecção, h , foi calculado através da empírica abaixo, compilada de diferentes literaturas fórmula aproximada da literatura

$$h = 3 \cdot \left(\frac{T_{\text{sup}} - T_{\text{amb}}}{^{\circ}\text{C}} \right)^{0,25} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right]$$

é a temperatura da superfície do corpo de prova e T_{amb} é a temperatura do meio ambiente. o-se a expressão (7) os valores adequados, obtém-se o valor médio do coeficiente h , para lo das temperaturas entre 300 e 500°C, como sendo:

$$h \approx 13,1 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right]$$

or apresenta uma boa correlação com valores obtidos de literatura [valor de h obtido nde aos dados da literatura [16]:

$$h \approx 10 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right]$$

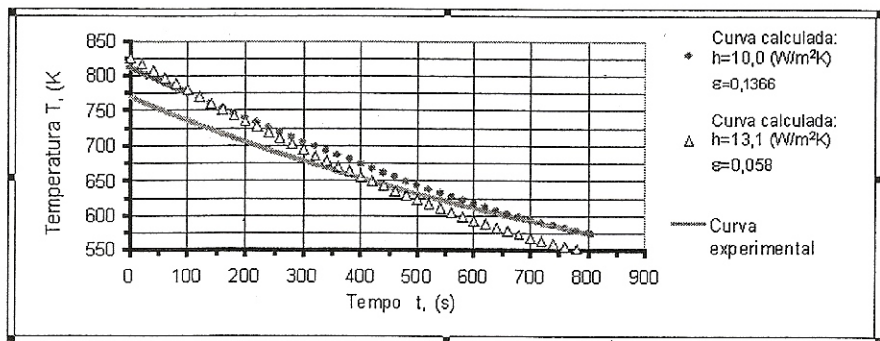
CULO DO COEFICIENTE DE EMISSIVIDADE DA LIGA ABNT 6061

Os cálculos de valor do coeficiente de emissividade foram realizados pela (5). Substituindo nessa equação as propriedades do material, o valor calculado do coeficiente cção) e a velocidade de resfriamento medida nos experimentos, obtém-se para o coeficiente ividade os valores mostrados na tabela 2. Essa tabela também mostra o valor calculado de res compilados de literatura [2, 13, 16].

Tabela 2. Resultados dos cálculos dos coeficientes ε e h .

Determinação do parâmetro	Símbolo	Unidade	Valores calculados		Dados de literatura	
Coeficiente de transferência de calor por convecção	h	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$	$\approx 10^*$	$\approx 13,1$	≈ 10 Fonte: [16]	-
Coeficiente médio de emissividade	$\varepsilon_{\text{média}}$	-	0,1366	0,038	(0,11-0,19) (200-600)°C, Al oxidado. Fonte: [2]	0,04 300K, Al polido Fonte: [13]
Coeficiente máximo de emissividade	$\varepsilon_{\text{máx}}$	-	0,19	0,12	-	-
Coeficiente mínimo de emissividade	$\varepsilon_{\text{mín}}$	-	0,05	-0,01	-	-
Desvio Padrão da curva calculada à curva experimental	d	K	19,5	23,3	-	-

A figura 5 mostra a curva de resfriamento experimental obtida, a curva ajustada para o valor calculado $h=13,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ que permite a determinação do valor $\epsilon=0,058$ e a curva ajustada a partir do valor $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$, retirado de literatura [16], que leva a determinação de um valor $\epsilon=0,1366$.



4.4. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS TÉRMICOS DO AÇO SAE 1045.

Experimentos com o aço SAE 1045 foram realizados através de procedimento semelhante ao utilizado nos experimentos com a liga ABNT 6061. Os cálculos para determinação de h e ϵ foram, entretanto, executados por outro método. A essência desse método é descrita abaixo:

• Pares de valores dos coeficientes de emissividade e de transferência de calor por convecção são arbitrados e utilizados na equação (5) para a obtenção de curvas de resfriamento calculadas.

• As curvas de resfriamento calculadas são comparadas com a curva experimental de resfriamento obtida para o material de forma semelhante àquelas obtidas para a liga ABNT 6061.

• O par (ϵ, h) considerado correto é aquele que resulta na curva calculada que apresenta o menor desvio padrão em relação a curva experimental.

Os resultados obtidos pelo o método descrito acima são representados na tabela 2. A tabela mostra os pares (ϵ, h) utilizados para obtenção das curvas de resfriamento calculadas e os desvios das mesmas em relação a curva experimental. O par considerado correto é apresentado em destaque e resulta da aplicação de dois critérios: (1) não existem, no intervalo de temperaturas considerado (697 a 932°C) valores negativos do coeficiente de troca de calor por convecção e, (2) o desvio padrão médio entre as curvas calculada e experimental é mínimo.

Tabela 3. Valores calculados da emissividade ϵ , do coeficiente h e desvio padrão d .

Emissividade	ϵ	1,00	0,87	0,80	0,796	0,793	0,788	0,70	0,60
Coeficiente médio de transferência de calor por convecção	$h \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right)$	-14	-1,57	5,35	5,74	6	6,5	15	24,7
Desvio padrão Médio entre as Curvas calculada e experimental	$d(\text{K})$	5,25	6,16	8,96	8,90	9,06	9,32	14,06	21,6

A tabela 3 mostra uma comparação entre os valores de emissividade e coeficiente de convecção considerados como corretos na tabela 2 e valores de literatura [15].

Tabela 4: Comparação entre valores determinados neste trabalho e dados de literatura.			
Parâmetro	Valores da tabela 12	Valores de literatura [13]	Erro médio (%)
Emissividade	0,796	0,79-0,82	1,13
Coefficiente de convecção (W/m^2K)	5,74	5,86-6,34	6,27

As figuras 6, 7 e 8 mostram, graficamente os resultados das tabelas 3 e 4. Na figura 6 é mostrada a curva experimental e a curva calculada ótima do resfriamento do corpo de prova de aço SAE 1045. A curva calculada tem os desvios seguintes da curva experimental:

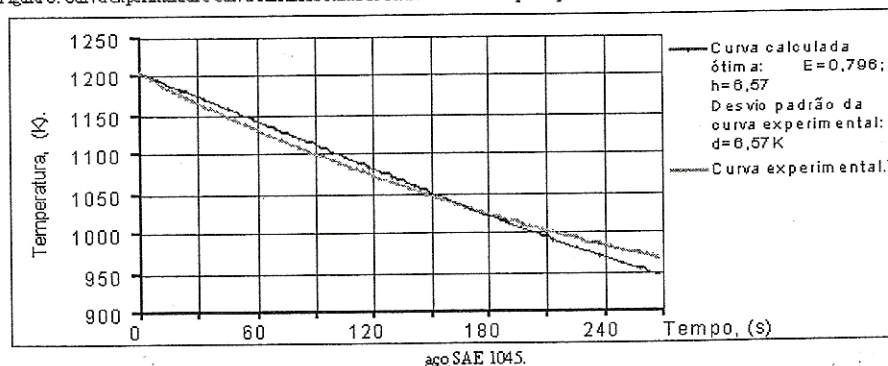
- máximo = + 22,0 K;
- mínimo = + 0,23 K;
- médio = 8,9 K.

A Figura 7 mostra o conjunto de curvas calculadas (sem um ponto comum da temperatura inicial) de resfriamento do corpo de prova de aço SAE 1045. Na figura 8 é mostrado o mesmo conjunto de curvas normalizadas pelo ponto comum da temperatura inicial de resfriamento.

5. CONCLUSÕES

Foram realizados testes de resfriamento de corpos de prova da liga de alumínio ABNT 6061 (na faixa de 400°C) e do aço SAE 1045 (na faixa de 900°C). Os ensaios foram realizados como o objetivo de determinar os coeficientes de troca de calor por convecção (h) e por irradiação (e - emissividade) dos dois materiais. Tais coeficientes estão entre os dados normalmente exigidos por programas de simulação numérica de processos de conformação mecânica. Para determinação dos valores de h e e foram utilizados dois métodos de cálculos de curvas de resfriamento. A comparação das curvas calculadas com as curvas experimentais fornece os valores procurados. O primeiro método de cálculo, descrito nos itens 4.1 a 4.3, mostrou-se adequado para a determinação dos valores de h e e na faixa de forjamento das ligas de alumínio, mas não em temperaturas mais elevadas. Para essas faixas mais elevadas foi necessário utilizar o método descrito no item 4.4, que forneceu, então, valores aceitáveis. Esse método também fornece valores adequados em temperaturas mais baixas. Entretanto, é muito mais trabalhoso que o método simplificado utilizado para a liga ABNT 6061. Em vista desse fato a continuação do presente trabalho passará pelo desenvolvimento de um programa computacional para aplicação do método.

Figura 6: Curva experimental e curva calculada ótima do resfriamento do corpo de prova de



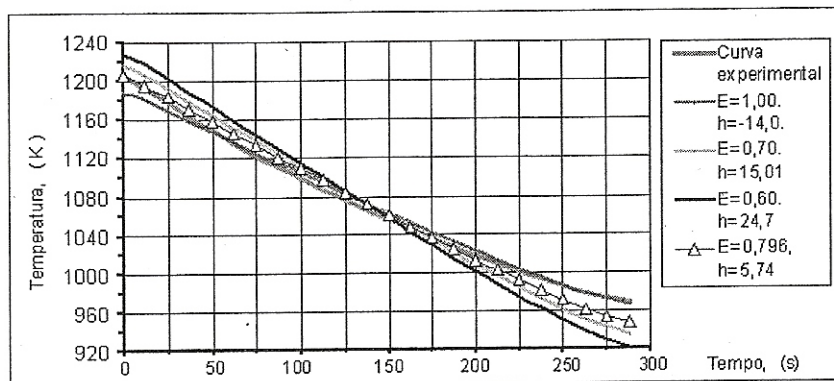


Figura 7: Conjunto das curvas calculadas (sem um ponto comum da temperatura inicial) de resfriamento do corpo de prova de aço SAE 1045.

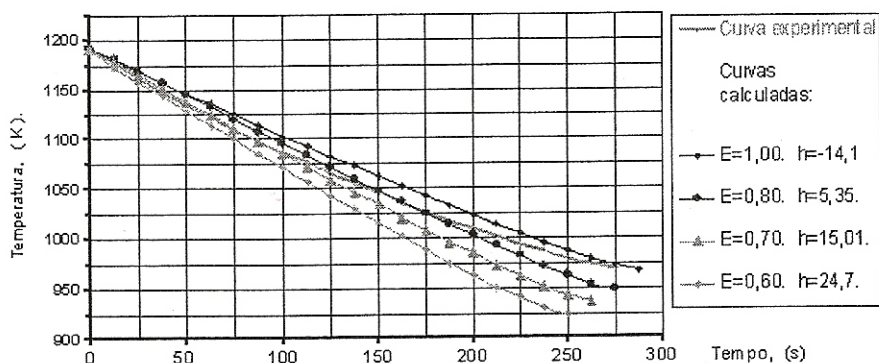


Figura 8: Conjunto das curvas calculadas, normalizadas pelo ponto comum da temperatura inicial de resfriamento do corpo de prova de aço SAE 1045.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Bureau Internacional do DLR (Ministério de Ciência e Tecnologia (BMBF) Alemanha pelo Projeto de Cooperação Internacional.

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) pelo apoio financeiro, aos engenheiros Sergio E. S. Netto, e Clovis Picoral e aos acadêmicos João Maurício de Andrade Silva e Martin Geier pela colaboração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1- BRITO, A. M. G.: **A Importância das Propriedades dos Materiais**. In: Simulação Computacional Aplicada ao Processo de Forjamento, mini-curso, São Paulo, 23 de maio de 2003; Porto Alegre, 08 de agosto de 2003.
- 2- HOTTEL, H. C.; SAROFIM A. F.: **Radative Transfer**. New York: McGraw-Hill, 1967. p. 19-159.
- 3- BRITO, A. M. G.: **Condições de Contorno**. In: Simulação Computacional Aplicada ao Processo de Forjamento, mini-curso, São Paulo, 23 de maio de 2003; Porto Alegre, 08 de agosto de 2003.

- 4- SEMIATIM, S.L.; COLLINGS, E.W.; WOOD, V.E.; ALTAN, T.: **Determination of the Interface Heat Transfer Coefficient for Non-isothermal Bulk Forming Processes.** Journal of Engineering for Industry, Vol. 109, January, 1987. p. 49-57.
- 5- JAIN, V. K.: **Determination of Heat Transfer Coefficient for Forging Applications.** Journal of Materials Shaping Technology, Vol. 8, nº 3, 1990. p. 193-202.
- 6- JERVIET, J.; NSHAMA, W.; OASTHUIZEN, P.H.: **Evaluation of Temperature and Heat Transfer Conditions in Metal Forming.** Proceedings of the 11th International Heat Transfer Conference, Kyongju, Korea, 1998.
- 7- CHANG, C. C.; BRAMLEY, A. N. **Determination of the heat transfer coefficient at the workpiece-die interface for the forging process.** Journal of Engineering Manufacture, Vol. 216, parte B, 2002. p. 1179-1186.
- 8- KREITH, F. **Princípios da Transmissão de Calor.** 2.ed. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 1977. p. 57.
- 9- HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK GMBH: **Product Catalog 2002.**
- 10- POLOZINE, A.; SCHAEFFER, L.: **Avaliação de perdas de calor de peça aquecida através de dispositivo de suporte de material com as propriedades físicas desconhecidas.** Relatório Interno, UFRGS/LdTM, Porto Alegre, 2003.
- 11- INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P.: **Fundamentals of Heat and Mass Transfer.** New York: John Wiley & Sons Inc, 1996. p. 815.
- 12- KOPP, R.; PHILLIP, F.D.: **Physical parameters and boundary conditions for the numerical simulation of hot forming processes.** Steel research 63, nº 9, 1992.
- 13- KAZANTSEV, E.I.: **Industrial Furnaces.** Mir Publishers, Moscow, 1977.
- 14- KOPP, R.; WIEGELS, H.: **Einführung in die Umformtechnik.** Verlag Mainz, Aachen, 1999.