

Materiais

Estudo descreve a obtenção da curva de escoamento do alumínio por ensaios de compressão

O levantamento das curvas de escoamento dos materiais é extremamente importante para que se possa avaliar quais as forças necessárias para conformar mecanicamente uma peça. Este trabalho descreve a metodologia utilizada por pesquisadores da Universidade Federal do Rio Grande do Sul para a obtenção de curvas de escoamento a frio da liga de alumínio AA6011, equacionando matematicamente esta propriedade do material.

P. Knoll, D. Lima, L. Schaeffer

A tensão de escoamento (k_f) é um dos parâmetros fundamentais para os processos de conformação mecânica. O conhecimento desse parâmetro é imprescindível para quantificar a força, o trabalho, o preenchimento da matriz, o desgaste e as tensões nas ferramentas, entre outras características do processo. As curvas de escoamento são construídas a partir de ensaios mecânicos de compressão, tração ou torção. Para o processo de forjamento utiliza-se o

ensaio de compressão para obtenção deste parâmetro por melhor representar as condições reais de processo. Estes ensaios são realizados a quente ou a frio, com velocidades de deformação constantes ou variáveis, dependendo das características de aplicação do material ensaiado⁽¹⁾.

Em um processo de deformação a quente, a velocidade de deformação tem uma grande influência na tensão de escoamento do material. Por este motivo, é de extrema importância o conhecimento do comportamento do material a determinada temperatura e velocidade de deformação. Bruschi *et al.*⁽²⁾ determinaram as curvas de

escoamento para a liga Ti-6Al-4V para altas temperaturas e velocidades de deformação. Para isto, utilizaram uma máquina de ensaio de compressão computadorizada que mantém a velocidade de deformação constante durante o ensaio e realizaram ensaios de compressão para diversas temperaturas e velocidades de deformação. Após a obtenção dos dados foi possível descrever uma equação matemática para prever o comportamento plástico do material nas condições de ensaio.

Seshacharyulu *et al.*⁽³⁾ estudaram as curvas de escoamento da liga Ti-6Al-4V em ensaios de compressão a quente nos campos $\alpha+\beta$ e β , ava-

Pedro Knoll (contato por e-mail: pedro.knoll@ufrgs.br) e Diego Lima são mestrands em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), em Porto Alegre. Lirio Schaeffer é professor titular do Departamento de Metalurgia da mesma instituição. Reprodução autorizada pelos autores.

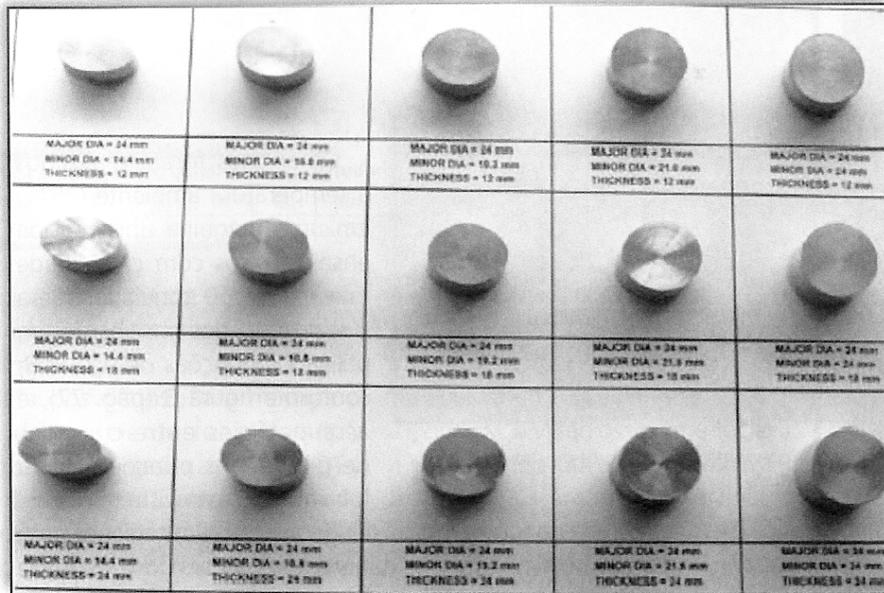


Fig. 1 – Fotografia dos corpos-de-prova não deformados de alumínio e suas diferentes secções transversais⁽⁵⁾

liando as diferenças encontradas nas tensões de escoamento nos dois ensaios. Para os ensaios no campo $\alpha+\beta$, uma contínua diminuição da tensão de escoamento pode ser observada após o aparecimento de um pico inicial. Para os ensaios no campo β , as curvas de escoamento apresentaram um valor de tensão de escoamento praticamente constante para baixas velocidades de deformação, o

que indica um comportamento de escoamento estável.

Kopac *et al.*⁽⁴⁾ obtiveram a curva de escoamento do aço SAE 1015 por testes de compressão, para determinada velocidade de deformação ($\dot{\varphi}$) e temperatura, e por resultados obtidos em uma máquina de corte ortogonal. Nestes ensaios foi possível observar que a curva de escoamento obtida via ensaio de compressão apresentou uma tendência pareci-

da com as curvas obtidas na máquina ortogonal, sendo possível construir uma equação matemática para obter a força necessária para o corte no sentido ortogonal ao material, a partir de resultados obtidos no próprio ensaio.

Baskaran *et al.*⁽⁵⁾ estudaram a diferença da geometria dos corpos-de-prova na obtenção de curvas de escoamento para o alumínio comercialmente puro. Para isto foram usinados corpos-de-prova de seção elíptica com cinco diferentes relações entre o maior e o menor diâmetro e corpos-de-prova cilíndricos com três diferentes relações diâmetro/altura, conforme pode ser observado na figura 1. Os corpos-de-prova foram submetidos a ensaios de compressão à temperatura ambiente.

Manisekar *et al.*⁽⁶⁾ pesquisaram a influência de diferentes tipos de lubrificante no barrilamento de corpos-de-prova quadrados de alumínio ensaiados por compres-

Materiais

são em temperatura ambiente. Neste estudo foram confeccionados corpos-de-prova com diferentes relações lado/altura e ensaiados sob compressão com diferentes tipos de lubrificante, sendo possível avaliar a influência do atrito na conformação dos corpos-de-prova.

O objetivo deste trabalho é descrever os passos para a obtenção da curva de escoamento da liga de alumínio AA6011 por ensaio de compressão à temperatura ambiente.

Materiais e métodos

Neste trabalho foram utilizados corpos-de-prova da liga AA6011, cuja composição química foi obtida por ensaio de espectrometria

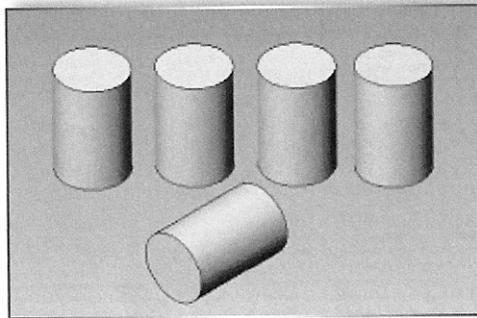


Fig.2 – Representação dos corpos-de-prova utilizados para o estudo

óptica e está mostrada na tabela 1 (pág. 77). Ela tem como elementos de liga básicos silício e magnésio, com adições de cobre, zinco e manganês.

Para obtenção da curva de escoamento do material, foram realizados ensaios de compressão com cinco corpos-de-prova de 11 mm de diâmetro e 17 mm de altura, como ilustrado na figura 2.

Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente (25°C) em uma máquina universal de ensaio Kratos com capacidade máxima de 10 toneladas. Para a realização dos ensaios, foram utilizados punções de aço H13, conforme figura 3 (pág. 77), e as superfícies entre o corpo-de-prova e os punções foram lubrificadas com um filme de PTFE (politetrafluoretileno) para minimizar os efeitos do atrito entre os punções e o corpo-de-prova, uniformizando a deformação do mesmo.

A velocidade de deslocamento da prensa foi de 0,4 mm/s e a força foi obtida por meio de uma célula de carga conectada a um equipamento de aquisição de dados Spider 8, da empresa HBM. Este

Tab. 1 – Composição química da liga estudada

Elementos	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Outros	Al
% em peso	0,93	0,19	0,77	0,53	0,88	0,17	0,01	0,02	0,008	96,49

equipamento estava ligado a um computador *laptop* e o *software* Catman Express foi utilizado na coleta dos dados. Para medição do deslocamento foi instalado um sensor de deslocamento LVDT (*Linear Voltage Displacement Transducer*) na placa da máquina de ensaio. Este sensor foi conectado ao mesmo equipamento utilizado na aquisição da força de prensagem.

Cada corpo-de-prova sofreu uma deformação de 60% de sua altura. Com os dados adquiridos, foi realizado um tratamento para construção das curvas de escoamento.

Com os dados de força e deslocamento, é possível calcular a altura do corpo-de-prova em cada instante de medição pela equação 1.

$$h_i = h_0 - \Delta h \quad (1)$$

Onde, h_i e h_0 são, respectivamente, as alturas instantânea e inicial do corpo-de-prova e Δh é o deslocamento da máquina de ensaios.

Após o cálculo de h_i é possível calcular a área do corpo-de-prova a cada instante do ensaio pela Lei da Constância de Volume (equação 2), onde V_0 e V_i são os volume inicial e instantâneo do corpo-de-prova e A_0 e A_i , as áreas inicial e final, respectivamente.

$$\begin{aligned} V_0 &= V_i \\ A_0 h_0 &= A_i h_i \\ A_i &= \frac{A_0 h_0}{h_i} \end{aligned} \quad (2)$$

Com estes resultados, é possível obter a deformação verdadeira (ϕ) e a tensão de escoamento (k_f) em cada instante de medição pelas equações 3 e 4, respectivamente.

$$\phi = \ln \frac{h_i}{h_0} \quad (3)$$

$$k_f = \frac{F}{A_i} \quad (4)$$

O gráfico $k_f \times \phi$ descreve o comportamento plástico do material nas

condições do ensaio e é conhecido como curva de escoamento do material ensaiado. Esta curva, para deformação a frio, pode ser representada matematicamente por uma equação do tipo $k_f = C \cdot \phi^n$, onde "C" é o coeficiente de resistência do material e "n", o coeficiente de encruamento. Para obtenção desta equação, foi realizada uma linearização da curva de escoamento do material, construindo um

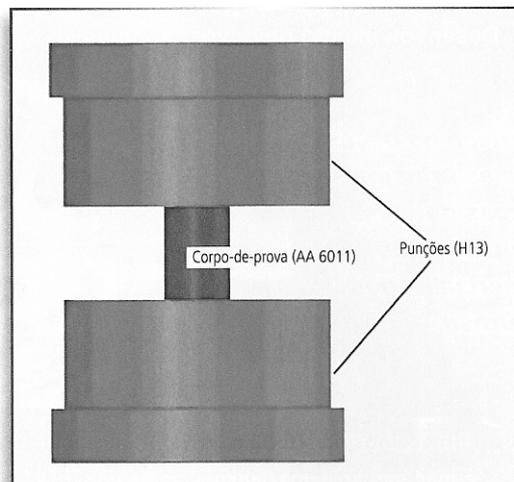


Fig. 3 – Montagem do experimento

Materiais

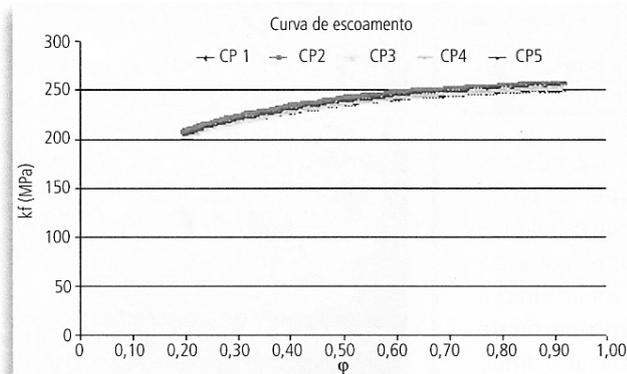


Fig. 4 – Curva de escoamento da liga AA6011

gráfico $\log k_f \times \log \phi$. O coeficiente de encruamento (n) é obtido pela inclinação da reta e o coeficiente de resistência (C) é igual ao valor de k_f para ϕ igual a 1. Para construção do gráfico $\log k_f \times \log \phi$, foram utilizados os dados apenas da região de deformação plástica do material, por ser esta a região

de interesse para os processos de conformação mecânica. O limite da região de deformação plástica foi definido como sendo $\phi = 0,2$.

Resultados e discussões

As figuras 4 e 5 mostram as curvas de escoamento e suas

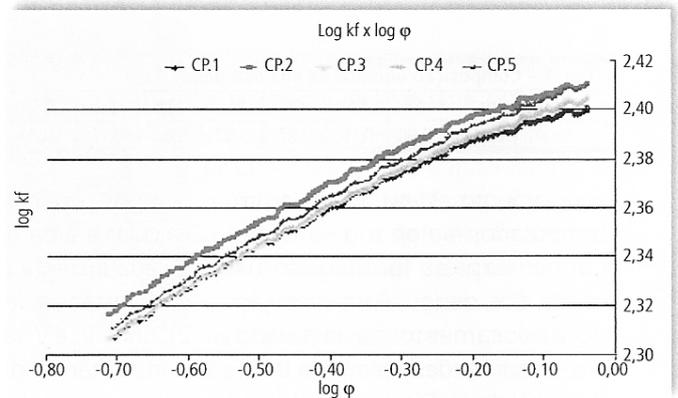


Fig. 5 – Curvas de escoamento linearizadas

respectivas linearizações obtidas nos ensaios realizados.

A partir das linearizações, obtiveram-se as equações das retas para cada corpo-de-prova e, conseqüentemente, os valores de C e n . Esses resultados estão apresentados na tabela 2 (pág. 79).

Tab. 2 – Resultados dos valores de C e n dos corpos-de-prova ensaiados

Corpo-de-prova	Equação	C (MPa)	n
1	$y = 0,139x + 2,4125$	258,5	0,139
2	$y = 0,1388x + 2,4227$	264,7	0,139
3	$y = 0,1459x + 2,4169$	261,1	0,146
4	$y = 0,1425x + 2,4153$	260,2	0,142
5	$y = 0,1471x + 2,4208$	263,5	0,147
Média		261,6	0,143

A média dos valores de C e n encontrados foi determinada como sendo os valores desses parâmetros para a liga AA6011 nas condições de ensaio citadas. Com estes valores, foi possível escrever matematicamente a curva de escoamento do material ensaiado:

$$K_f = 261,6 \cdot \varphi^{0,143} \quad (5)$$

Conclusões

O levantamento de curvas de escoamento é extremamente importante para os processos de conformação mecânica, principalmente para o processo de forjamento, no qual, a partir dessas curvas, é possível prever o comportamento do ma-

terial quando submetido a esforços compressivos. Este trabalho mostrou como é possível obter curvas de escoamento por ensaio de compressão. Os resultados encontrados mostraram que houve uma boa repetibilidade para os cinco corpos-de-prova ensaiados e que é possível descrever matematicamente o comportamento plástico do material. A obtenção de uma equação que descreve o comportamento plástico do material facilita a previsão de sua tensão de escoamento para qualquer nível de deformação.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvi-

mento Científico e Tecnológico) e à Finep (Financiadora de Estudos e Projetos) pelo apoio financeiro aos projetos de forjamento do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM/UFRGS).

Referências

- 1) SCHAEFFER, L. *Forjamento – Uma introdução ao processo*. Porto Alegre: Ed. Imprensa Livre, 1ª edição, 2001.
- 2) BRUSCHI, S.; POGGIO, S.; QUADRINI, F.; TATA, M. E. Workability of Ti-6Al-4V alloy at high temperatures and strain rates. *Materials Letters*, 58, 2004, p. 3622-3629.
- 3) SECHACHARYULU, T.; MEDEIROS, S. C.; FRAZIER, W. G.; PRASAD, Y. V. R. K. Microstructural mechanisms during hot working of commercial grade Ti-6Al-4V with lamellar starting structure. *Mat. Sci. Eng.*, A325, 2002, p. 112-125.
- 4) KOPAC, J.; KOROSIC, M.; KUZMAN, K. Determination of flow stress properties of machinable materials with help of simple compression and orthogonal machining test. *Int. J. Mach. Tools and Manuf.*, 41, 2001, p. 1275-1282.
- 5) BASKARAN, K.; NARAYANASAMY, R. An experimental investigation on work hardening behaviour of elliptical shaped billets of aluminium during cold upsetting. *Materials and Design*, 2006.
- 6) NORMA TÉCNICA ASTM E9 – Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature. EUA, 2000.