

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DA VELOCIDADE DE DESLOCAMENTO NO ENSAIO DE COMPRESSÃO DE LIGA DE ALUMÍNIO AA6004 ¹

Rodrigo Magnabosco ²
Nathalia Correia Lopes ³

Resumo

Neste trabalho a liga de alumínio AA6004 foi submetida a ensaios de compressão em diferentes temperaturas e velocidades de deslocamento, determinando-se seu comportamento mecânico. Pôde ser observado que quanto maior a temperatura de ensaio, menor a tensão necessária à uma dada deformação. Contudo, pode-se afirmar que em temperaturas acima de 300°C não existe mais a região de encruamento, o que invalida a aplicação da expressão de Hollomon. As taxas de deformação tiveram uma influência significativa nos ensaios nas temperaturas mais elevadas, obtendo-se valores de sensibilidade à taxa de deformação entre 0,05 e 0,07 a 300°C (indicando pequena influência da taxa de deformação), enquanto valores entre 0,12 e 0,18 foram obtidos a 500°C.

Palavras-chave: Ligas de alumínio; Propriedades mecânicas; Ensaio mecânicos; Ensaio de compressão.

TEMPERATURE AND DISPLACEMENT RATE DURING COMPRESSION TEST OF AA6004 ALUMINUM ALLOY

Abstract

AA6004 aluminum alloy was submitted to compression tests at different temperatures and rates of displacement, in order to determine its mechanical behavior. It was found that the stress to a given strain decreases with testing temperature; however, for temperatures higher than 300°C the Hollomon equation not more valid, because of the lack of strain hardening. Strain rates showed significant influence at higher temperatures: the strain rate sensibility at 300°C presented low values (between 0,05 and 0,07), while at 500°C the strain rate sensibility reached values between 0,12 and 0,18.

Key words: Aluminum alloys; Mechanical properties; Mechanical tests; Compression tests.

¹ Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Professor Titular do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Universitário da FEI, rodrimagn@fei.edu.br

³ Graduada em Engenharia de Materiais do Centro Universitário da FEI, nat_lopes@hotmail.com

1 INTRODUÇÃO

As ligas de alumínio são caracterizadas por uma baixa massa específica ($2,7\text{g/cm}^3$) comparando-se por exemplo com a massa específica do aço ($7,8\text{g/cm}^3$); são ligas que contêm alta condutividade elétrica e térmica e também alta resistência à corrosão. Possuem baixa temperatura de fusão (660°C), restringindo o uso de temperaturas muito elevadas. Os principais elementos de liga adicionados ao alumínio são cobre, magnésio, silício, manganês e zinco, e suas quantidades são usualmente expressas em porcentagem.^(1,2)

Para as ligas trabalhadas (como a liga AA6004) foi fixado que o símbolo representativo de cada liga pela Aluminum Association (AA) é um número de 4 algarismos no qual o primeiro número, da esquerda, representa os elementos prioritários da liga, que no caso da liga AA6004 são Magnésio e Silício, representados pelo número 6. O segundo número, quando não é zero, mostra que se trata de uma liga com composição alterada, se comparada a outra liga com os mesmos dois algarismos finais.⁽²⁾

Para se obter informações específicas sobre o comportamento mecânico de um determinado material, são realizados os chamados ensaios de tração. Nestes testes o corpo-de-prova é submetido a uma força crescente enquanto são obtidas todas as informações necessárias do alongamento do mesmo.

Entre os dados possíveis de se obter através destes estão: limite de resistência à tração, limite de escoamento, elasticidade, resiliência, tenacidade, ductilidade e capacidade de encruamento. Esses resultados, no entanto, sofrem influência da temperatura, velocidade de solitação e nível de impurezas do material. Entre todos os tipos de ensaios utilizados em materiais, o ensaio de tração é o mais usual, por ser um procedimento simples, rápido e que fornece informações de extrema importância sobre as propriedades mecânicas do material.^(1,3)

A compressão assim como a tração também é um esforço axial, mas na compressão esse esforço tende a encurtar o corpo-de-prova. Nos ensaios de compressão a carga aplicada submete o corpo a uma força axial compressiva e uniforme. O comportamento mecânico a compressão é semelhante ao comportamento a tração, ou seja, o corpo comprimido também sofre deformação elástica e depois deformação plástica. O conceito dessas deformações, contudo, continuam sendo os mesmos, independente do tipo de ensaio.

O ensaio de compressão não é tão utilizado quanto o ensaio de tração, por causa da dificuldade que se tem para medir as propriedades avaliadas nesse tipo de ensaio, já que a deformação lateral do corpo é barrada pelo atrito entre a superfície do corpo-de-prova e da máquina utilizada para o ensaio. Para diminuir esse problema, costuma-se revestir o corpo-de-prova com algum tipo de material que tenha baixo atrito, como por exemplo, o *teflon*, ou *lubrificá-lo com substâncias como grafite ou graxas do tipo MOLYKOTE®*.

Outro problema existente durante o ensaio de compressão é a flambagem, ou seja, uma possível ocorrência do encurvamento do corpo-de-prova, isso acontece em decorrência da instabilidade na compressão de um material dúctil. Usualmente, adotam-se razões entre comprimento e diâmetro da ordem de 2:1, para que não haja o risco de flambagem do corpo-de-prova durante o ensaio.^(1,3)

As principais propriedades avaliadas com o ensaio de compressão são o limite de escoamento e o limite de proporcionalidade, além das relações entre tensão e deformação verdadeiras.

Deste modo, neste trabalho pretende-se avaliar essas propriedades através dos gráficos obtidos com os ensaios de compressão e comparar os dados do comportamento mecânico da liga obtidos em velocidades e temperaturas diferentes.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O material analisado é uma liga de alumínio AA6004 e sua composição química pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química (% em massa) do material em estudo

Si	Zn	Cu	Fe	Mg	Mn	Al
0,58	0,014	0,025	0,20	0,51	0,34	balanço

De cada um dos 86 corpos-de-prova cilíndricos para compressão foram tomadas uma medida do comprimento (h_0) e uma do diâmetro (D_0), para se obter o comprimento e o diâmetro médios, de respectivamente $(6,65 \pm 0,02)$ mm e $(11,16 \pm 0,11)$ mm.

Os ensaios de compressão, realizados na máquina universal de ensaios MTS 810.25 do Centro de Desenvolvimento de Materiais Metálicos da FEI (CDMatM-FEI), foram feitos à temperatura ambiente (23°C), e também a de 300°C e 500°C , em dipositivo como o mostrado na Figura 1, seguindo a norma ASTM E09-89.⁽⁴⁾



Figura 1: máquina universal de ensaios MTS, com aparato para a realização de ensaios a quente.

Nas temperaturas de 300°C e 500°C houve um período de dez minutos entre um ensaio e outro, para o corpo-de-prova alcançar a temperatura desejada. Esses ensaios foram realizados em diferentes velocidades de sollicitação, de 5 mm/min, 30 mm/min, 100 mm/min e 500 mm/min, usando *Molykote*[®] como lubrificante. Para calcular a tensão e deformação verdadeiras (σ_c e ϵ_c) foram utilizadas as equações.⁽³⁾

$$(1) \sigma_c = \frac{4.F_c.h}{\pi.D_o^2.h_o}$$

$$(2) \epsilon_c = \ln \frac{h_o}{h}$$

Onde: F_c é a força aplicada no corpo-de-prova
 h é a altura do corpo-de-prova após a compressão
 h_o é a altura inicial do corpo-de-prova
 D_o é o diâmetro inicial do corpo-de-prova

Um gráfico de tensão em função da deformação permite a determinação da região de comportamento elástico e da região de encruamento. Outra equação também utilizada é equação de Hollomon⁽¹⁾ que é a relação matemática entre tensão verdadeira e deformação plástica verdadeira:

$$(3) \sigma = H \cdot \varepsilon_p^n$$

onde:

n é o expoente de encruamento

σ é a tensão verdadeira

H é o coeficiente de resistência

ε_p é a deformação verdadeira, adotada como igual à total, já que a parcela elástica da deformação nestes casos é insignificante frente à parcela plástica.

A sensibilidade à taxa de deformação pode ser avaliada pelos valores de C e m , que foram obtidos para temperaturas e deformação iguais, em diferentes taxas de deformação e pares de velocidades de solitação, utilizando-se a seguinte equação:⁽¹⁾

$$(4) \sigma = C \cdot \dot{\varepsilon}^m$$

onde m representa a sensibilidade à taxa de deformação,⁽¹⁾ representada por:

$$(5) \dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{h} \cdot \frac{dh}{dt} = \frac{v_d}{h}$$

onde v_d é a velocidade de solitação.

3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Foram obtidos os gráficos referentes dos ensaios de compressão à temperatura ambiente, com 4 velocidades de solitação diferentes, 5 mm/min e 30 mm/min (Figura 2), 100 mm/min e 500 mm/min (Figura 3). Já nas Figuras 4, 5 e 6, pode-se observar as propriedades mecânicas referentes aos dados obtidos do ensaio realizado à temperatura de 23°C, onde percebe-se que as diferenças de valores entre as propriedades são pequenas, notando assim a insensibilidade à velocidade de solitação nos parâmetros avaliados.

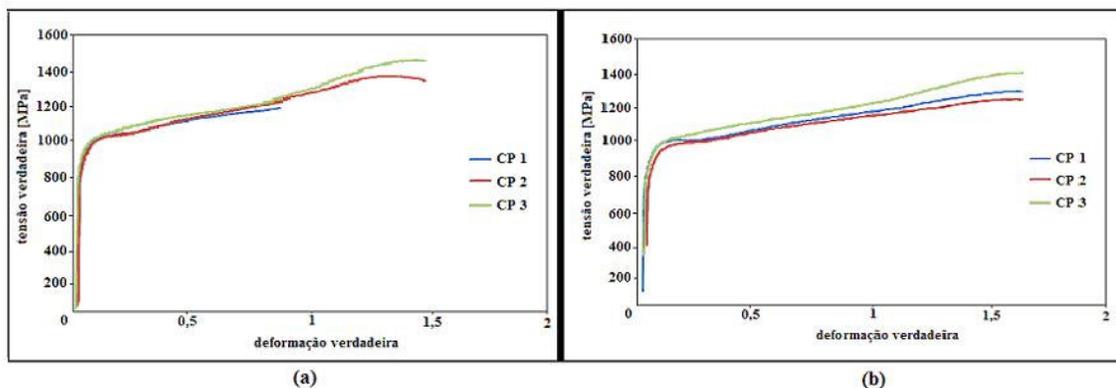


Figura 2: curvas tensão verdadeira por deformação verdadeira para ensaios de compressão a 23°C: (a) ensaio a 5 mm/min; (b) ensaio a 30 mm/min.

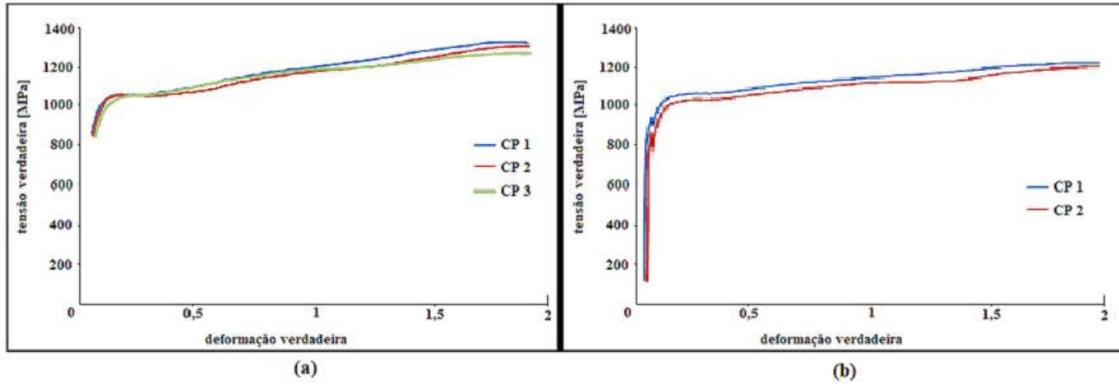


Figura 3: curvas tensão verdadeira por deformação verdadeira para ensaios de compressão a 23°C: (a) ensaio a 100 mm/min; (b) ensaio a 500 mm/min.

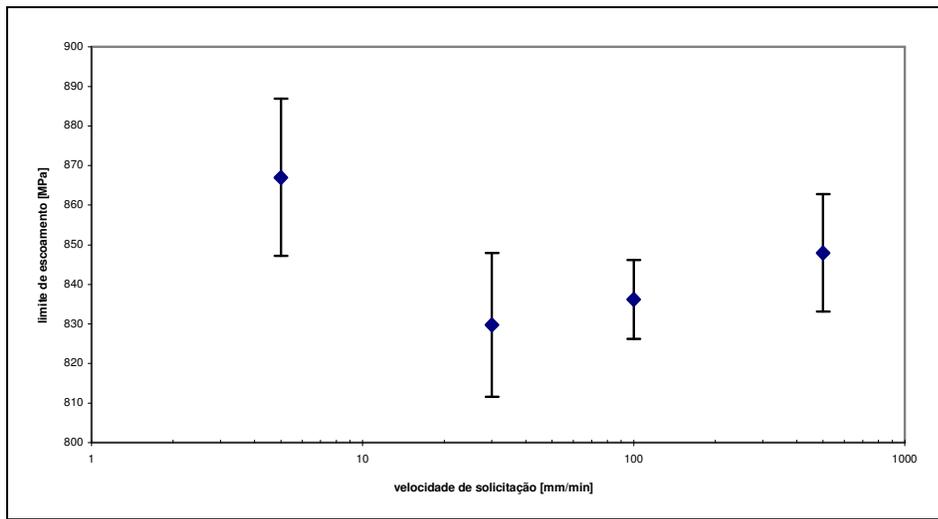


Figura 4: curva obtida a partir dos dados de limite de escoamento.

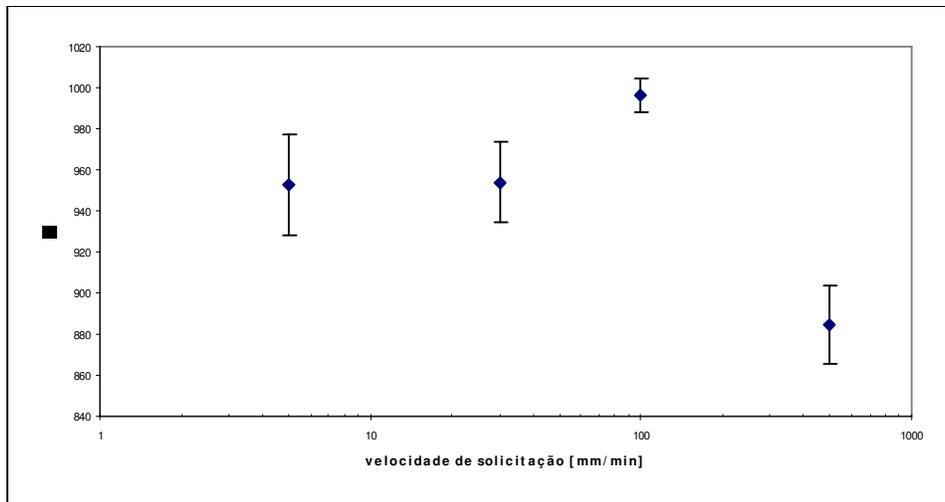


Figura 5: curva obtida a partir dos dados de H do material.

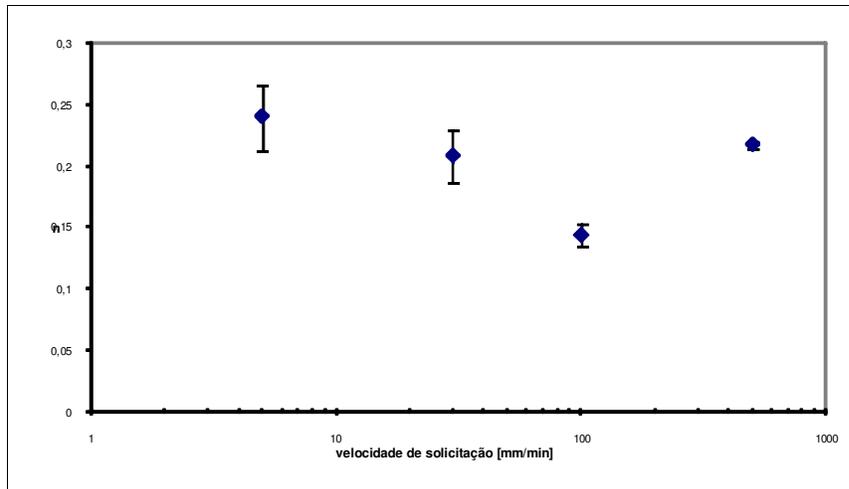


Figura 6: curva obtida à partir dos dados de n do material a 23°C.

Nas Figuras 7 e 8, pode-se observar os gráficos referentes aos ensaios realizados a temperatura de 300°C. Na Figura 9, pode-se observar o gráfico referente ao limite de escoamento na temperatura de 300°C em diferentes velocidades de solitação onde se nota que a tensão é praticamente constante, indicando a não ocorrência de encruamento, fazendo com que a expressão de Hollomon não seja mais válida, impossibilitando a determinação dos valores de H e n .

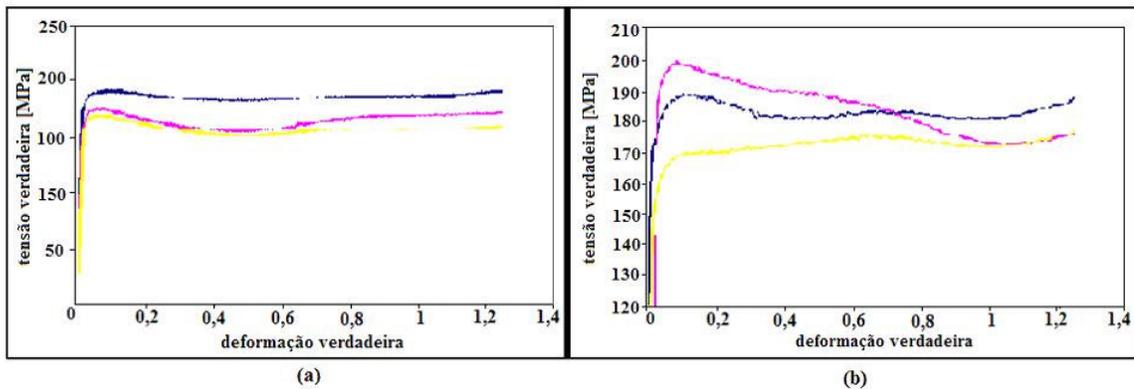


Figura 7 (a) e (b): curvas tensão verdadeira por deformação verdadeira para ensaios realizados a temperatura de 300°C, nas velocidades de 5 mm/min e 30 mm/min, respectivamente.

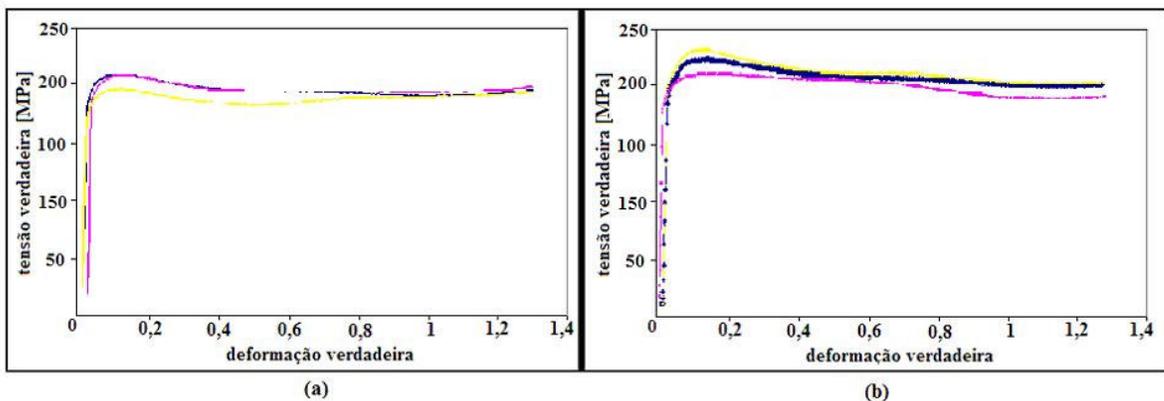


Figura 8 (a) e (b): curvas tensão verdadeira por deformação verdadeira para ensaios realizados a temperatura de 300°C, nas velocidades de 100 mm/min e 500 mm/min, respectivamente.

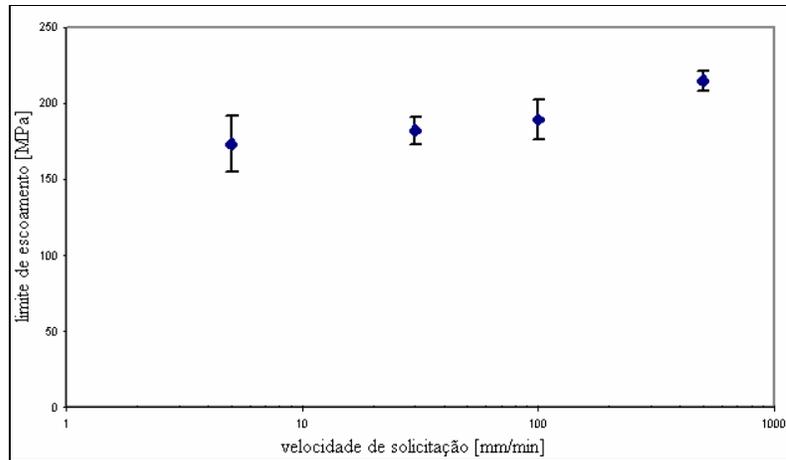


Figura 9: curva obtida à partir dos dados de limite de escoamento do material a 300°C.

Já nas Figuras 10 e 11 pode-se observar os gráficos referentes aos ensaios realizados a temperatura de 500°C, onde se observa que quanto maior a velocidade de solitação, maior é a tensão necessária para se deformar o material, o que é confirmado pela Figura 12, onde se observa o gráfico referente ao limite de escoamento na temperatura de 500°C em diferentes velocidades de solitação. Mais uma vez, como na temperatura de 500°C não existe mais a região de encruamento, a expressão de Hollomon não é mais válida.

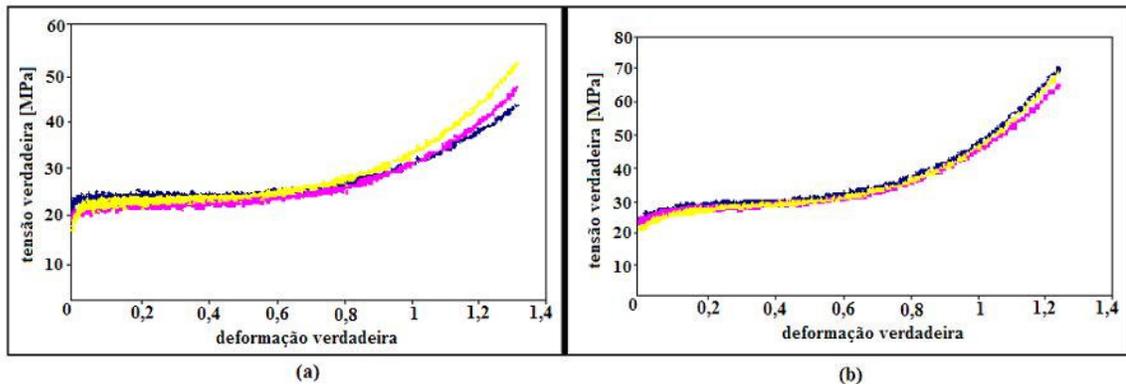


Figura 10 (a) e (b): curvas tensão verdadeira por deformação verdadeira para ensaios realizados a temperatura de 500°C, nas velocidades de 5 mm/min e 30 mm/min, respectivamente.

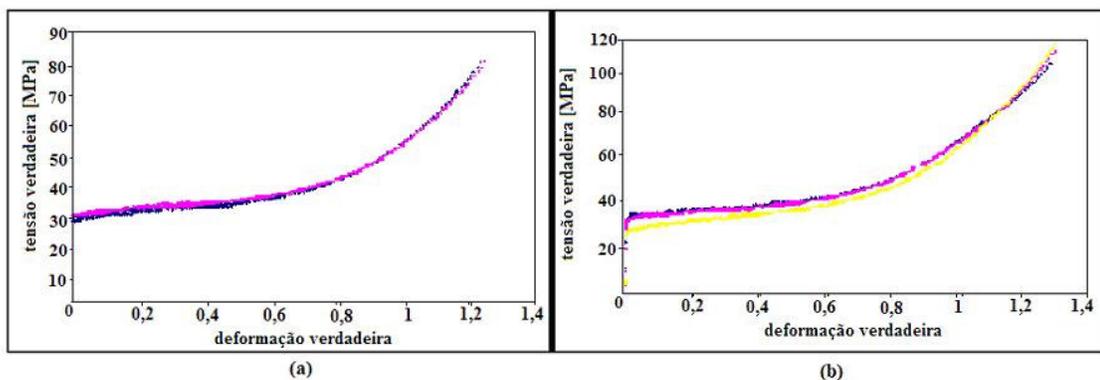


Figura 11 (a) e (b): curvas tensão verdadeira por deformação verdadeira para ensaios realizados a temperatura de 500°C, nas velocidades de 100 mm/min e 500 mm/min, respectivamente.

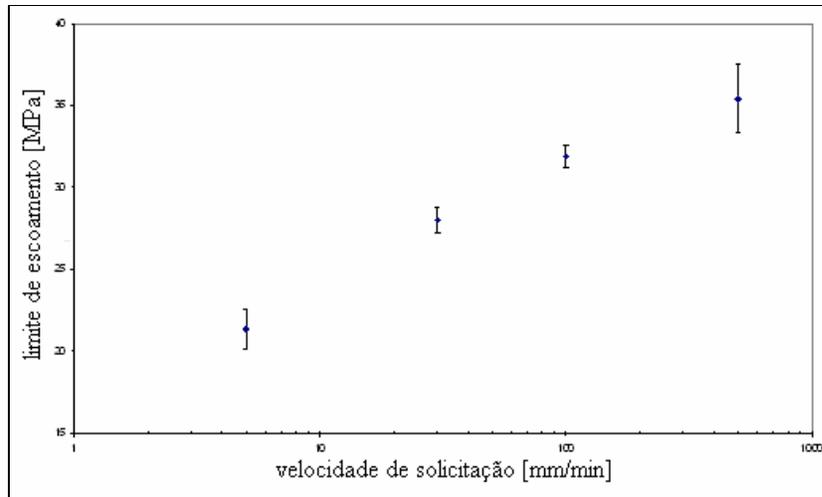


Figura 12: gráfico obtido à partir dos dados de limite de escoamento do material a 500°C.

4 DISCUSSÃO

Para que se possa discutir a influência da velocidade de solitação nos ensaios de compressão realizados, foram obtidos os gráficos das Figuras 13, 14 e 15. Na Figura 13, pode-se notar que não há influência monotônica da velocidade de solitação nos ensaios realizados a temperatura ambiente, o que confirmaria o uso inadequado dos lubrificantes, já que se esperaria praticamente nenhuma influência, ou o aumento da tensão necessária a deformação com o aumento da velocidade de solitação. Já nas Figuras 14 e 15, referentes aos ensaios a 300°C e 500°C, observa-se que a influência da velocidade é a esperada, ou seja, conforme o aumento da velocidade, maior é a tensão necessária para se deformar o material.

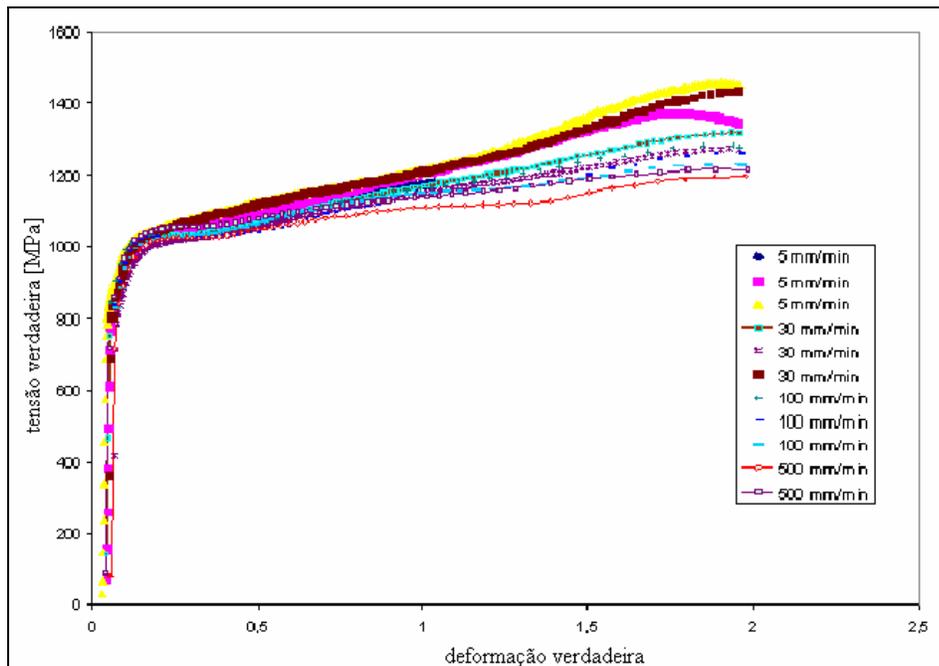


Figura 13: curvas tensão verdadeira por deformação verdadeira para ensaios referentes a temperatura de 23°C.

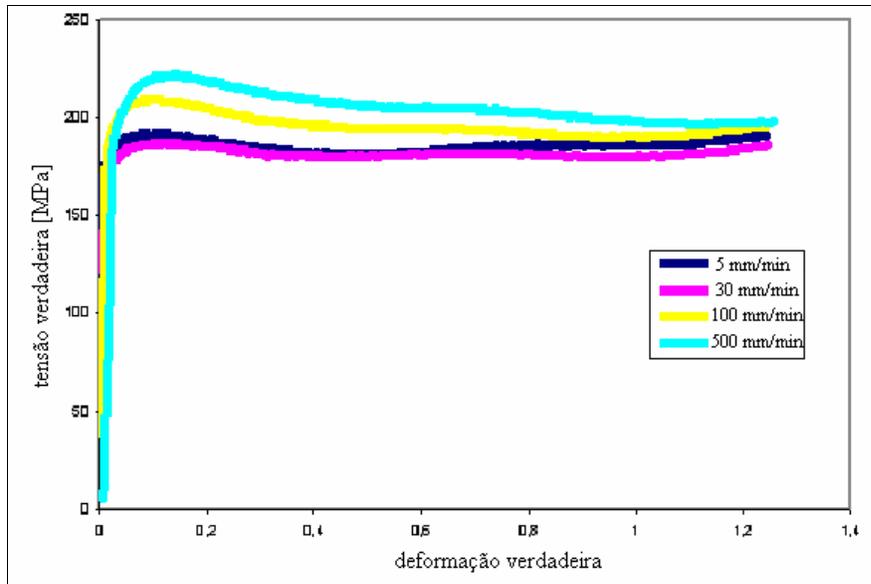


Figura 14: curvas tensão verdadeira por deformação verdadeira para ensaios referentes a temperatura de 300°C.

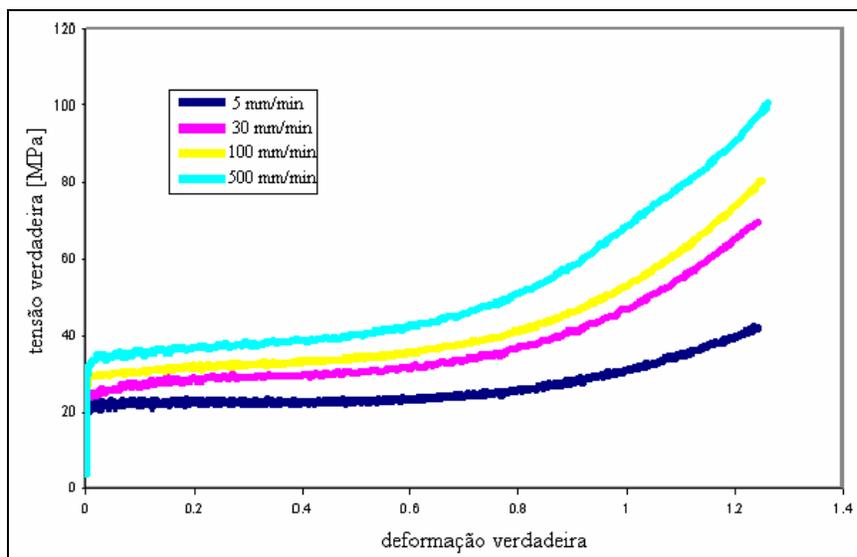


Figura 15: curvas tensão verdadeira por deformação verdadeira para ensaios referentes a temperatura de 500°C.

Nas Figuras 16 e 17, pode-se observar claramente a influência da temperatura nos ensaios realizados, onde se observa que independente da velocidade de solitação, conforme o aumento da temperatura, menor é a tensão necessária para se deformar o material. Assim, pode-se implementar o cálculo dos C e m, mostrando a influência da taxa de deformação média (cujos valores são apresentados na Tabela 2) na tensão necessária para deformações de 0,2, 0,4 e 1,0. Contudo, os valores de C e m mostrados na Tabela 3 apenas permitem concluir que a sensibilidade a taxa de deformação (m) assume valores entre 0,05 e 0,07 a 300°C (indicando pequena influência da taxa de deformação) para valores entre 0,12 e 0,18 a 500°C, mostrando que a sensibilidade a taxa de deformação aumenta quanto maior a temperatura de conformação empregada. Mais uma vez, provavelmente devido a problemas de lubrificação, não se pode afirmar nada sobre

os dados a 23°C, notando-se que os desvios-padrão, particularmente dos valores de m, chega a ter a magnitude do valor médio obtido nas três deformações estudadas.

Tabela 2: valores médios das taxas de deformação

Velocidades de solicitação (mm/min)	5	30	100	500
$\dot{\epsilon}$	0,01	0,1	0,3	1,3

Tabela 3: valores obtidos nos cálculos de C e m

T	23°C			300°C			500°C		
	0,2	0,4	1	0,2	0,4	1	0,2	0,4	1
C	1380,2 ± 244	1426 ± 307,6	1182 ± 1,4	219,7 ± 5,6	208,9 ± 10	197 ± 2,6	38,5 ± 4,5	40,8 ± 2,5	65,5 ± 10,5
m	0,15 ± 0,11	0,23 ± 0,2	0,2 ± 0,01	0,05 ± 0,02	0,07 ± 0,06	0,05 ± 0,04	0,12 ± 0,04	0,12 ± 0,02	0,18 ± 0,07

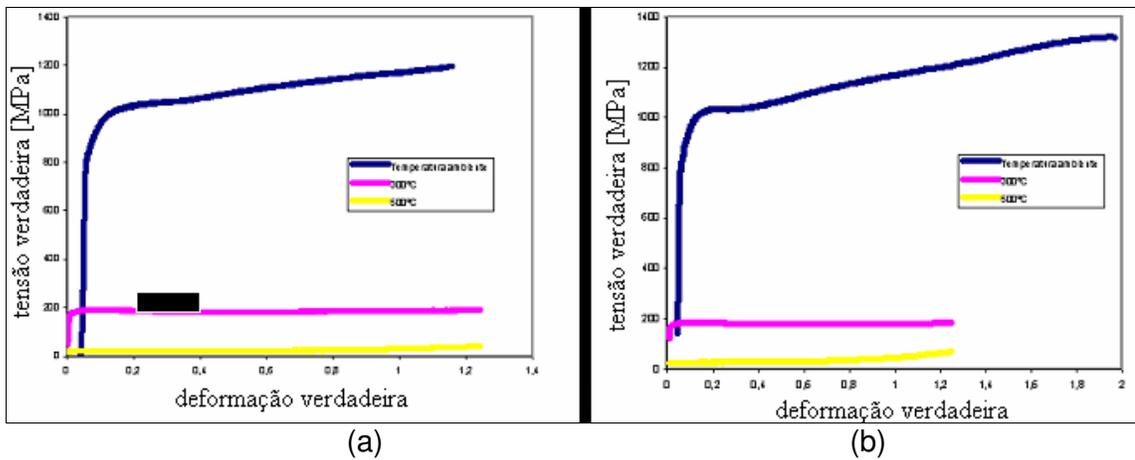


Figura 16: (a) curvas tensão verdadeira por deformação verdadeira para ensaios referentes a velocidade de solicitação de 5 mm/min; (b) curvas tensão verdadeira por deformação verdadeira para ensaios referentes a velocidade de solicitação de 30 mm/min.

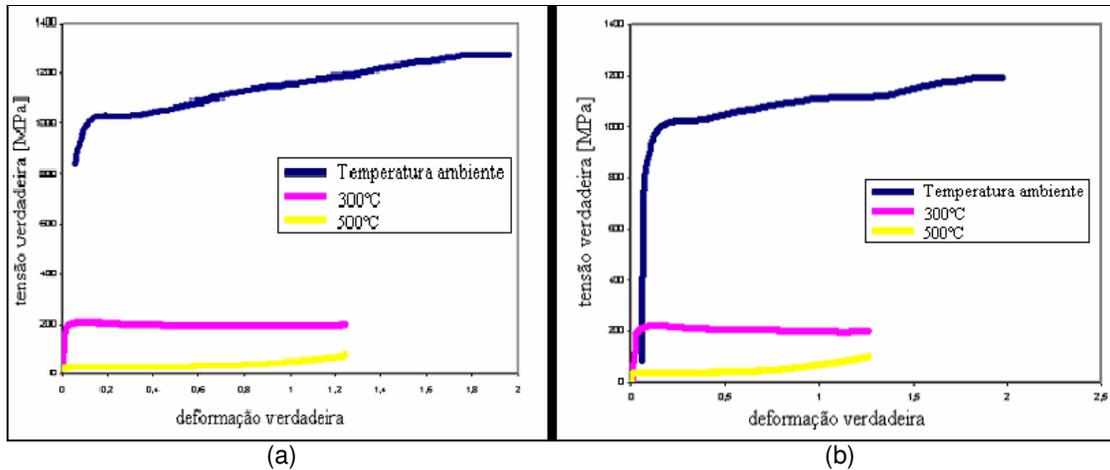


Figura 17: (a) curvas tensão verdadeira por deformação verdadeira para ensaios referentes a velocidade de solitação de 100 mm/min; (b) curvas tensão verdadeira por deformação verdadeira para ensaios referentes a velocidade de solitação de 500 mm/min.

5 CONCLUSÕES

Nos ensaios realizados, nota-se que quanto maior a temperatura de ensaio, menor a tensão necessária à uma dada deformação. Contudo, pode-se afirmar que em temperaturas acima de 300°C não existe mais a região de encruamento, portanto, a expressão de Hollomon não é mais válida. As taxas de deformação tiveram uma influência significativa nos ensaios nas temperaturas mais elevadas, obtendo-se valores de sensibilidade à taxa de deformação entre 0,05 e 0,07 a 300°C (indicando pequena influência da taxa de deformação) para valores entre 0,12 e 0,18 a 500°C.

REFERÊNCIAS

- 1 DIETER, George Ellwood. Metalurgia mecânica. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, c1981. 653 p.
- 2 GOMES, Mario Rennó. Emprego do alumínio e suas ligas. São Paulo: ABM, 1976. 101 p.
- 3 GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. Ensaios dos materiais. Rio de Janeiro: LTC, c2000. 247 p.
- 4 ASTM E09-89, Standard test methods of compression testing of metallic materials at room temperature. ASTM.