

## PROPRIEDADES MECÂNICAS EM TEMPERATURA CRIOGÊNICA DA LIGA AA6061

Danielle Cristina Camilo Magalhães; Vitor Luiz Sordi; Maurizio Ferrante  
Rodovia Washington Luís, km 235 - SP-310, São Carlos – SP.  
Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos –  
UFSCar.

### RESUMO

*Amostras da liga AA6061 foram ensaiadas em tração e compressão a 77 K, 173 K e 298 K em diferentes estados de precipitação. Os resultados indicaram que a 77 K tem-se um aumento do limite de escoamento simultâneo com o aumento do alongamento uniforme. Além disso, o expoente de encruamento e a sensibilidade à taxa de deformação são maiores em temperaturas criogênicas do que para 298 K. O efeito Portevin-Le Chatelier, que aparece a 298 K, é suprimido pela redução da temperatura, o que se reflete no aumento da ductilidade. A taxa de encruamento também foi afetada pela temperatura, como demonstrado pela análise de Kocks-Mecking das curvas de compressão. O conjunto de resultados apresentados ajuda compreender o comportamento de deformação da liga AA6061 e permite determinar parâmetros de processamento em baixas temperaturas.*

Palavras-chave: AA6061; propriedades mecânicas; temperatura criogênica; tração uniaxial; compressão uniaxial.

### 1. Introdução

A liga AA6061 apresenta uma combinação de propriedades mecânicas que favorecem sua utilização em diversas aplicações que vão desde estruturas até componentes da indústria automotiva. Por estas razões, essa liga é objeto de inúmeros estudos visando compreender as relações entre comportamento mecânico, microestrutura e processamento. Entretanto, a grande maioria destes trabalhos são conduzidos em temperatura ambiente ou em temperaturas homólogas próximas de  $0,5T_f$  ( $T_f$  = temperatura de fusão) e há grande escassez de informações a respeito do comportamento de encruamento desta liga em temperaturas criogênicas.

Alguns trabalhos recentes foram conduzidos com objetivo de compreender o comportamento de algumas ligas de alumínio deformadas em baixas temperaturas. Roven e colaboradores<sup>(2)</sup> estudaram o efeito da deformação em tração a 77 K em

chapas laminadas da liga AA8090 sobre a textura e o aspecto da fratura, observando um aumento da tenacidade à fratura, do expoente de encruamento, da resistência mecânica e do alongamento, em relação aos ensaios em temperatura ambiente. Outro estudo<sup>(3)</sup> foi realizado com a liga AA5754 com trações a 298 K e 223 K, indicando que a redução da temperatura de ensaio inibe o efeito Portevin-Le Chatelier, levando a uma distribuição mais homogênea de átomos de soluto e discordâncias do que a 298 K. Outros dois trabalhos com a liga AA5754 focaram em compreender o efeito da deformação plástica entre 4,2 K e 295 K<sup>(4)</sup> e na evolução da textura em amostras com diferentes graus de deformação, tracionadas em temperaturas criogênicas<sup>(5)</sup>. Na série 6xxx, o estudo de Esmaili e colaboradores<sup>(6)</sup> examinou a liga AA6111 submetida à tração entre 298 K e 4,2 K sob diferentes estados de precipitação, indicando um comportamento complexo que depende da natureza dos obstáculos para a movimentação de discordâncias, o que implica em fortes mudanças na sensibilidade à taxa de deformação e no comportamento de encruamento.

De uma forma geral, os trabalhos com ligas de alumínio também indicaram um aumento da resistência mecânica, simultaneamente com um aumento da ductilidade em baixas temperaturas. Entretanto, a liga AA6061 ainda foi pouco estudada em baixas temperaturas, principalmente no que se refere ao comportamento mecânico. Assim, o objetivo deste trabalho é analisar a influência da temperatura criogênica na resposta sob tração e compressão liga AA6061, de modo a determinar parâmetros de processamento criogênico.

## 2. Materiais e Métodos

Ensaio de tração uniaxial foram conduzidos em amostras da liga AA6061, com a geometria indicada na Figura 1. Imediatamente antes do início dos ensaios, todos os corpos de prova foram solubilizados a 530 °C durante duas horas em forno tipo mufla, seguido de resfriamento em água sob agitação, obtendo-se um estado de solução sólida supersaturada (SSSS). Os ensaios foram conduzidos em uma máquina universal de ensaios mecânicos da marca Instron modelo 5500R, com taxas de deformação inicial ( $\dot{\epsilon}$ ) entre  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$  e  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ .

Foram selecionadas três temperaturas para os testes: 298 K, 173 K e 298 K. O teste a 173 K foi realizado em uma câmara fechada da marca Instron modelo 3119-610, sendo a temperatura mantida constante durante todo o ensaio e aferida com o

uso de um termopar tipo T. Já o ensaio a 77 K foi conduzido com a amostra completamente imersa em nitrogênio líquido e lá mantida por 10 min para estabilização da temperatura do corpo de prova e do conjunto de garras.

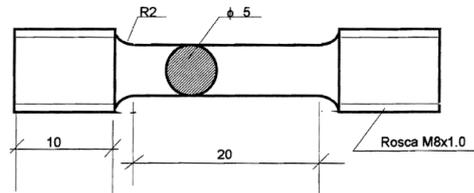


Figura 1 - Representação esquemática da geometria do corpo de prova utilizado no ensaio de tração uniaxial.

Ensaio de compressão uniaxial foram realizados com o objetivo de complementar as informações obtidas nos ensaios de tração, visto que nestes há uma limitação na região plástica uniforme, devido à estricção. Dessa forma, na compressão uniaxial tem-se uma extensa região plástica que permite a aplicação de modelos matemáticos, como o de Kocks-Mecking, para estudo do encruamento. Tais ensaios foram realizados em amostras de AA6061 com geometria cilíndrica, de 3 mm de diâmetro por 8 mm de altura, conforme descrito na norma ASTM E-09. A taxa de deformação inicial utilizada na compressão foi de  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  e as temperaturas selecionadas para a análise foram 298 K e 77 K. Adicionalmente, além da condição SSSS, foram estudadas outras duas condições: envelhecimento natural (T4), com  $t > 300 \text{ h}$ , e envelhecimento artificial (T6), em banho de sal a 170 °C por 18 h. O ensaio a 77 K foi realizado com a amostra totalmente submersa em nitrogênio líquido, mantendo 10 min submersa para estabilização da temperatura antes do início do teste.

### 3. Resultados e Discussão

A Figura 2 mostra as curvas de tração obtidas a 298 K e a 77 K para amostras no estado SSSS. Como pode-se ver, o comportamento do material no ensaio a 77 K é bastante distinto do obtido a 298 K.

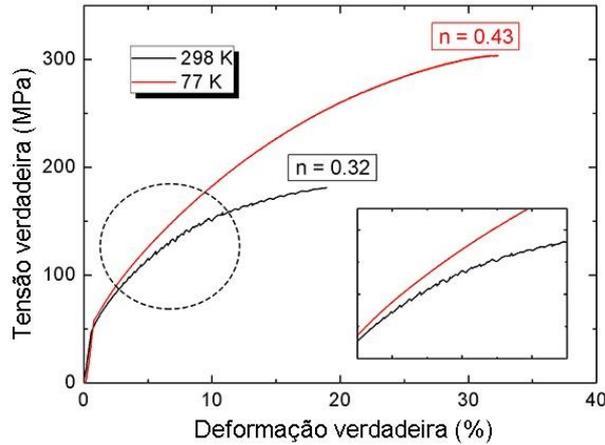


Figura 2 – Curvas de tensão-deformação verdadeiras para a liga AA6061 no estado SSSS, com os respectivos expoentes de encruamento ( $n$ ). O detalhe mostra o efeito Portevin-Le Chatelier em temperatura ambiente. Taxa de deformação =  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ .

O limite de escoamento aumentou cerca de 30% (ver Tabela 1) e o alongamento uniforme aumentou 74% para a amostra testada a 77 K, em comparação com a temperatura ambiente. Além disso, o expoente de encruamento ( $n$ ) a 298 K é menor do que a 77 K, indicando que a redução da temperatura promove uma supressão parcial da recuperação dinâmica e aumenta a taxa de encruamento e a densidade de discordâncias. Outra importante característica é mostrada na ampliação da Figura 2. O efeito Portevin-Le Chatelier (PLC) está presente a 298 K, mas com a redução da temperatura de ensaio o efeito serrilhado desaparece. Este efeito é uma forte evidência de precipitação dinâmica<sup>(7)</sup>. Em temperatura criogênica (77 K), provavelmente, o baixo coeficiente de difusão dos solutos contribui para a redução da precipitação dinâmica, e assim o efeito PLC é inibido<sup>(5, 7)</sup>.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas no ensaio de tração para a liga AA6061 na condição SSSS

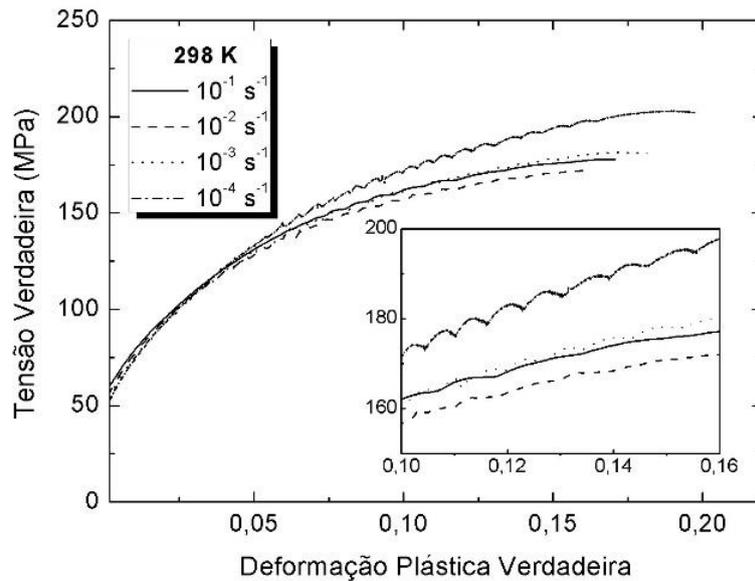
Temperatura	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	$\epsilon_t$ (%)	$\epsilon_u$ (%)	S (%)
298 K	55	150	30	20	77
77 K	72	234	47	35	62

Nota:  $\sigma_y$  = limite de escoamento;  $\sigma_u$  = limite de resistência à tração;  $\epsilon_t$  = alongamento total;  $\epsilon_u$  = alongamento uniforme; S = redução de área.

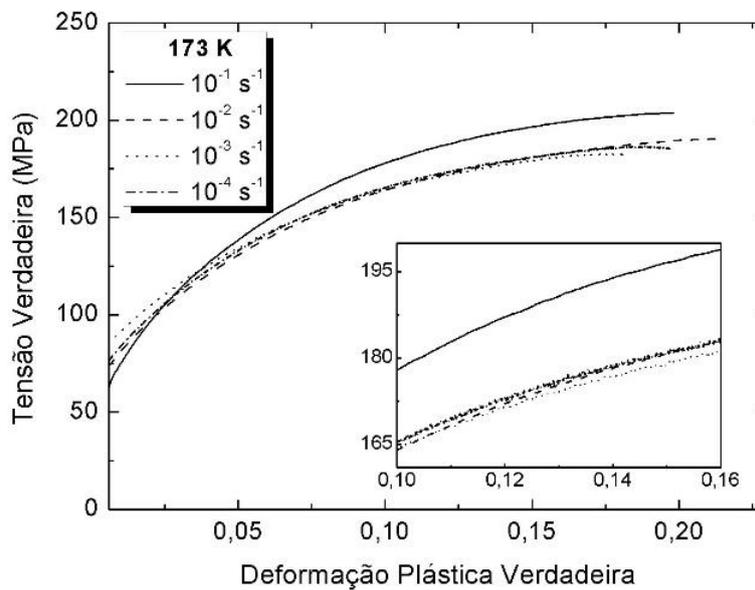
Como pode ser visto na Tabela 1, para o ensaio realizado em temperatura criogênica há um aumento expressivo do limite de escoamento, do limite de resistência à tração e do alongamento (total e uniforme) em relação ao ensaio conduzido em temperatura ambiente. Outro fato interessante está associado com a redução de área: neste caso, apesar do grande alongamento observado a 77 K, a

redução de área é menor. Este fato está associado com a melhor distribuição da deformação plástica no corpo de prova, que parece ser menos concentrada do que ocorre a 298 K.

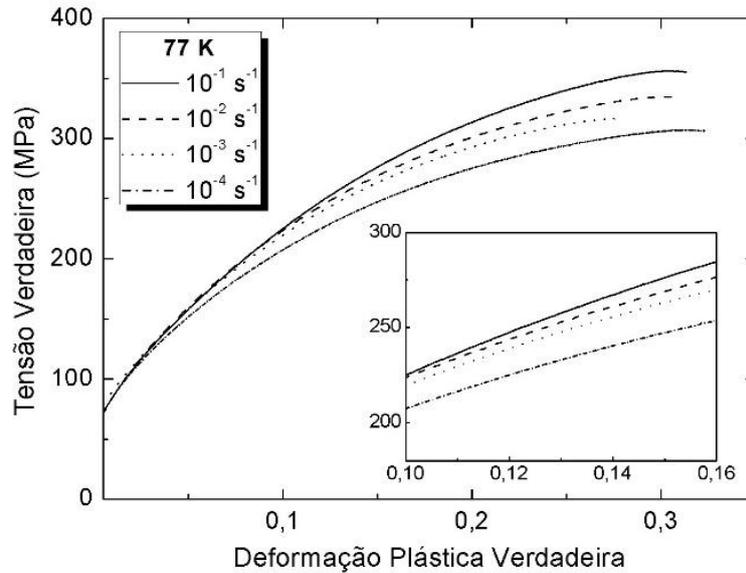
Na Figura 3 estão apresentadas as curvas tensão-deformação verdadeiras obtidas em ensaios de tração realizados com diferentes taxas de deformação, nas temperaturas de 298 K, 173 K e 77 K.



(a)



(b)



(c)

Figura 3 – Ensaio de tração em diferentes taxas de deformação: (a) 298 K; (b) 173 K e (c) 77 K. Os detalhes mostram uma região ampliada do gráfico, evidenciando a presença ou ausência do efeito PLC.

No caso dos ensaios a 298 K (Figura 3.a), observa-se que o limite de escoamento e o limite de resistência à tração reduzem-se com o aumento da taxa de deformação. Ou seja, espera-se, neste caso, que a sensibilidade à taxa de deformação tenha valor negativo. Este efeito está associado diretamente com o efeito PLC e precipitação dinâmica<sup>(5, 7)</sup>. Os átomos de soluto são capazes de difundir pela matriz mais rapidamente do que as discordâncias, de modo a capturá-las e bloqueá-las temporariamente<sup>(7)</sup>. Dessa forma, a tensão aumenta e, quando as discordâncias se libertarem destas atmosferas de soluto e/ou *clusters*, é reduzida. Este processo ocorre inúmeras vezes, acarretando no efeito serrilhado típico do PLC<sup>(5, 7)</sup>. No inserto da Figura 3.a observa-se uma ampliação de uma região do gráfico, indicando uma mudança na aparência do serrilhado, bem como da frequência e amplitude das variações de tensão com diferentes taxas de deformação. No caso de taxas mais lentas, como  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ , permite-se que ocorra a precipitação dinâmica, o que se reflete em uma resistência mecânica mais elevada. Em taxas maiores, por exemplo  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ , não há tempo suficiente para que ocorra a precipitação dinâmica e, portanto, o possível efeito de aumento de resistência mecânica pela presença de zonas-GP e *clusters* de Mg e Si atuando como barreiras para as discordâncias<sup>(5)</sup> não é observado.

Para as temperaturas de 173 K e 77 K, o efeito é oposto ao observado a 298K: a resistência mecânica aumenta juntamente com o aumento da taxa de deformação,

resultando em uma sensibilidade à taxa de deformação positiva, visto que nestas temperaturas há uma inibição da precipitação dinâmica e, conseqüentemente, não se observa o efeito PLC. Adicionalmente, nota-se que o limite de escoamento e o alongamento uniforme são significativamente maiores para 77 K do que para 173 K.

A Figura 4 mostra como as propriedades de tração são afetadas pela taxa de deformação e pela temperatura de ensaio.

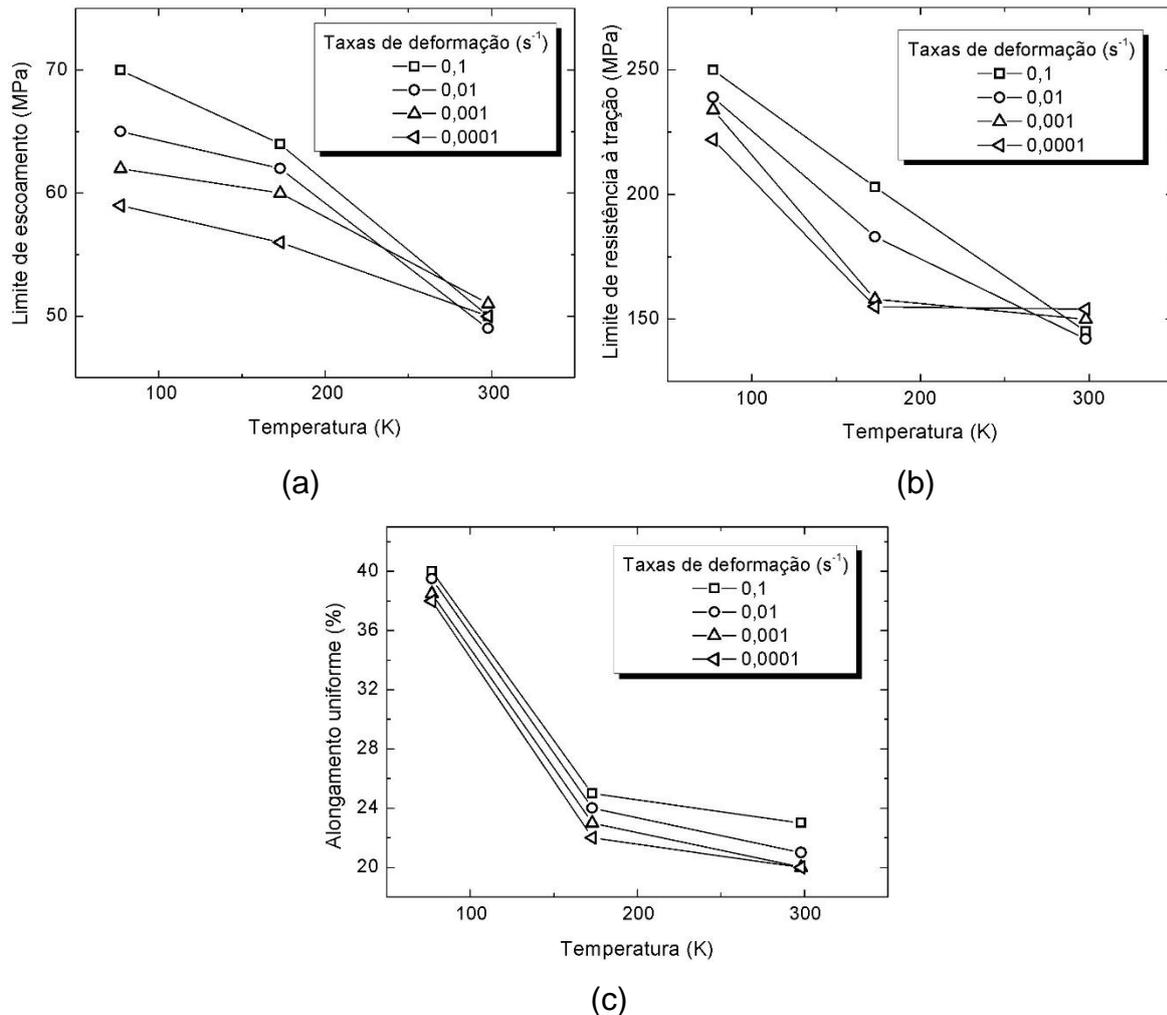


Figura 4 – Propriedades de tração em função da temperatura de ensaio, para diferentes taxas de deformação: (a) limite de escoamento; (b) limite de resistência à tração; (c) alongamento uniforme.

Nota-se nas Figuras 4.a e 4.b, que tanto para o limite de escoamento quanto para o limite de resistência à tração, a 298 K o efeito da taxa de deformação é oposto do observado para 77 K e 173 K. Além disso, pode-se observar que, independentemente da taxa de deformação, a resistência mecânica e a ductilidade aumentam com a redução da temperatura, sendo este efeito mais evidente para 77 K. Quanto ao alongamento (Figura 4.c), nota-se que ele é menos afetado pela taxa

de deformação, mas é mais sensível à temperatura. Novamente, os maiores valores de alongamento são observados para baixas temperaturas, em especial 77 K.

A partir dos dados coletados nas curvas da Figura 3, também foram calculados dois parâmetros importantes para o entendimento do comportamento mecânico da liga AA6061 em baixas temperaturas: o expoente de encruamento e a sensibilidade à taxa de deformação. Ambas as propriedades são apresentadas na Figura 5, em função das diferentes taxas de deformação e temperaturas de ensaio.

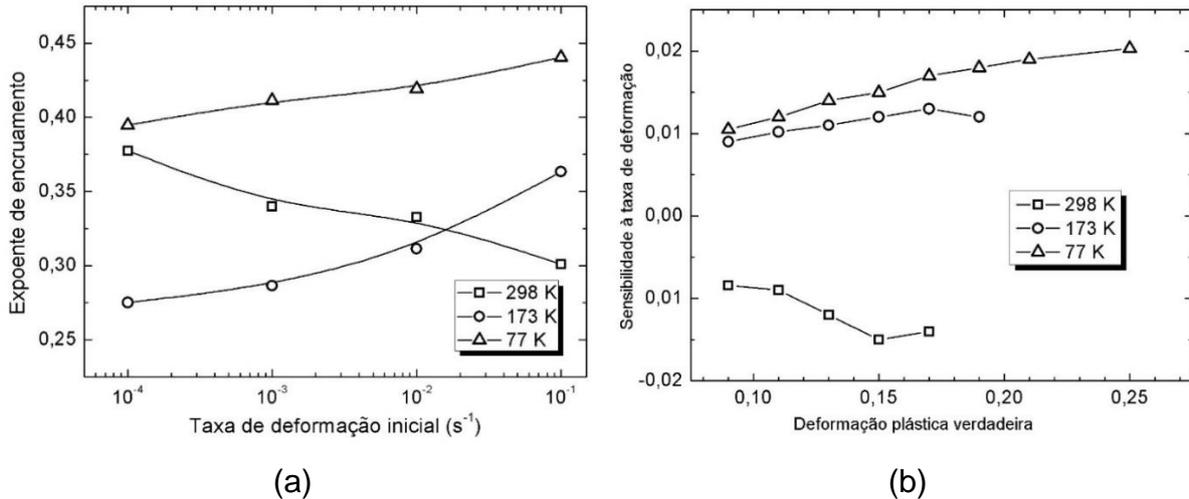


Figura 5 – (a) variação do expoente de encruamento com a taxa de deformação; (b) variação da sensibilidade à taxa de deformação em cada temperatura, para diferentes níveis de deformação plástica verdadeira.

O expoente de encruamento ( $n$ ) foi calculado a partir da linearização da equação de Hollomon ( $\sigma = K \cdot \varepsilon^n$ ) para as diferentes taxas de deformação e temperaturas de ensaio. Na Figura 5, fica evidente que em temperatura ambiente as amostras exibem uma tendência oposta àquela observada a 173 K e 77 K. No caso do expoente de encruamento (Figura 5.a), a tendência em temperaturas criogênicas é um aumento concomitante com o aumento da taxa de deformação. Isto pode ser explicado pela proporcionalidade entre taxa de deformação plástica ( $\dot{\varepsilon}$ ) e a velocidade média de movimentação das discordâncias ( $u$ ), assim como mostrada na equação (B) <sup>(7)</sup>:

$$\dot{\varepsilon} = b \cdot \rho \cdot u \quad (A)$$

Sendo,  $b$  o vetor de Burgers e  $\rho$  a densidade de discordâncias móveis.

Como pode ser observado na equação (A), a única maneira que o termo  $b \cdot \rho \cdot u$  tem de corresponder a um aumento da taxa de deformação é pelo aumento do valor de  $u$ , ao qual corresponde um aumento da tensão<sup>(7)</sup>. Além disso, uma vez que as

discordâncias estão em movimento, elas também estão se multiplicando, promovendo o encruamento, o qual também conduz a um aumento da resistência mecânica. Por esta razão, em taxas mais elevadas de deformação, observa-se um aumento do limite de escoamento e do limite de resistência à tração.

Entretanto, para o ensaio em temperatura ambiente, a redução da taxa de deformação provoca um aumento na tensão de escoamento, e vice-versa. Estes efeitos estão relacionados com a precipitação dinâmica que ocorre a 298 K. Em temperaturas criogênicas, porém, a precipitação dinâmica é suprimida em virtude da redução do coeficiente de difusividade do Mg e do Si na matriz de Al<sup>(5)</sup>.

Para o cálculo da sensibilidade à taxa de deformação ( $m$ ) foi utilizada a relação apresentada na equação (C), válida para deformação e temperatura constantes <sup>(7)</sup>:

$$\sigma = C \cdot (\dot{\epsilon})^m |_{\epsilon, T} \quad (C)$$

Sendo  $C$  um coeficiente de encruamento.

O valor de  $m$  também apresenta um comportamento diferenciado para a temperatura de 298 K, em comparação com as temperaturas criogênicas. Assim, em temperatura ambiente tem-se  $m$  negativo, que aumenta em módulo para maiores deformações plásticas, como indicado na Figura 5.b.

Outra característica importante observada com relação ao valor de  $m$ , é o aumento com a deformação para a temperatura de 77 K. Isto pode estar associado com o grande alongamento uniforme observado nas amostras ensaiadas nestas condições, simultaneamente com a menor redução de área, que é semelhante ao que ocorre na superplasticidade, ou seja, uma supressão ou atraso do início do empescoamento<sup>(7)</sup>. Entretanto, a superplasticidade está associada com valores mais elevados de  $m$ , então, neste caso, a justificativa baseia-se principalmente na redução parcial dos mecanismos associados com a recuperação dinâmica bem como inibição da ocorrência de precipitação dinâmica <sup>(5,7)</sup>.

Além dos ensaios de tração, também foram realizados ensaios de compressão uniaxial, que são apresentados na Figura 6. O objetivo destes ensaios é complementar as informações obtidas sobre o comportamento mecânico da liga AA6061 em diferentes condições, principalmente pela aplicação do modelo matemático de Kocks-Mecking para o estudo do encruamento. A tração possui uma limitação na região de deformação plástica uniforme devido à estricção, a qual é

contornada pela realização de ensaios de compressão em condições similares de taxa e temperatura de deformação.

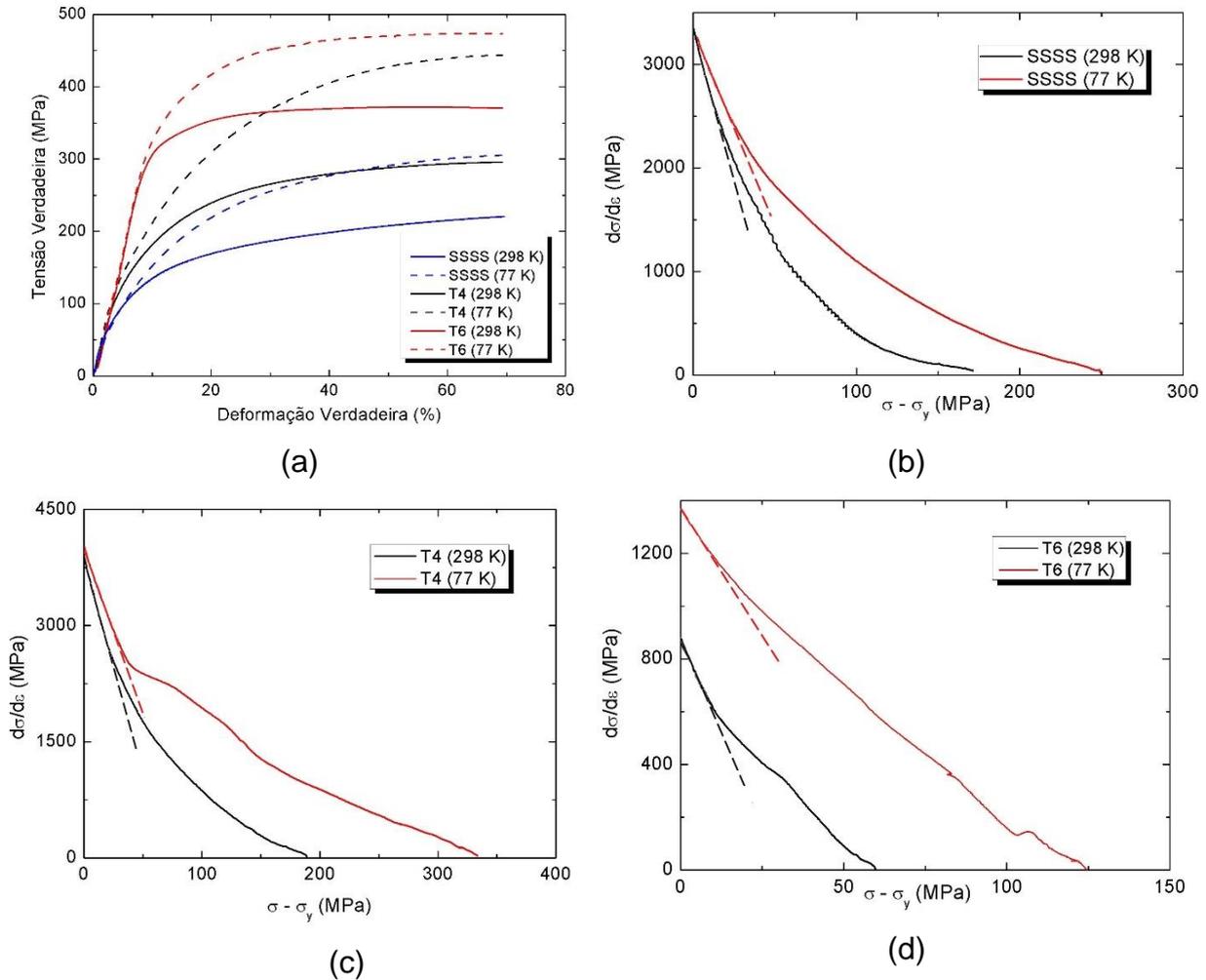


Figura 6 – (a) ensaios de compressão a 77K (linhas pontilhadas) e a 298 K (linhas contínuas); (b), (c) e (d) gráficos de Kocks-Mecking para as condições SSSS, T4 e T6, respectivamente.  $\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ .

Como pode ser visto na Figura 6.a, em temperatura criogênica são observados maiores valores de limite de escoamento do que para a temperatura ambiente nas três condições de tratamento térmico. Na condição SSSS, a redução da temperatura de ensaio provoca um aumento de cerca de 14% no limite de escoamento. Já na condição de envelhecido natural (T4), este aumento corresponde a 13%. Finalmente, para a condição T6, observa-se um aumento de 12% no limite de escoamento, quando se comparam as curvas a 298 K e 77 K.

Nas Figuras 6.b, 6.c e 6.d são apresentados os gráficos de Kocks-Mecking (K-M), que derivam das curvas de tensão-deformação verdadeiras e relacionam a taxa de encruamento ( $\theta = d\sigma/d\epsilon$ ) com a diferença de tensões ( $\sigma - \sigma_y$ ), onde  $\sigma$  é a tensão

instantânea. Em geral, as curvas K-M consistem em uma região aproximadamente linear (estágio II), exceto para grandes deformações, a qual pode ser descrita pela equação de Voce. Dessa maneira, a inclinação desta região é proporcional à taxa de recuperação dinâmica. Além disso, o intercepto com o eixo de  $\theta$  indica a máxima taxa de encruamento inicial ( $\theta_0$ ), que para materiais policristalinos puros é aproximadamente igual a  $G/20^{(8)}$ .

Observa-se que há uma mudança na forma e na inclinação destas curvas para as diferentes temperaturas. A Tabela 2 resume os principais parâmetros calculados a partir das curvas K-M mostradas na Figura 6, bem como os respectivos expoentes de encruamento.

Tabela 2 – Resumo dos principais parâmetros obtidos nos gráficos de K-M para diferentes condições de compressão uniaxial.

Condição	SSSS		T4		T6	
	298 K	77 K	298 K	77 K	298 K	77 K
Expoente de encruamento	0,47	0,69	0,22	0,28	0,07	0,09
$-(\theta/\sigma-\sigma_y)$	46,14	32,75	88,62	39,92	23,12	14,98
$\theta_0$ (MPa)	3247	3271	3642	3837	852	1346

Assim como observado na tração, nos ensaios de compressão o expoente de encruamento também aumenta com a redução da temperatura de ensaio. Neste caso, a mudança mais expressiva foi para a condição metaestável de SSSS. Já para uma microestrutura estável, com a presença de numerosos precipitados  $\beta$ ” como é a condição T6, esta mudança foi menos significativa, porém ainda há um aumento do expoente de encruamento com a redução da temperatura. Os dados obtidos a partir da inclinação da região referente ao estágio II nas curvas K-M indicam que, de fato, há uma supressão parcial da recuperação dinâmica com o abaixamento da temperatura, pois os valores em módulo das inclinações são reduzidos a 77 K, em comparação com 298 K. Dessa forma, o aumento da resistência mecânica observado em baixa temperatura deve-se, principalmente, ao aumento da capacidade de acumulação de defeitos no material, principalmente de discordâncias.

#### 4. Conclusões

Os efeitos da variação da temperatura de deformação e da taxa de deformação foram sistematicamente estudados para a liga AA6061. Determinou-se que a redução da temperatura provoca um aumento do limite de escoamento e do

alongamento uniforme, independentemente da taxa de deformação aplicada. O efeito Portevin-Le Chatelier, associado à precipitação dinâmica, é suprimido em baixas temperaturas, o que pode contribuir para o aumento do alongamento uniforme. O expoente de encruamento aumentou com a redução da temperatura, sendo este efeito mais fortemente observado para 77 K. A sensibilidade à taxa de deformação apresenta valores positivos em temperatura criogênica e negativos a 298 K. As análises de Kocks-Mecking indicaram que mesmo em condições de microestrutura contendo precipitados, a redução da temperatura aumenta a taxa de encruamento pela supressão parcial dos mecanismos relacionados à recuperação dinâmica.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem o suporte financeiro da FAPESP (Processo nº 2014/15091-4) e do CNPq (Proc. 449009/2014-9). D. C. C. Magalhães agradece a bolsa de doutorado concedida pelo CNPq.

### **Referências**

1. XU, Z.; ROVEN, H. J.; JIA, Z. Mechanical properties and surface characteristics of an AA6060 alloy strained in tension at cryogenic and room temperature. *Materials Science and Engineering A*, v. 648, p. 350-358, 2015.
2. ROVEN, H. J.; STARKE, E. A. Effects of texture on delamination behavior of a 8090-type Al-Li alloy at cryogenic and room temperature. *Acta Materialia*, v. 24, p. 421-426, 1990.
3. HALIM, H.; WILKINSON, D. S.; NIEWCZAS, M. The Portevin-Le Chatelier (PLC) effect and shear band formation in AA5754 alloy. *Acta Materialia*, v. 55, p. 4151-4160, 2007.
4. PARK, D.; NIEWCZAS, M. Plastic deformation of Al and AA5754 between 4.2 K and 295 K. *Materials Science and Engineering A*, v. 491, p. 88-102, 2008.
5. PARK, D.; NIEWCZAS, M. Texture evolution in AA5754 alloy deformed in tension. *Materials Science and Engineering A*, v. 497, p. 65-73, 2008.
6. ESMAEILI, S. *et al.* The deformation behavior of AA6111 as a function of temperature and precipitation state. *Materials Science and Engineering A*, 2001.
7. DIETER, G. E. *Mechanical Metallurgy (SI Metric Edition)*. 3ª ed. Nova York: McGraw-Hill Company, 1988.

8. CHU, D.; MORRIS Jr, J. W. The influence of microstructure on work hardening in aluminum. *Acta Materialia*, v. 44, p. 2599-2610, 1996.

### **MECHANICAL PROPERTIES AT CRYOGENIC TEMPERATURE OF AA6061 ALLOY**

#### **ABSTRACT**

*Samples of AA6061 alloy were submitted to tensile and compression tests at 77 K, 173 K and 298 K in different precipitation conditions. The results indicated that at 77K there is an increase of the yield strength simultaneously with the uniform elongation. Furthermore, the work-hardening exponent at cryogenic temperatures is higher than at 298 K, whilst the strain rate sensitivity is positive at 77 K and 173 K. In addition, the Portevin-Le Chatelier effect, which appears at 298 K, is suppressed by temperature reduction, which is reflected in the increase of ductility. The work-hardening rate was also affected by temperature, as shown by Kocks-Mecking analysis of the compression curves. Thus, this set of results for the AA6061 alloy allows us to understand the tensile behavior at low temperatures and determine processing parameters.*

Keywords: AA6061; mechanical properties; cryogenic temperature; uniaxial tensile test; uniaxial compression test.