

EXTRUSÃO DE PÓS NANOESTRUTURADOS DE LIGAS DE ALUMÍNIO COMO UM PROCESSO TERMICAMENTE ATIVADO¹

Mauricio Mhirdau Peres²

João Batista Fogagnolo³

Cláudio S. Kiminami⁴

Walter José Botta Filho⁵

Claudemiro Bolfarini⁶

Alberto Moreira Jorge Júnior⁷

Resumo

O processamento a quente de materiais cristalinos é extensivamente analisado em termos de mecanismos relacionados com discordâncias. Neste trabalho, a extrusão de pós nanoestruturados será analisada a partir do ponto de vista de mecanismos de deformação ativados termicamente, tais como os que operam normalmente em materiais cristalinos. Pós nanoestruturados de ligas de alumínio foram conformadas por extrusão a quente, em uma máquina de ensaios universais, em 3 temperaturas diferentes 375, 400 e 425 °C com razão de extrusão de 10:1 e velocidades de 1, 15 e 30 mm/s. As tensões e taxas de deformação foram calculadas a partir dos dados experimentais de pressão e velocidade. O atrito e o trabalho redundante foram corrigidos através de equações apropriadas e os dados resultantes foram analisados utilizando equações típicas do trabalho a quente de materiais cristalinos, principalmente a equação de Sellars. Os dados obtidos foram comparados com os dados da literatura, para materiais cristalinos, processados por extrusão e torção a quente. A comparação foi realizada com dados que se estenderam por quatro ordens de grandeza para a taxa de deformação e duas ordens de grandeza para a tensão, e foram correlacionados como tendo o mesmo comportamento. Pode ser verificado que a extrusão a quente de materiais nanoestruturados também é um processo termicamente ativado, no qual o mecanismo controlador também é a escalagem ou o movimento severo de discordâncias. As mudanças microestruturais observadas durante a extrusão foram consistentes com os mecanismos de deformação propostos.

Palavras-chave: Extrusão; Pós nanoestruturados; Alumínio; Energia de ativação.

NANOSTRUCTURED ALUMINIUM POWDER ALLOY EXTRUSION AS A THERMALLY ACTIVATED PROCESS

Abstract

The hot-working process of crystalline materials has been extensively analysed in terms of dislocation mechanisms. In this work, the hot extrusion of nanostructured powders will be analysed from the point of view of thermally activated deformation mechanisms, such as normally operate in crystalline materials. Nanostructured aluminium powder alloy were deformed by hot extrusion, in a universal testing machine, over the temperature range of 375 to 425°C, with extrusion ratio of 10:1 and over the ram speed range of 1 to 30mm/s. Flow stresses and strain rates were calculated from experimentally pressure and speed data. The sliding friction and the redundant work were corrected by means of appropriated equations and the resultant data were analysed by means of typical equations from hot working of crystalline materials, mainly the Sellars equation. The experimentally data were compared with the crystalline materials literature data, processed of several ways. The comparisons was made with data extending over four orders of magnitude of strain rate and over two orders of magnitude of stress, and were correlated as having the same behaviour. It was concluded that the hot extrusion of nanostructured materials is a thermally activated process, in which the rate-controlling mechanism is either the climb of edge dislocations or the motion of jogged screw dislocation. The microstructural changes observed during extrusion were consistent with the proposed deformation mechanisms.

Key words: Extrusion; Nanostructured powders; Aluminum; Activation energy.

¹ Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

² Mestre - Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia de Materiais, Via Washington Luis, Km 235, São Carlos, SP, peresmm@yahoo.com.br

³ Doutor – Universidade São Francisco, Rua Alexandre Rodrigues Barbosa, 45, Itatiba, SP, joao.fogagnolo@saofrancisco.edu.br

⁴ Doutor – Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia de Materiais, Via Washington Luis, Km 235, São Carlos, SP, kiminami@power.ufscar.br

⁵ Doutor – Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia de Materiais, Via Washington Luis, Km 235, São Carlos, SP, wjbotta@power.ufscar.br

⁶ Doutor – Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia de Materiais, Via Washington Luis, Km 235, São Carlos, SP, cbolfa@power.ufscar.br

⁷ Doutor – Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia de Materiais, Via Washington Luis, Km 235, São Carlos, SP, moreira@power.ufscar.br

INTRODUÇÃO

Apesar do grande progresso no entendimento da tecnologia de extrusão de pós, principalmente os nanoestruturados, muito pouco é conhecido sobre os mecanismos que atuam durante o processamento deste tipo de material. Considerações prévias que descrevem a extrusão de pós têm indicado que a relação entre a velocidade de extrusão (V), pressão (P) e a temperatura (T) pode ser dada por equações do tipo:⁽¹⁻⁵⁾ $V = aP^b$ e $P = A'\exp(-\lambda T)$. Nestas equações, a e b são constantes que dependem da temperatura, A' é uma constante da velocidade de extrusão e λ é um “coeficiente” com valores diferentes para cada tipo de metal. Embora estas equações tenham aplicações bastante amplas, elas não contribuem muito com o entendimento dos fundamentos da deformação. Além disso, até o momento, a extrusão de pós não tem sido considerada como um processo termicamente ativado.

Esta lacuna é surpreendente porque o comportamento de pós nanoestruturados em processos de trabalho a quente é similar ao comportamento de materiais cristalinos em muitos aspectos. Na realidade, existe um conjunto de evidências experimentais^(4,5) que sugerem que a resposta em condições de trabalho a quente de pós nanoestruturados é semelhante àquelas que ocorrem no trabalho a quente de materiais cristalinos, apesar da diferença de muitas ordens de grandeza na taxa de deformação. Uma vez que o trabalho a quente de materiais cristalinos tem sido extensivamente analisado em termos de mecanismos que envolvem discordâncias, a comparação entre o processamento a quente de tais materiais com o de pós nanoestruturados processados por extrusão a quente é de grande valia, pois pode sugerir os possíveis mecanismos de deformação que atuam durante o processo. Neste trabalho, a extrusão a quente de pós de alumínio será examinada sob o ponto de vista de mecanismos de deformação termicamente ativados, como os que operam durante o trabalho a quente de materiais cristalinos.

MATERIAL E MÉTODOS

Pós de uma liga de alumínio solidificada rapidamente, com uma composição nominal de Al-3.0Fe-0.42Cu-0.37Mn (wt%) (Al3Fe), foram preparados via atomização em atmosfera de argônio. Foram obtidos pós nanoestruturados da liga com tamanho médio de grão de 25 nm. Pré-formas cilíndricas do pó nanoestruturado para o processo de extrusão, com densidade relativa de 0,96 e diâmetro inicial de 26,2 mm, foram preparadas via compressão a frio. A seguir, as pré-formas foram consolidadas em barras de 7.9 mm de diâmetro através de extrusão a quente em 3 temperaturas: 375, 400 e 425°C; com uma razão de extrusão de 10:1 e em 3 velocidades: 1, 15 e 30 mm/s. As microestruturas foram observadas com um microscópio eletrônico de transmissão.

A comparação direta entre os dados de extrusão (para materiais nanoestruturados ou não) e dados de outros ensaios de conformação, não pode ser feita, pois a pressão de extrusão não é a tensão verdadeira do material, como é o caso dos outros tipos de ensaio. Conseqüentemente, antes que tal análise possa ser realizada, a tensão efetiva que atua durante a extrusão deve ser determinada a partir da pressão de extrusão. Também deve ser determinada a taxa de deformação média a partir da velocidade de extrusão.

Os procedimentos para a correção do efeito da deformação homogênea, do atrito e do trabalho reduntante foram realizados de acordo com a metodologia descrita por Thomsen, Yang e Kobayashi.⁽⁶⁾

A deformação efetiva foi calculada utilizando a equação 1 e a taxa de deformação média no processo de extrusão pela equação 2:⁽⁷⁾

$$d\bar{\varepsilon} = \frac{dl}{l} \Rightarrow \bar{\varepsilon} = \int_0^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \quad (1) \quad \dot{\bar{\varepsilon}} = \frac{6VD_C^2 \tan \alpha}{(D_C^3 - D_E^3)} 2 \ln \frac{D_C}{D_E} \quad (2)$$

onde, l_0 é o comprimento inicial, e l é o comprimento final, V é a velocidade média de extrusão, D_C é o diâmetro inicial, D_E é o diâmetro final, e α é o semi-ângulo da zona morta do metal.

Para determinar as constantes envolvidas na determinação da energia de ativação, através da equação do seno hiperbólico de fluência, foi utilizado um método similar ao proposto por Uvira e Jonas,⁽⁸⁾ na resolução da equação 3.

Neste trabalho, a técnica de ajuste para a resolução de equações não-lineares (como é o caso da equação 3) consiste basicamente de um programa que compreende três algoritmos, que se utilizam dos métodos de Newton-Raphson, Steepest Descent e Marquardt para resolução de sistemas de equação, utilizando a técnica de mínimos quadrados. O programa desenvolvido para o ajuste é, em parte, uma variação das rotinas VA05A e MB11A (inversão de matrizes) da Harwel Subroutine Library (biblioteca disponível em FORTRAN), utilizada em computadores de grande porte, adaptada para micro-computadores.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

As duas aproximações experimentais usuais para a investigação da deformação em altas temperaturas exibem uma importante e comum característica. Na primeira aproximação, que corresponde à fluência, uma tensão constante é aplicada ao material a uma temperatura constante e a deformação resultante é registrada contra o tempo. Depois de um estado transiente inicial, existe um estado de taxa de deformação constante (estágio secundário de fluência), no qual uma condição de estado estacionário é estabelecida que é sensível à variação tanto da tensão aplicada quanto da temperatura.

Na segunda aproximação, é aplicada uma taxa de deformação constante e a tensão é registrada. Isto corresponde à situação dos ensaios de torção ou compressão a quente, onde, a grosso modo, é observado que, para uma temperatura constante, existe um crescimento inicial da tensão até um estado estacionário que é mantido até deformações muito altas. No estado estacionário a tensão é sensível à variação tanto da taxa de deformação quanto da temperatura.⁽⁹⁾ Este estado estacionário é análogo ao estado estacionário de fluência e, com o qual, tem muitas características em comum.

Dependência da taxa de deformação com a tensão:

De forma a avaliar a dependência da taxa de deformação com a tensão em condições de extrusão dos pós nanoestruturados e comparar esta dependência com os de materiais cristalinos, os dados de extrusão obtidos foram analisados de acordo com as equações de potência, exponencial e do seno hiperbólico de fluência.

Quando a tensão média efetiva ($\bar{\sigma}$) e a as taxas de deformação médias ($\dot{\bar{\varepsilon}}$) (por simplicidade serão denotados apenas por σ e $\dot{\varepsilon}$ respectivamente), dos dados de extrusão dos pós nanoestruturados, foram plotados em um gráfico log-log, foram obtidas retas convergentes, com inclinações diferentes, mostrando que:

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^{n'} \quad [1]$$

onde A_1 e n' são constantes dependentes da temperatura. A inclinação n' diminuiu de 12 a 375°C para 6 a 425°C, de uma maneira análoga àquela observada em fluência de alumínio.⁽¹⁰⁻¹²⁾ Quando o $\log(\dot{\epsilon})$ foi plotado contra a σ , retas paralelas foram obtidas apenas em tensões superiores a 30MPa, mostrando que, acima destas tensões, a taxa de deformação é dada por:

$$\dot{\epsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp(-\Delta H/RT) \quad [2]$$

onde A_2 é uma constante independente da temperatura, β é uma constante, ΔH é uma energia de ativação experimental e R é a constante universal dos gases.

Como a equação 2 é válida apenas em uma parte da faixa experimental e a equação 1 não serve para a determinação da energia de ativação, os dados também foram analisados de acordo com a equação do seno hiperbólico:

$$\dot{\epsilon} = A_3 [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp(-\Delta H/RT) \quad [3]$$

onde A_3 , α , n e ΔH são constants. Esta equação foi proposta por Garofalo,⁽¹³⁾ para a correlação de dados de fluência e adaptada e aplicada em ensaios de torção a quente por Sellars e Tegart.⁽¹⁴⁾

Na figura 1a observa-se que o $\log(\dot{\epsilon})$ é uma função do $\log \sinh(\alpha\sigma)$, usando um valor de α de 0,04821 MPa⁻¹. Como pode ser observado na Figura 1a, é aparente que os dados de extrusão dos pós nanoestruturados são muito bem descritos pela equação do seno hiperbólico. Pode ser notado que as retas com inclinação constante e igual a 3,3 são obtidas em toda a faixa de tensões. O fato de um valor constante de α ter sido usado e que a inclinação n é independente da temperatura suporta a observação de Sellars e Tegart⁽¹⁴⁾ que α e n são amplamente independentes da temperatura.

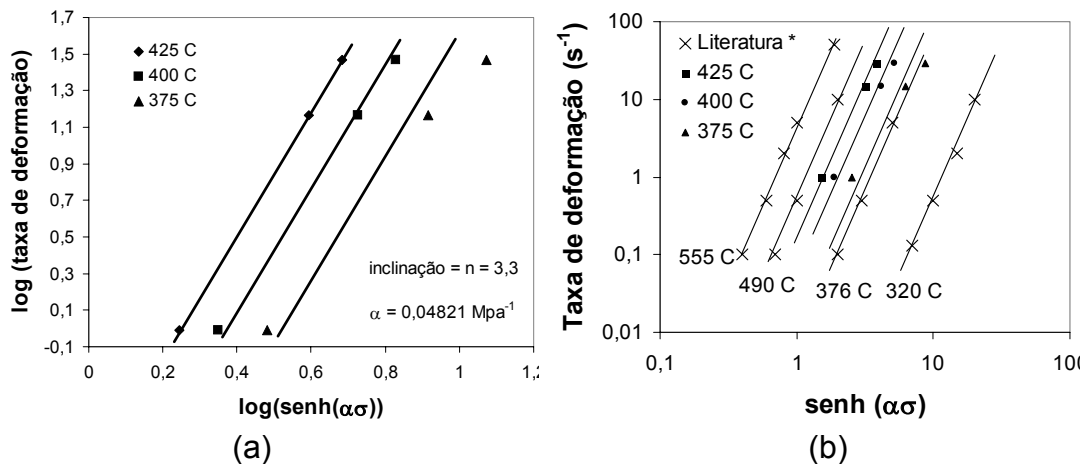


Figura 1 – (a) Dados da extrusão de pós nanoestruturados da liga Al_3Fe , plotados para mostrar a aplicabilidade da lei do seno hiperbólico (equação 3). (b) Gráfico dos dados de extrusão a quente da Figura 1a em conjunto com os dados de extrusão a quente de alumínio cristalino comercial da literatura (15), onde é apresentada a compatibilidade dos dados de trabalho a quente obtidos em altas taxas de deformação e grandes deformações tanto de pós nanoestruturados como de alumínio cristalino. Dados plotados de acordo com a equação 3.

A partir desta discussão sobre a relação entre tensão e taxa de deformação para os dados de extrusão a quente de pós nanoestruturados, é aparente que as equações de fluência, já bem estabelecidas, podem ser usadas satisfatoriamente para descrever o fenômeno. A similaridade da dependência da tensão com a taxa de

deformação de extrusão com aquela apresentada por fluência é razoavelmente surpreendente, já que as taxas de deformação de extrusão são muitas ordens de grandeza superiores às encontradas em fluência. Entretanto, esta observação confirma a sugestão anterior de que a extrusão a quente de pós nanoestruturados pode ser considerada como sendo uma extensão lógica de fluência de alta temperatura ou qualquer outro processo de trabalho a quente. Do ponto de vista da resposta do material, conseqüentemente, os vários processos aparecem como sendo intrinsecamente similares. Como será visto mais adiante, os mecanismos de deformação que operam durante a fluência ou em trabalho a quente são realmente similares, mas, antes desta discussão, será realizada uma comparação das relações tensão x taxa de deformação com os dados de extrusão a quente de materiais cristalinos.

Comparação da dependência da tensão de pós nanocristalinos com outros materiais:

A Figura 1b apresenta os dados de outros autores⁽¹⁵⁾ para a extrusão a quente de barras de alumínio cristalino com pureza comercial (99,73%Al) comparados com os dados experimentais deste trabalho. Os dados se estendem sobre uma faixa de 4 ordens de grandeza de taxas de deformação. Considerando a larga faixa de taxas de deformação e lembrando a diferença de composição entre os dois materiais comparados, a aderência dos dados de trabalho a quente com as equações de fluência é extremamente próxima, com as constantes da equação tomando valores similares. Existe, entretanto, uma pequena diferença de inclinação, n , entre os dados da literatura e os dados experimentais. Os dados da literatura apresentam um valor de $n = 4,0$ e os dados experimentais com $n = 3,3$. A diferença entre os valores de n pode ser observada mais claramente na Figura 2a, onde é apresentado um gráfico de Z ($Z = \dot{\epsilon} \exp[\Delta H / RT]$) contra $\log(\sinh(\alpha\sigma))$. Entretanto, ambos os conjuntos de dados podem ser correlacionados com uma linha média, com um pequeno espalhamento de dados. Esta diferença nos valores de n está de acordo com observações quanto à diferença de materiais observadas comumente em processamento a quente de materiais cristalinos.

Dependência da taxa de deformação com a temperatura:

A comparação da dependência da taxa de deformação com a temperatura, em extrusão a quente de pós nanoestruturados com materiais cristalinos, pode ser feita através da comparação das energias de ativação experimentais de ambos os casos. O cálculo da energia de ativação para os dados deste trabalho de acordo com o método proposto por Uvira e Jonas⁽⁸⁾ para a resolução da equação 3, conforme procedimentos descritos na metodologia. Graficamente, o método proposto por Uvira e Jonas considera que a equação 3 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\dot{\epsilon} = cte \times [f(\sigma)]^n \times \exp(-\Delta H/RT) \quad [4]$$

Analisando-se a equação 4, observa-se que pode ser construído um gráfico de $\log(\dot{\epsilon})$ como uma função de T^{-1} , com σ constante. A inclinação deste gráfico é proporcional a ΔH , isto é:

$$\left(\frac{\delta \log \dot{\epsilon}}{\delta T^{-1}} \right)_{\sigma} = \frac{-\Delta H}{2,3R} \quad [5]$$

onde $\dot{\epsilon}$ e T são medidos experimentalmente na faixa de interesse. Entretanto, o cálculo de ΔH com tensão constante envolve extensivas extrapolações e interpolações de dados experimentais de tensão-taxa de deformação, como pode ser observado na Figura 1b.

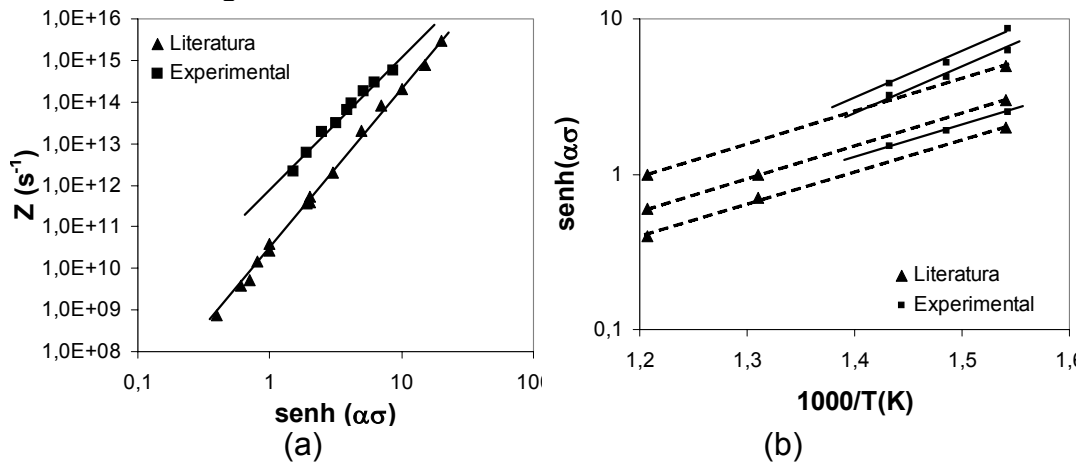


Figura 2 – (a) Gráfico de dados de extrusão a quente, da literatura (15) e do presente trabalho, utilizado para ilustrar a diferença de inclinação n para ambos os materiais. (b) Gráfico do $\sinh(\alpha\sigma)$, em taxas de deformação constantes, como uma função de $1/T$, a partir do qual as inclinações são usadas para determinar a energia de ativação para o trabalho a quente. (literatura (15))

A forma alternativa para o cálculo de ΔH foi o de utilizar a seguinte expressão:

$$-\left(\frac{\delta \log \dot{\epsilon}}{\delta \log f(\sigma)}\right)_T \times \left(\frac{\delta \log f(\sigma)}{\delta T^{-1}}\right)_{\dot{\epsilon}} = \left(\frac{\delta \log \dot{\epsilon}}{\delta T^{-1}}\right)_{\sigma} = \frac{-\Delta H}{2,3R} \quad [6]$$

onde cada um dos termos do lado esquerdo da equação pode ser obtido a partir de medidas experimentais (Figuras 1b e 2b, respectivamente). A Figura 2b apresenta o comportamento da dependência da tensão com a temperatura, em taxas de deformação constantes. As inclinações das retas são utilizadas na metodologia para a determinação da energia de ativação, assim como as inclinações da Figura 1b.

A Tabela 1 apresenta o resultado do cálculo da energia de ativação dos dados deste trabalho comparando com os dados obtidos na literatura para torção a quente e alumínio puro⁽¹⁴⁾ e extrusão a quente e alumínio comercial.⁽¹⁵⁾ Os valores encontrados são similares e são aproximadamente iguais àqueles apresentados pela autodifusão. Este resultado sugere que a resposta às variações de temperatura dos pós nanoestruturados, durante a extrusão a quente, é similar àquelas observadas em materiais cristalinos.

Uma comparação melhor entre os dados deste trabalho e os dados de materiais cristalinos pode ser observada na Tabela 2, que resume as constantes obtidas neste trabalho e na literatura.^(14,15) n , α , ΔH e A_3 . É evidente que as constantes da equação 3 têm valores similares para os três materiais, tanto em extrusão quanto em torção a quente. Isto também suporta o argumento que a extrusão a quente de pós nanoestruturados, sob processamento a quente em geral, são processos de deformação termicamente ativados, assim como os materiais cristalinos, mesmo com diferenças nas taxas de deformação.

A partir dos valores listados na Tabela 2 pode ser observado que a extrusão a quente dos pós nanoestruturados é um processo controlado por difusão, assim como para materiais cristalinos. A dependência da tensão observada experimentalmente neste trabalho e as evidências de variações micro/subestruturais que acontecem durante a extrusão dos pós, apresentadas na Figura 3, sugerem que o mecanismo

controlador do movimento e geração de discordâncias pode ser deslizamento cruzado ou ainda a escalagem das mesmas, como é o caso de materiais cristalinos sendo processados a quente.

Tabela 1 – Energias de Ativação para extrusão e torção a quente, (equação 6)

Dados	$\left(\frac{\delta \log \dot{\epsilon}}{\delta \log f(\sigma)}\right)_T$ *	$\left(\frac{\delta \log f(\sigma)}{\delta T^{-1}}\right)_{\dot{\epsilon}} \times 10^{-3}$ **	ΔH (kcal/mol)
Literatura(14)	4,0	2060	37,4
Literatura(15)	4,8	1710	37,3
Experimentais	3,3	1444	39,2

* Valores podem ser obtidos a partir das retas da Figura 1b.

** Valores podem ser obtidos a partir das inclinações das retas da Figura 2b.

Obs: Dados deste trabalho convertidos para kcal, para manter a originalidade dos dados da literatura.

Tabela 2 – Resumo das constantes n, α , ΔH e A_3 , para extrusão e torção a quente

Temperatura (°C)	n	α (ksi ⁻¹)	ΔH (kcal/mol)	A_3	Comentários
320	4,0	0.30	37,4	$0,28 \times 10^{10}$	Extrusão (15): Alumínio de pureza comercial (99,73%Al)
376	4,0	0.30	37,4	$2,00 \times 10^{10}$	
445	4,0	0.30	37,4	$2,34 \times 10^{10}$	
490	4,0	0.30	37,4	$2,34 \times 10^{10}$	
555	4,0	0.30	37,4	$2,51 \times 10^{10}$	
195	4,8	0,31	37,3	$5,60 \times 10^{12}$	Torção (14): Alumínio de alta pureza (composição não especificada)
280	4,8	0,31	37,3	$0,40 \times 10^{12}$	
380	4,8	0,31	37,3	$4,80 \times 10^{12}$	
450	4,8	0,31	37,3	$2,82 \times 10^{12}$	
480	4,8	0,31	37,3	$2,09 \times 10^{12}$	
550	4,8	0,31	37,3	$1,41 \times 10^{12}$	
375	3,3	0.30	39,2	$6,84 \times 10^{11}$	Extrusão trabalho atual (Al- 3.0Fe-0.42Cu-0.37Mn)
400	3,3	0.30	39,2	$7,82 \times 10^{11}$	
425	3,3	0.30	39,2	$6,70 \times 10^{11}$	

Obs: Dados deste trabalho convertidos para ksi e kcal, para manter a originalidade dos dados da literatura.

A Figura 4 é uma representação gráfica dos dados apresentados na Tabela 2I, mostrando a compatibilidade dos dados de extrusão para materiais cristalinos e pós nanoestruturados. Esta Figura é similar à Figura 2a onde Z é dividido por A_3 , de forma a eliminar a influência da diferença de composição entre o alumínio comercial da literatura⁽¹⁵⁾ e da liga utilizada neste trabalho.

Assim, os dados experimentais de extrusão de pós e de materiais cristalinos, dentro de uma larga faixa de 4 ordens de grandeza na taxa de deformação e duas ordens de grandeza em tensão, podem ser representados da mesma forma pela equação 3 e utilizando as mesmas constantes para os dois materiais, com um pequeno espalhamento nos dados. A inclinação da reta da Figura 4 é 3,73.

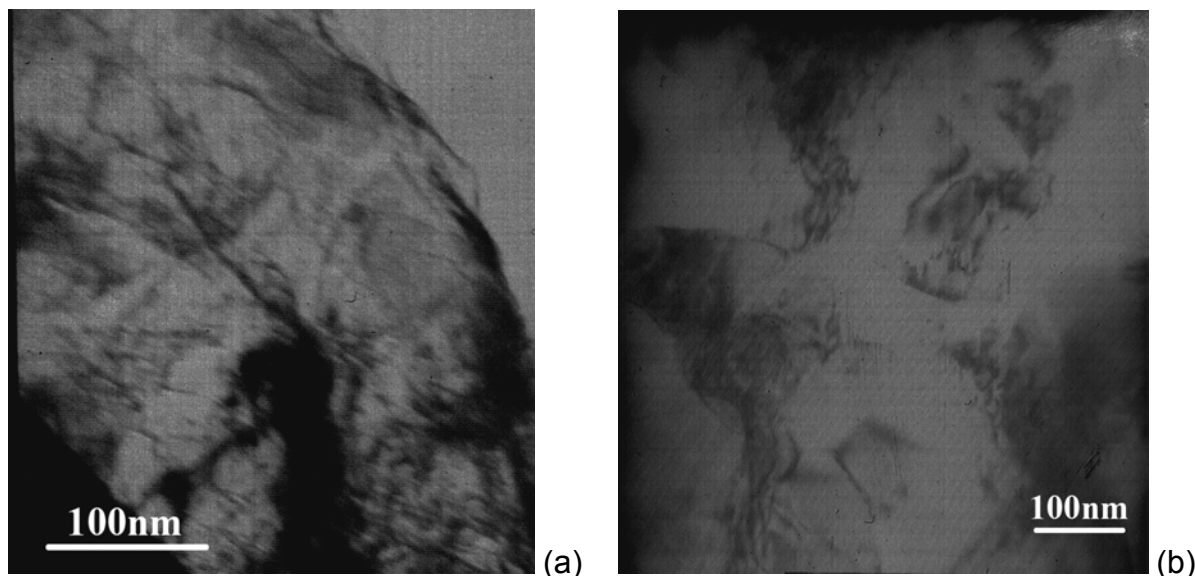


Figura 5 – Micrografias eletrônicas de transmissão, representando as modificações na subestrutura associadas com uma diminuição de Z . (a) 375°C (b) 425°C. Ambas a 29,3 s⁻¹.

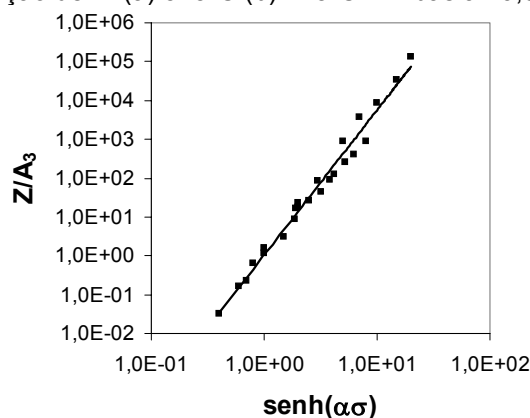


Figura 6 – Gráfico do $\log(Z/A_3)$ como uma função do $\log(\sinh \alpha \sigma)$, que ilustra a compatibilidade dos dados de extrusão a quente de pós nanoestruturados com os dados de extrusão a quente de materiais cristalinos, compatibilidade esta que se estende por uma faixa de 4 ordens de grandeza na taxa de deformação e 2 ordens de grandeza na tensão.

CONCLUSÕES

- Os resultados deste trabalho, comparados aos resultados da literatura, indicam que os dados de extrusão a quente de pós nanoestruturados podem ser descritos a partir de equações já bem estabelecidas de fluência, usando constantes similares para aos dos materiais cristalinos. Esta observação é válida dentro de uma vasta faixa de taxas de deformação e de temperaturas.
- A energia de ativação para a extrusão de pós nanoestruturados obtidas neste trabalho são similares àquelas encontradas em extrusão e torção a quente de materiais cristalinos e para a autodifusão. Isto indica que o mecanismo controlador do movimento e geração de discordâncias para a extrusão a quente de pós nanoestruturados é controlado por difusão.
- Comparações dos dados deste trabalho com dados da literatura para extrusão e torção a quente de materiais cristalinos, utilizando leis de tensão teóricas para mecanismos de deformação controlados por difusão e com a observação das variações microestruturais sugerem que o mecanismo controlador do movimento e

geração de discordâncias pode ser deslizamento cruzado ou ainda a escalagem das mesmas.

REFERÊNCIAS

- 1 P. Kropp. Cold Extrusion of Powder Mixtures with Cold Sprayed Fat Particles, Doctor of Technical Sciences Thesis submitted to the Swiss Federal Institute of Technology Zürich, Zürich 2002, 229 paginas, p.38.
- 2 J. B. Fogagnolo, M. H. Robert, E. M. Ruiz-Navas and M. Torralba. Extrusion of mechanically milled composite powders. *Journal of Materials Science*, v. 37, p. 4603 – 4607, 2002.
- 3 S. O. Onuh, M. Ekoja, M. B. Adeyemi. Effects of die geometry and extrusion speed on the cold extrusion of aluminium and lead alloys. *Journal of Materials Processing and Technology*, v.132, p. 274-285, 2003.
- 4 [L. Ma, T. F. Zahrah, R. Fields. Processing and simulation of consolidation of amorphous aluminum-based powder material, in: *Proceedings of IMEC'03, 2003 ASME Intern. Mech. Eng. Cong.*, Washington, D.C., Nov. 15-21, 2003.
- 5 F. F. Kraft and C. Powers. Optimizing extrusion through effective experimentation and analysis, Aluminum Association and the Aluminum Extruders Council, pp. 43-49, 2000.
- 6 E.G. Thomsen, C.T. Yang and S. Kobayashi. *Mechanics of Plastic Deformation in Metal Processing*, The Macmillan Company, New York, p. 279, 1965.
- 7 A.F. Castle and T. Sheppard. Hot working theory applied to extrusion of some aluminum alloys, *Met Technology*, v. 3, n. 10, 1976.
- 8 J.L. Uvira and J.J. Jonas. Hot Compression of Armco Iron and Silicon Steel *Trans.Met.Soc.,AIME*, v.242, pp.1619-1626, 1968.
- 9 H.J. McQueen and J.J. Jonas. Recovery and Recrystallization during High Temperature Deformation, in: *Treatise on Materials Science - v.6, Plastic Def. of Materials*, R.J. Arsenault, Academic Press, pp. 393-493, 1.975.
- 10 O. D. Sherby and O. A. Ruano. Rate-controlling processes in creep of subgrain containing aluminum materials. *Materials Science and Engineering A*, v. 410-411, pp. 8-11, 2005.
- 11 F.R.N. Nabarro. Creep in commercially pure metals. *Acta Materialia*, v. 54, n. 2, pp. 263-295, 2006.
- 12 R. Carmona, Q. Zhu, C.M. Sellars and J.H. Beynon. Controlling mechanisms of deformation of AA5052 aluminium alloy at small strains under hot working conditions, *Materials Science and Engineering A*, v. 393, n. 1-2, pp. 157-163, 2005.
- 13 F. Garofalo. An Empirical Relation Refining the Stress Dependence of Minimum Creep Rate in Metals, *Transaciton TMS-AIME*, v. 227, pp. 351-356, 1963.
- 14 C.M. Sellars and W.J. McG Tegart. La Relation entre la Résistance et la Structure dans la Déformation à Chaud. *Mém. Sci. Rev. Mét.*, v. 63, n. 9, pp. 731-746, 1966.
- 15 H.J. McQueen, W.A. Wong and J.J. Jonas. Deformation of aluminum at high temperatures and strain rates, *Canadian Journal of Physics*, v. 45, pp. 1225-1234, 1967.