

PARÂMETROS DE PROCESSO, MICROESTRUTURA E TEXTURA DAS LIGAS DE ALUMÍNIO AA6063 E AA6082 EXTRUDADAS¹

Rodrigo Camargo Campana²
Ronald Lesley Plaut³

Resumo

O desenvolvimento de ligas de alumínio de propriedades mecânicas intermediárias possibilitou a extrusão de alumínio a participar de grandes mercados como a construção civil, transportes, automobilística, estruturas entre outras. O conhecimento do processo de extrusão propicia o aumento de produtividade com melhor desempenho e precisão dimensional do produto acabado. Neste trabalho, procurou-se analisar as características de conformação de perfis sólidos das ligas de alumínio AA6063 e AA6082 com razão de extrusão (RE) variando de 2,0 a 27,8. A partir da extrusão realizada em uma prensa industrial de 3300 toneladas de força compararam-se os resultados obtidos da tensão média de escoamento ($\bar{\sigma}$) em função da temperatura de deformação e do parâmetro de Zener-Hollomon (Z). Foram obtidos, em condições industriais, para estas ligas os valores da constante α que relaciona a RE com a pressão de fim de extrusão. Foram realizadas observações metalográficas e constatadas que produtos com maior RE possuem menor heterogeneidade entre o tamanho de grão do centro e da superfície do perfil extrudado. Em termos de textura foi possível obter as figuras do tipo FDO no perfil extrudado ilustrando a presença de fibras do tipo β (característica de produto conformado) e cubo (característica de produto recristalizado/recuperado). Os resultados confirmam valores próximos àqueles encontrados na literatura.

Palavras-chave: Extrusão; Alumínio; Zener-Hollomon; Textura.

PROCESS PARAMETER, MYCROSTRUCTURE AND TEXTURE OF EXTRUDED AA6063 AND AA6082 PROFILES

Abstract

The development of medium strength aluminum alloys enabled aluminum extrusions to take part of the large world markets, associated with the building, transport and automotive industries, amongst several. The knowledge of the extrusion process details enables the productivity increase with better performance and higher dimensional accuracy of the finished extrusion product. In the present study the deformation characteristics of solid extrusion profiles in the AA6063 and AA6082 alloys with extrusion ratios (ER) in the range of 2.0 to 27.8. Extrusions are carried out in an industrial 3300 ton press. Results are compared in terms of average flow stress as a function of extrusion temperature and of the Zener-Hollomon (Z) parameter. Under industrial conditions, for the studies alloys, the values of the α -constant has been evaluated which relates the end pressure to the extrusion ratio. Metallographic observations have been conducted to study that products with high ER have less heterogeneity of grain size between surface and middle of extruded profile. In terms of texture components it has been observed that the ODF's figure of the extruded product presented in the β (characteristic of rolled/worked products) and cube (characteristic of recrystallized/recovered products). The results obtained confirmed those reported in the literature.

Key words: Extrusion; Aluminum; Zener-Hollomon; Texture.

¹ *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

² *Engenheiro de Processo do Departamento de Extrusão da Companhia Brasileira de Alumínio e Mestre pelo Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.*

³ *Ph.D., Professor Associado do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.*

1 INTRODUÇÃO

A extrusão de alumínio é um processo termomecânico no qual um tarugo é submetido ao aquecimento e forçado a fluir por um orifício de uma ferramenta com o auxílio de uma prensa.⁽¹⁾

O desenvolvimento de ligas de alumínio cujas propriedades mecânicas são intermediárias introduziu os perfis extrudados de alumínio em outros mercados como a Construção Civil, Transportes, Automobilística; Industrial e Estruturas.

O conhecimento de como o alumínio se comporta antes, durante e após a extrusão fornece dados para que se possa melhorar não somente o desempenho de equipamentos, mas também para aperfeiçoar o processo de extrusão e desta forma melhorar às propriedades mecânicas para as aplicações mais exigentes do mercado.

2 OBJETIVOS

Os objetivos do presente trabalho são: em termos de processo de extrusão (Efetuar análise das variáveis do processo de extrusão para as ligas AA6063 e AA6082 e relacioná-las em termos da pressão de extrusão, razão de extrusão (RE), tensão de deformação, velocidade e temperatura de extrusão; Prever a pressão de fim a partir de constantes e equações disponíveis na literatura; Calcular o valor da constante de deformação das ligas AA6082 e AA6063 (equação 5)); Caracterização em termos de microestrutura e textura tipo função distribuição orientação (FDO) da liga AA6082.

3 EXTRUSÃO

Foram extrudados quatro perfis sólidos em forma de barras redondas com razão de extrusão (RE) crescente, sendo que, como matéria prima principal, foram utilizados tarugos de 10 polegadas de diâmetro (254 mm), nas ligas AA6063 e AA6082 (tabela 1), homogeneizado e não torneado. Entende-se por razão de extrusão (RE), como sendo a relação entre a área do tarugo e a área do perfil extrudado.

A prensa utilizada é do tipo horizontal, marca Schloeman, de 3300 toneladas de força, com pressão nominal máxima de 250 bar (25 MPa) da Companhia Brasileira de Alumínio, (CBA-Alumínio-SP-Brasil), apresentada na Figura 1.

Os tarugos foram aquecidos em um forno a gás acoplado a uma tesoura (Hot-Shear), sendo que os tarugos foram extrudados na prensa de maneira contínua. As ferramentas foram aquecidas em forno a gás com atmosfera protetora (nitrogênio). Após 4 horas à 450°C, a ferramenta foi conduzida à prensa, a qual foi alimentada com os tarugos para iniciar o ciclo de extrusão dos perfis.

O sistema empregado no resfriamento dos perfis extrudados foi o leito de água e, para aquisição de dados de temperatura, foram utilizados termopares de contato Tipo K (Cromel-Alumel) com leitor marca Salvterm 1200K (para a determinação da temperatura do tarugo) e o sistema laser marca 3T, modelo P2000, (para a determinação da temperatura de saída da prensa de extrusão).

A tabela 2 indica os parâmetros de processo utilizados durante a extrusão dos perfis.

Tabela 1: Composição Química (%peso) NBR 6834:2006. ⁽²⁾

Liga	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti
AA6063	0,20-0,60	0,45-0,90	0,35	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
AA6082	0,70-1,30	0,60-1,20	0,50	0,10	0,40-1,00	0,25	0,20	0,10



Figura 1: Prensa Schloeman de 3300 toneladas da Companhia Brasileira de Alumínio.

Tabela 2: Parâmetros de processo utilizados durante a extrusão.

Característica	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3	Experimento 4	Experimento 5	Experimento 6	Experimento 7	Experimento 8
Perfil	RE 27,8 - 6063	RE 27,5 - 6082	RE 19,3 - 6063	RE 19,3 - 6082	RE 6,1 - 6063	RE 6,1 - 6082	RE 2,0 - 6063	RE 2,0 - 6082
Peso real médio (kg/m)	4,924	4,961	7,089	7,080	22,455	22,665	67,602	67,155
Diâmetro médio do perfil extrudado (mm)	48,19	48,37	57,82	57,78	102,90	103,38	178,55	177,96
Velocidade de extrusão média (m/min)	20,91	16,62	16,89	11,26	8,98	5,53	2,80	1,98
Velocidade de pistão médio (mm/s)	11,4	9,0	13,1	8,7	22,2	13,6	20,7	14,5
Comprimento médio do tarugo (mm)	1014	991	1111	1111	1177	1177	823	831
Pressão máxima média da máquina (BAR)	150	161	144	161	141	165	73	89
Temperatura de aquecimento médio de tarugo (°C)	484	486	487	489	481	447	485	474
Temperatura média do recipiente (°C)	430	430	428	428	429	428	429	428
Temperatura emergente médio (°C)	523	515	523	510	501	490	501	487
Temperatura da ferramenta (°C)	450	450	450	450	450	450	450	450
Temperatura após resfriamento (°C)	65	60	65	59	63	63	50	50
Força de extrusão final média (Toneladas)	958	982	779	861	548	625	170	183
Força de extrusão inicial média (Toneladas)	2055	2258	1956	2274	1759	2238	858	1110

A Figura 2a apresenta a evolução da força de extrusão em função do tempo e da razão de extrusão para a liga AA6063. Nesta figura observa-se que os perfis com maior razão de extrusão (27,8 e 19,3) possuem maior força de pico e de fim. Isto é resultado da maior dificuldade verificada no início de extrusão, uma vez que a liga de alumínio precisa fluir por um orifício menor, quando comparado com as barras redondas de maior diâmetro (RE = 6,0 e RE = 2,0).

Observa-se, ainda nesta figura, o menor tempo de extrusão associado aos perfis de menor RE, uma vez que estes perfis apresentam menor resistência ao escoamento, podendo ser extrudados com uma maior velocidade de pistão (RE de 27,8 na liga AA6063 - 11,4mm/s e na liga AA6082 - 9,0mm/s e RE de 2,0 na liga AA6063 - 20,7mm/s e na liga AA6082 - 14,5mm/s).

Outro aspecto a ser notado é a presença da inflexão na curva de força de extrusão experimental em função do tempo de extrusão verificada no fim de extrusão nos perfis de maior RE, dada a maior dificuldade de escoamento do alumínio, e, conseqüentemente, mantendo a pressão de extrusão elevada. Esta inflexão é praticamente inexistente nos perfis com baixa RE. A Figura 2b apresenta a evolução da força de extrusão em função do tempo e da razão de extrusão e das ligas AA6063 e AA6082. Em ambas as RE observa-se que na liga AA6082 a força e o tempo de extrusão são superiores quando comparados à liga AA6063. Este resultado é devido à maior resistência a conformação da liga AA6082 que possui uma quantidade maior de elementos de liga tal como Si, Mg e Mn.

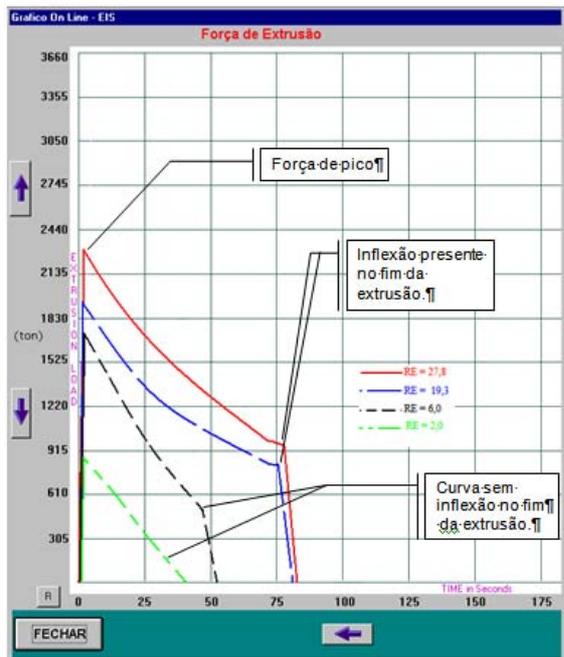


Figura 2a: Gráfico de resposta de prensa em função da RE para a liga AA6063.

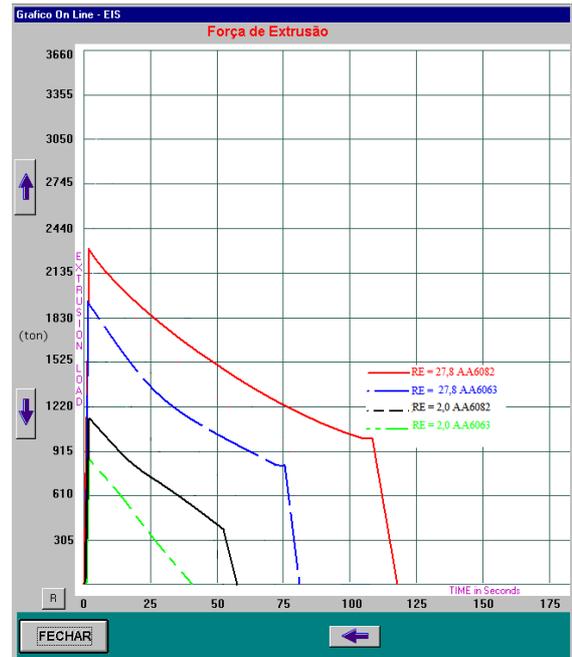


Figura 2b: Gráfico de resposta de prensa em função da RE para as ligas AA6063 e AA6082.

4 PARÂMETRO DE PROCESSO DE EXTRUSÃO

Na avaliação da força de extrusão, um dos parâmetros principais é a tensão de escoamento (σ) que, por sua vez, é função do material a ser extrudado, da deformação (ε) (ou seja, da RE), da taxa de deformação ($\dot{\varepsilon}$) e da temperatura (T). A equação comumente empregada para descrever a curva tensão-deformação de um metal policristalino deformado a quente é dada por:⁽³⁾

$$\sigma = C \dot{\varepsilon}^m \quad (1)$$

onde, a constante C e o expoente m dependem do material.

Esta equação descreve um comportamento parabólico da deformação plástica a quente, porém, por não se tratar de uma equação de estado, no sentido termodinâmico, é influenciada pela seqüência de deformação.⁽⁴⁾ Portanto, fatores como a taxa de deformação e a temperatura (na qual ocorre a deformação), influenciam a tensão de deformação (σ).⁽⁵⁾

Zenner e Hollomon sugeriram um parâmetro (Z) que reúne a taxa de deformação e a temperatura conforme a relação que foi posteriormente modificada por outros pesquisadores para a tensão de escoamento no estado estacionário.^(3,6)

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A [\sinh(\alpha \bar{\sigma})]^n \quad (2)$$

onde Q é a energia de ativação da deformação, $\dot{\varepsilon}$ é a taxa de deformação média equivalente, R a constante universal dos gases ($8,318 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), sendo A e n constantes dependentes do material, e α uma constante cujo valor depende da taxa de deformação e da temperatura T (absoluta) do tarugo, medida na região de máxima deformação, próxima ao orifício de saída,⁽⁷⁾ dada por:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{T_T} + \frac{1}{T_E} \right) \quad (3)$$

onde T_T é a temperatura de aquecimento do tarugo e T_E é a temperatura emergente do perfil.⁽⁸⁾

O valor da taxa de deformação $\dot{\varepsilon}$ pode ser calculado a partir da equação de Feltham dada por:^(4,6)

$$\dot{\varepsilon} = \frac{6V_R D_B^2 (0,171 + 1,86RE) \tan(38,7 + 6,9 \ln RE)}{D_B^3 - D_E^3} \quad (4)$$

onde V_R é a velocidade do pistão, D_B é o diâmetro do tarugo extrudado, RE é a razão de extrusão e D_E é o diâmetro equivalente, ou seja, o diâmetro do perfil extrudado circular de mesma área de seção do perfil em estudo.^(6,9)

A equação 4 foi desenvolvida especificamente para produtos extrudados que, com o auxílio das equações 3 e 5, conduzem a uma boa aproximação das condições reais de extrusão. Estas serão utilizadas nos cálculos do presente trabalho.

5 CÁLCULO DE TENSÃO DE DEFORMAÇÃO EXPERIMENTAL MEDIA ($\bar{\sigma}$)

De acordo com Hughes et al.,⁽¹⁰⁾ para o cálculo da tensão de deformação experimental ($\bar{\sigma}$) pode-se utilizar a seguinte relação:

$$P = \alpha \bar{\sigma} \ln(RE) \quad (5)$$

onde P é a pressão no final de extrusão experimental, pois, neste momento, não há mais atrito entre a parede do recipiente e o tarugo, e onde α é uma constante que varia entre 1,1 a 1,3.

6 CÁLCULO DA PRESSÃO DE PICO

Para o cálculo da pressão de pico na extrusão empregou-se a equação desenvolvida por Sheppard:⁽⁷⁾

$$P_{calc} = \frac{1}{\alpha n} \left\{ A + B \ln \lambda RE + C \left[\ln \lambda^2 \left(\frac{Z}{A} \right) \right] + D \left(\frac{L}{D_B} \right) \left[\ln \lambda^2 \left(\frac{Z}{A} \right) \right] \right\} \quad (6)$$

onde P_{calc} é a pressão calculada, A , B , C e D são constantes de extrusão, obtidas por experimentos práticos de extrusão de perfis de geometria simples, e λ o fator de forma definido como a razão entre o perímetro do perfil extrudado e o perímetro do extrudado circular de mesma área de seção do perfil em estudo.⁽⁶⁾

A tabela 3 apresenta os valores referentes aos cálculos dos parâmetros de conformação ocorridos durante a extrusão.

Tabela 3: Cálculos dos parâmetros de conformação ocorridos durante a extrusão.

Característica	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3	Experimento 4	Experimento 5	Experimento 6	Experimento 7	Experimento 8
RE/Liga	RE 27,8 - 6063	RE 27,6 - 6082	RE 19,3 - 6063	RE 19,3 - 6082	RE 6,1 - 6063	RE 6,0 - 6082	RE 2,0 - 6063	RE 2,0 - 6082
Taxa de deformação média (s ⁻¹)	3,07	2,42	2,86	1,91	2,36	1,44	0,97	0,68
Ln Z média (s ⁻¹)	22,98	25,06	22,95	24,82	23,55	25,23	22,18	24,16
Temperatura na região de deformação média (°C)	505	488	504	488	477	467	493	477
Tensão de deformação de pico experimental média (MPa)	48	49	44	48	51	58	40	43
Tensão de deformação de pico calculado média (MPa)	48	48	44	49	50	58	41	43
Pressão de pico experimental média (MPa)	377	414	359	417	323	410	157	204
Pressão de pico calculada média (MPa)	380	403	357	423	318	408	160	205
Tensão de deformação de fim experimental média (MPa)	48	50	44	48	51	58	40	43
Tensão de deformação de fim calculado média (MPa)	46	48	46	49	49	57	40	43
Pressão de fim experimental média (MPa)	176	180	143	158	100	115	31	34
Pressão de fim calculada média (MPa)	169	175	151	161	98	113	31	34

Ao contrário da metodologia empregada por Sheppard,⁽⁶⁾ que utilizou as constantes A, B, C e D obtidas em condição de laboratório e empregadas no cálculo da pressão de fim, neste trabalho estas constantes foram determinadas a partir da equação 6, dos valores de pressão de fim experimentais e da resolução de um sistema linear. A tabela 4 apresenta os valores calculados das constantes A, B, C e D.

Tabela 4: Valores de constantes A, B, C e D em função da liga. Valores de α e n (6).

Liga\Constante	A	B	C	D	αn
AA6063 pico	25,2	15,4	38	-96	0,2154
AA6063 fim	-0,3	10,8	1,9	-0,6	0,2154
AA6082 pico	15,9	5,7	12,5	-32,2	0,13392
AA6082 fim	-6,6	6,3	2,7	-3,8	0,13392

A Figura 3 ilustra o gráfico comparativo entre as tensões de deformação de fim experimental e calculada de extrusão. A Figura construída a partir das constantes A, B, C e D, obtidas neste trabalho e apresentadas na Tabela 4, é possível observar a proximidade dos valores calculados e experimentais, comprovando a validade das constantes para a pressão de fim. A mesma relação foi observada entre as tensões de deformação de pico experimental e calculada de extrusão.

Analisando a Figura 4 onde se apresenta o gráfico da temperatura da região de deformação, dada pela equação 3, observa-se o posicionamento dos valores experimentais obtidos em relação aos valores experimentais obtidos na literatura que define o limite entre a região de acabamento aceitável e não aceitável (linha de aceitabilidade de acabamento).⁽¹¹⁾ Desta figura constata-se, que de fato, os experimentos realizados neste trabalho estão dentro da região de acabamento aceitável. Nesta mesma figura observa-se que há uma tendência de se aproximar da linha de aceitabilidade de acabamento quanto maior a RE.

A Figura 5 ilustra a relação entre a RE e a pressão de fim experimental, obtendo-se as seguintes relações experimentais: Liga AA6082: $PF = 53,87 \ln RE$ e Liga AA6063: $PF = 52,061 \ln RE$.

Chama-se a atenção para os valores das constantes de 53,87MPa para a liga AA6082 e 52,061MPa para a liga AA6063. Levando em consideração a equação 5, $P = \alpha \bar{\sigma} \ln(RE)$, observa-se que este resultado é decorrente do produto entre α e $\bar{\sigma}$, onde objetiva-se a constante α .

Observando os valores experimentais do presente trabalho, obtém-se, para as diferentes condições experimentais uma média geral da tensão de deformação de 49,3MPa para a liga AA6082 e 45,7MPa para a liga AA6063. Com estes valores foi possível determinar a constante α de 1,092 para a liga AA6082 e 1,139 para a liga AA6063, corroborando com a estimativa de 1,1 por Hughes et al.⁽¹⁰⁾

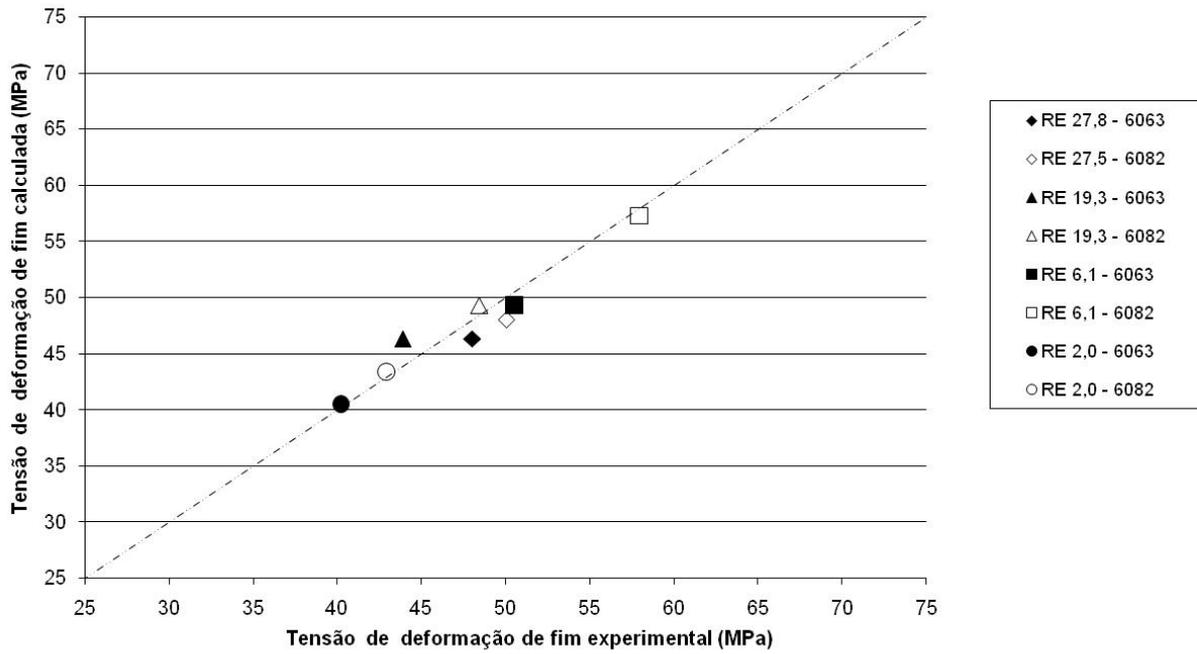


Figura 3: Tensão de deformação de fim experimental e calculada.

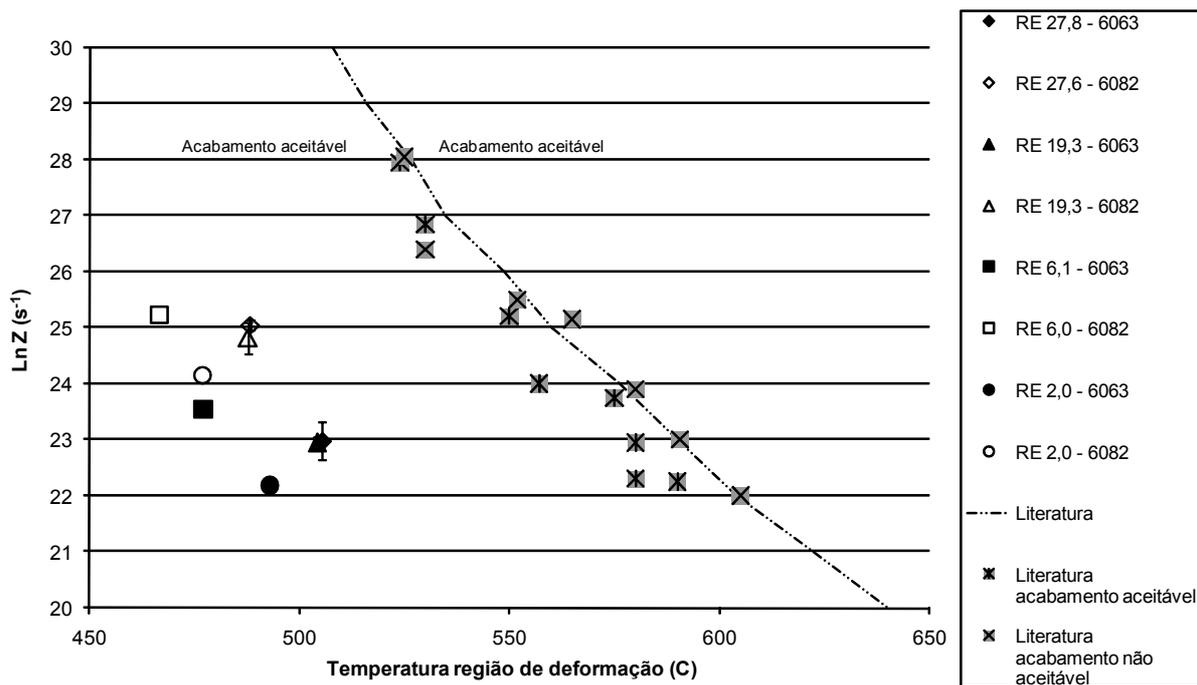


Figura 4: Cálculo de ln Z em função da temperatura de deformação.⁽¹¹⁾

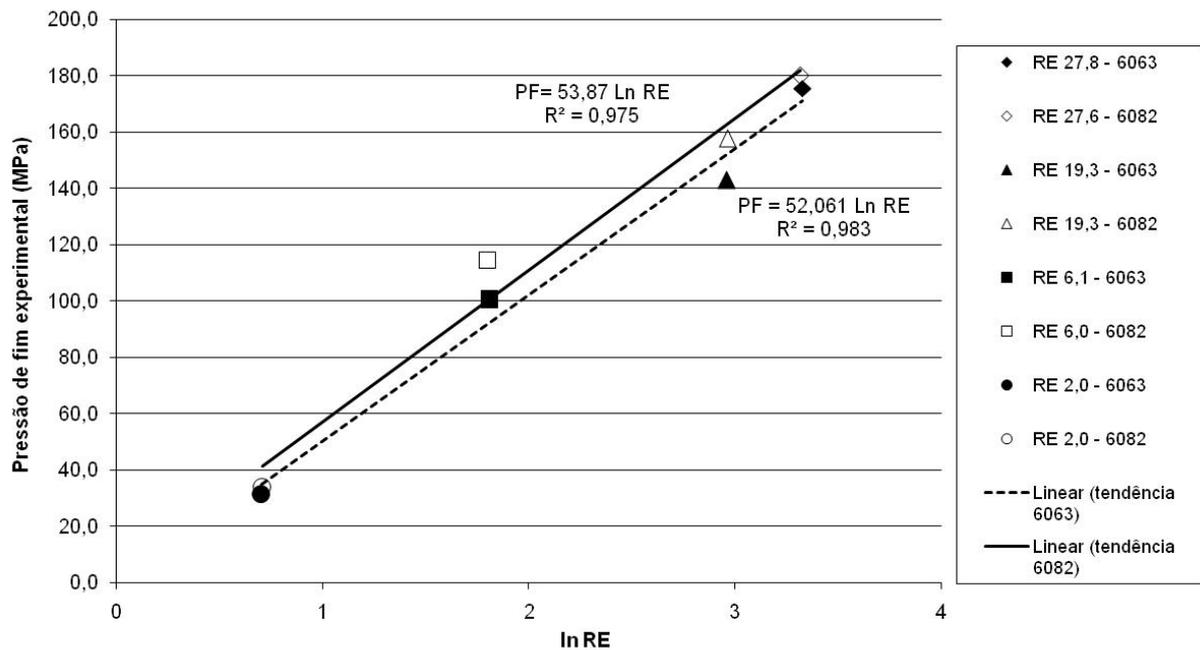


Figura 5: Pressão de fim de extrusão em função da razão de extrusão.

7 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

Nas Figuras 6 e 7 é possível observar os grãos alongados em uma seção longitudinal e observados ao longo do diâmetro do perfil. Para valores de RE maiores, os grãos são mais alongados e apresentam menor espessura (Figura 6, RE = 27,8 e Figura 7 RE = 3,9). Nestas condições de extrusão, observa-se, ainda, a variação do tamanho de grão (TG) ao longo do raio do perfil extrudado, com granulação menor próximo a superfície do perfil (2 mm abaixo da superfície).

Observa-se maior heterogeneidade de tamanho médio de grão em perfis extrudados com menor RE. Resultados semelhantes foram observados para a liga AA6063.

A figura 8 apresenta a microestrutura longitudinal do perfil extrudado de RE de 27,8 na liga AA6082, empregando a técnica de microscopia eletrônica de varredura, acoplada com dispositivo de medição de orientação de grãos (EBSD-OIM),^(12,13) onde é possível observar os grãos (contorno em cor vermelha) e os subgrãos (contorno em cor preta). Nota-se que os subgrãos têm formato equiaxial, enquanto os grãos apresentam-se alongados, corroborando as informações amplamente conhecidas na literatura técnica.

A Figura 9 apresenta a FDO (função de distribuição de orientação), obtida a partir da técnica de MEV/EBSD, em seção situada a meio-raio do perfil extrudado sólido com RE 27,8, na liga AA6082, na condição de solubilizado em água (T4), na seção transversal à direção de extrusão, isto é, ilustrando a consistência e reprodutibilidade das componentes de textura, quando $\phi_2 = 45^\circ$, C $\{112\} \langle 111 \rangle$, B $\{011\} \langle 112 \rangle$ e Goss G $\{011\} \langle 100 \rangle$. Em $\phi_2 = 65^\circ$, S $\{123\} \langle 634 \rangle$. As características C, B e S são componentes da fibra β . Em $\phi_2 = 0^\circ$ é possível observar a textura de fibra de cubo ($\{001\} \langle 100 \rangle$) que é típica de material recristalizado. A Figura 10 é semelhante à figura 9 ilustrando a repetibilidade apresentado em produtos de elevado grau de textura quando analisados em duas ordens de grandezas diferentes, isto é, com as técnicas de difração de raios-X e EBSD.

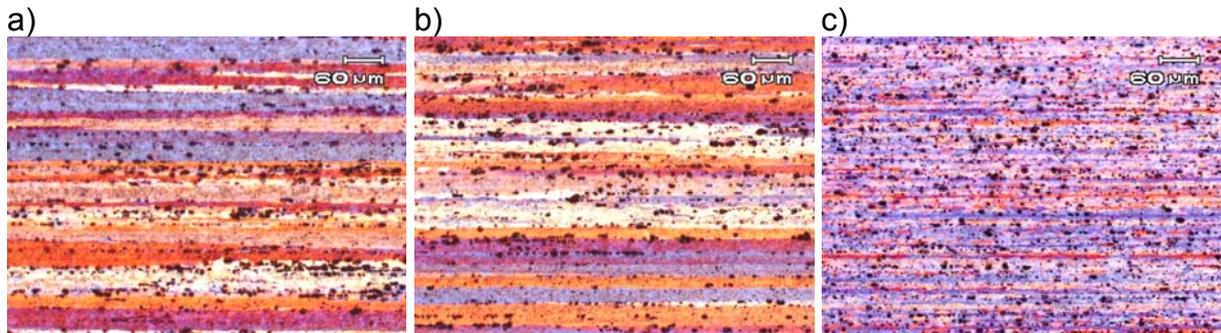


Figura 6: Seção longitudinal do perfil com RE = 27,8: a) centro; b) meio raio e c) periferia, liga AA 6082 e aumento de 100X.

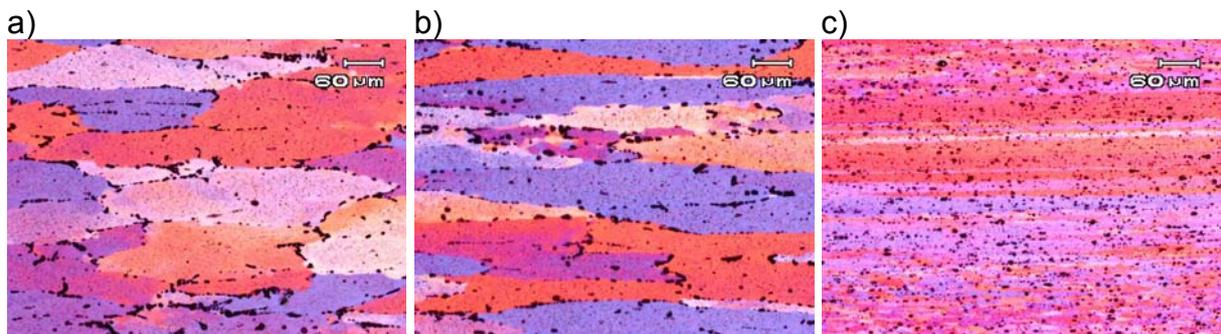


Figura 7: Seção longitudinal do perfil com RE = 3,9: a) centro; b) meio raio e c) periferia, liga AA 6082 e aumento de 100X.

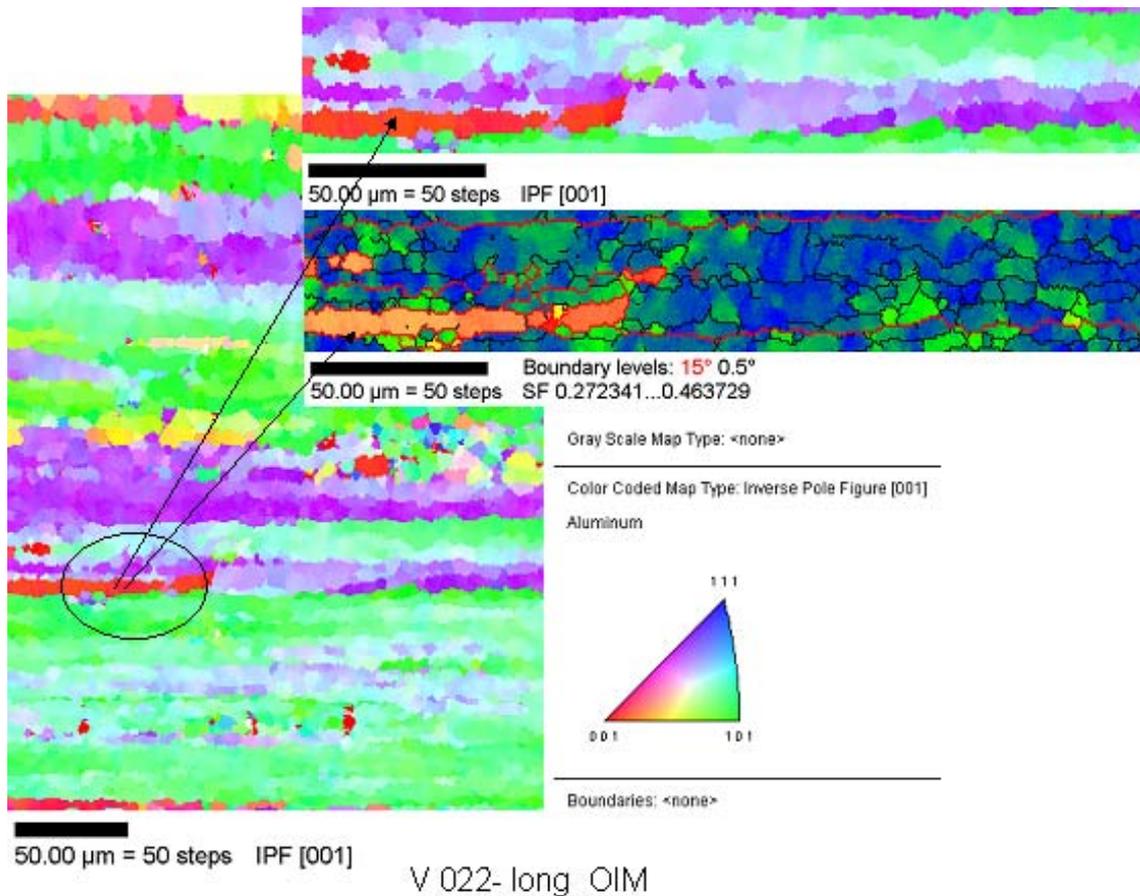


Figura 8: Caracterização microestrutural longitudinal na liga AA6082 do perfil com RE 27,8, (MEV - EBSD-OIM)⁽¹⁴⁾

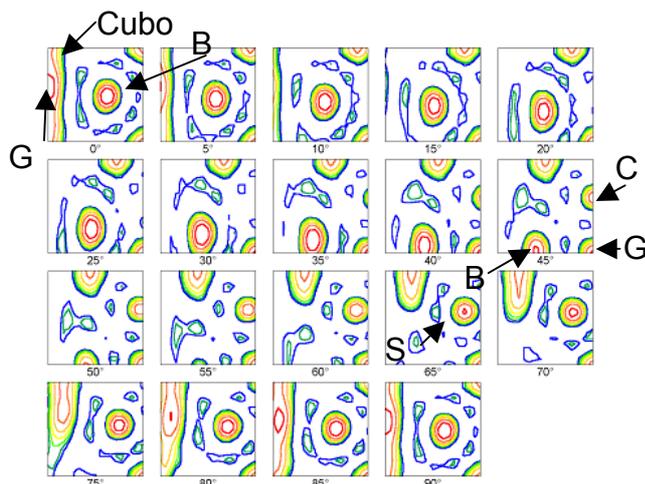


Figura 9: FDO do perfil V 0022. (região central) (microtextura - MEV/EBSD).

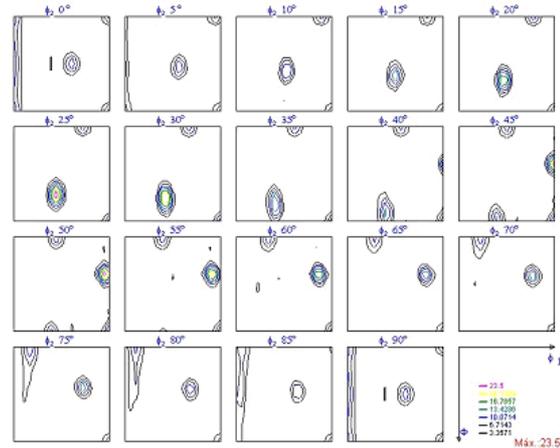


Figura 10: FDO do perfil V 0022. Região meio-raio. (macrotextura - difratômetro de raios X - Rigaku modelo DMAX-2100).

8 CONCLUSÕES

A - Obtenção das constantes A, B, C e D que podem ser utilizados para prever a pressão de pico e fim a partir da fórmula proposta por Sheppard – equação 6.

B - Os pontos referentes aos experimentos dos perfis extrudados industrialmente estão localizados dentro do diagrama limite de conformação (conhecido também como janela operacional), em conformidade com os dados obtidos por Clode e Sheppard, em condições de laboratório.

C - Obtenção dos valores da constante α da equação $P = \alpha \bar{\sigma} \ln(RE)$ para a liga AA6082 de 1,092 e para a liga AA6063 de 1,139. (Valores inéditos na literatura).

D - Para a liga AA6082 e para valores de RE maiores, os grãos são mais alongados e apresentam menor espessura, portanto, quanto maior a RE menor a heterogeneidade entre o centro e a superfície do perfil extrudado.

E - A figura FDO em seção situada a meio-raio do perfil extrudado sólido com RE 27,8, na seção transversal à direção de extrusão, apresenta a consistência e reprodutibilidade dos componentes de textura, $\phi_2 = 45^\circ$, C $\{112\} \langle 111 \rangle$, B $\{011\} \langle 112 \rangle$ e Goss G $\{011\} \langle 100 \rangle$ e em $\phi_2 = 65^\circ$, S $\{123\} \langle 634 \rangle$. As características C, B e S são componentes da fibra β . Em $\phi_2 = 0^\circ$ é possível observar a textura de fibra cubo ($\{001\} \langle 100 \rangle$) que é típica de material recristalizado.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) pela oportunidade do desenvolvimento do trabalho e à sua equipe do Departamento de Extrusão.

Agradecimentos especiais para o Eng. Renato Brito de Moura – Diretor Industrial - e Eng. Eduardo Dias Ferreira – Chefe do Departamento de Extrusão - pelo apoio à pesquisa na área produtiva, Ivan Menegueço – Laboratório Químico - pela metalografia óptica, Cláudio R. dos Santos – EPUSP – pela preparação das amostras de EBSD, Dr. Clarice Kuniishi – EPUSP – pelas análises realizadas junto ao MEV-EBSD e ao Dr. Nelson B. Lima – IPEN – pelas análises no difratômetro de Raio X.

REFERÊNCIAS

- 1 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Extrusão**. 3. ed. São Paulo, 2005. 244p.
- 2 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Alumínio e suas ligas – Classificação: NBR6834**, Rio de Janeiro, 2006. 25p.
- 3 CASTLE, A.F.; SHEPPARD, T. Hot working theory applied to extrusion of some aluminium alloys, **Met. Tech.**, Oct. 1976, p 454-464.
- 4 MEYERS, M.; CHAWLA, K. **Princípios de Metalurgia Mecânica**, São Paulo. Editora Edgard Blucher Ltda, p. 307-309, 1982. p.137-148.
- 5 DIETER, G.E. **Mechanical Metallurgy**, New York: Mc Graw-Hill Book Company Inc., 1961. 615p. Cap. 9-8, p. 258-260.
- 6 SHEPPARD, T. **Extrusion of Aluminium Alloys**, Kluwer Academic Publishers, 1999. 420p.
- 7 SHEPPARD, T.; JACKSON, A. Constitutive Equations for Use in Prediction of Flow Stress During Extrusion of Aluminum Alloys, **Mat. Sci. Tech.**, v. 13, Mar., 1997, p.203-209.
- 8 PLAUT, R.L. **Temperaturas durante a Extrusão**, São Paulo, Universidade de São Paulo, 1999./ Notas da aula de “Extrusão”, São Paulo, 1999.
- 9 GUPTA, A.K.; HUGHES, K.E.; SELLARS, C.M. Glass-lubricated hot extrusion of stainless steel. **Met. Tech.**, p. 323-331, Aug., 1980.
- 10 HUGHES, K.E.; NAIR, K.D.; SELLARS, C.M. Temperature and flow stress during hot extrusion of steel, **Met. Tech.**, April, 1974, p. 161-169.
- 11 CLODE, M. P.; SHEPPARD, T. Extrusion limit diagrams containing structural and topological information for AA6063 aluminium alloy. **The Institute of Materials**, p.313-318, 1992.
- 12 PADILHA, A.F. Utilização da Técnica de Difração de Elétrons Retroespalhados na Caracterização Microestrutural dos Materiais. 1999. 16p. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**. São Paulo, 1999.
- 13 BUNGE, H-J, **Texture Analysis in Materials Science**, Butterworths, 1982, p. 245.
- 14 CAMPANA, R. C.; PLAUT, R. L. Análise da extrusão e caracterização microestrutural e da textura de barras extrudadas da liga AA6082. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DO ALUMÍNIO, 2., 2005, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABAL, 2005. 1 CD-ROM.