

temperatura, maior será a tendência ao crescimento e coalescimento destas partículas e, como consequência, maior será o volume da fração transformada.

É possível, portanto, a partir destes resultados, determinar-se uma seqüência termomecânica em escala industrial, onde a adequação do compromisso *formabilidade x resistência* seja feita em função dos parâmetros como a temperatura, associada à determinação da fração volumétrica das partículas de segunda fase (AlFe).

6. BIBLIOGRAFIA

- Bray Jack W. 1989 "Aluminium Mill and Engineered Wrought Products" Metals Handbook Properties and Selection of Nonferrous Alloys – Vol 2, 10^a Edição, ASM International
- Clemente Aldenir. 1992 "Liga de Alta Formabilidade 8XXX", Relatório DT-093/87, Documento de Circulação Interna da Alcoa - Alumínio AS
- Davies R. K.; Randle V.; and Marshall G. S. 1998 "Continuous Recrystallization-Related Phenomena in a Commercial Al-Fe-Si", Acta Materialia, vol. 46, no 17, pp 6021-6032
- Li Ben Q. 1995 "Producing Thin Strips by Twin-Roll Casting – Part I: Process Aspects and Quality Issues". Journal of Metals, May, pp 29-33.
- Moris L. R. 1977 "Structure of Continuously Cast Eutectics Used in Manufacture of Fine-Grained Aluminium Sheet – Solidifications and Casting of Metals". Proceedings of an International Conference on Solidification, Sheffield, July.
- Rodrigues P. M. B. and Furrer P. 1990 "On the Tensile Behavior of Heterogeneous AlFeMn Fine Grained Alloys" - Proceedings of Aluminium Alloys - Physical and Mechanical Properties.
- Sanguinetti Ferreira, R.A., Alves de Melo, S. S., Silva, F. S., Burger, M.G. e Urtiga S.L. 1998 "Evolução Microestrutural da Liga de Alumínio AA 8023. Aspectos Cinéticos e Morfológicos" - Anais do 13^o Cbecimat em CD -ROM - Curitiba PR.
- Sanguinetti Ferreira, R. A., Silva, F. S., Burger, M. G. e Freitas, F. G. R. 1998 "Decomposição Isotérmica da Liga AA 8023 Obtida pelo Processo Roll Caster" - 53^o Congresso Anual da ABM em CD ROM – Belo Horizonte MG, Setembro.
- Sanguinetti Ferreira, R.A., Ribeiro Freitas, F.G. and Rocha Lima, E.P. 2000 - Study of Decomposition in AA 8023 Alluminium Alloy: Kinetic and Morphological Aspects - In publication .
- Takuda H., Yamazaki N.; Kicuchi S. 1995 "Influence of Cold-rolling and Annealing Conditions on Formability of Alluminium Alloys Sheet". Journal of Materials Science.
- Westengen H. and Nes K. 1984 "Twin Roll Casting of Aluminium. The Occurrence of Structure Inhomogeneities and Defects in as Cast Strip" Light Metals, ed. by J. P. McGreer, Warrendale, PA : TMS, pp. 1111-1127.

7. AGRADECIMENTOS

Agradecemos a **Capes**, ao **CNPq** e a **Propesq / UFPE (PIBIC)**, pelas bolsas de Iniciação Científica e mestrado. Agradecemos igualmente a **Alcoa Alumínio S.A** pelo suporte dado a este projeto e aos seus técnicos **Hermes Lima** pelos ensaios mecânicos e a **Jonas Silva** pela laminação do material. Agradecemos finalmente a **Facepe** pela concessão de passagens aéreas.

Os mecanismos de decomposição descritos anteriormente podem ser melhor entendidos a partir dos resultados da microanálise química em EDS. De acordo com a tabela 2, num tratamento térmico de 6 horas (H6), quanto maior for o teor de silício na liga maiores serão os teores de ferro e manganês rejeitados da matriz. Entretanto, para uma mesma liga, o teor de manganês rejeitado pode diminuir com a temperatura. Para interpretação dos resultados, tanto o teor de silício da liga quanto a temperatura de decomposição devem ser considerados. É importante considerar ainda que o tempo único de 6 horas (H6) não é suficiente para formação completa da partícula, conforme pode ser visto nas micrografias da figura 7. O amolecimento da matriz depende simultaneamente do rejeito de microconstituintes e da dispersão destes nas regiões interdendríticas. Entretanto, se houver formação e crescimento das partículas de AlFe, a matriz dendrítica tende a se enrijecer pelos contornos.

Os resultados da figura 1 são, portanto, coerentes com o que foi dito acima. A liga 3, que tem o maior teor de silício, é a liga que apresenta maiores valores de escoamento, porém com menor redução deste limite com a temperatura. Convém lembrar que o tempo de 6 horas não produz rejeito suficiente para aumentar a ductilidade da matriz dendrítica. O limite de resistência à tração (fig. 2) apresenta um comportamento semelhante ao escoamento e pode ser justificado da mesma forma. As variações do alongamento em função da temperatura, para as três ligas ensaiadas está mostrado na figura 3. O alongamento tende a ser condicionado pela temperatura e pelo teor de microelementos segregados nesta temperatura de tratamento. Sem a formação completa de partículas, uma maior temperatura produz um maior rejeito de microelementos e, por conseqüência, uma matriz mais dúctil, com maior alongamento. A liga com maior teor de silício (liga 3) é a que apresenta maior rejeição e, portanto, o crescimento relativo do alongamento com a temperatura nesta liga é maior que nas outras. Na liga 2, a de menor teor de silício, o crescimento no alongamento é menor.

A deformação, conforme era esperado, modifica a cinética de amolecimento de forma diferenciada nas duas ligas. Esta diferença pode ser justificada por um maior volume de soluto segregado/partículas de uma liga em relação a outra e pelas conseqüências destas no processo de endurecimento. Os defeitos produzidos pela deformação (encruamento) foi mais significativo na liga com maior teor de silício. Portanto, a liga que mais rejeita soluto em seis hora de tratamento (liga 3), após deformação de 80% apresenta um limite elástico que decresce com a temperatura. Entretanto, sua plasticidade é comprometida pelo maior volume de soluto rejeitado/partículas que restringe a capacidade de alongar-se. A liga 2, que rejeita menos soluto, tem o alongamento pouco afetado, pelo fato da deformação por laminação ter sido menos comprometida pelo enrijecimento dos contornos.

5. CONCLUSÕES

Durante uma decomposição isotérmica, o teor de silício contido na liga AA 8023 condiciona o teor de microconstituintes (soluto) segregados da matriz dendrítica para as regiões interdendríticas. Para uma dada temperatura, quanto maior for o teor de silício da liga, maior será o teor de microconstituintes rejeitados e, portanto, mais significativa é sua influência sobre as propriedades mecânicas.

As propriedades mecânicas da liga AA 8023 dependem, portanto, das condições de saturação da matriz dendrítica e de seu enrijecimento (endurecimento) pelos contornos. O enrijecimento pode ser obtido pelo crescimento das partículas de segunda fase (AlFe), produzidas a partir do ordenamento dos microconstituintes segregados da matriz para as regiões interdendríticas; principalmente o ferro e manganês.

A temperatura influencia a segregação destes microconstituintes que se ordenam e formam pequenos núcleos de uma nova fase (AlFe) que crescem, coalescem e se dispersam nas regiões interdendríticas. Para o dado período de tempo de tratamento, quanto maior for a

3.5 Microanálise química

A composição química das partículas de segunda fase em formação nas regiões interdendríticas das microestruturas das figuras 7-a, b e c foi obtida por microanálise química, feita em EDS. Os resultados destas análises em duas das ligas estão apresentados na tabela 2. Nesta tabela vê-se que, qualquer que seja a composição da liga, o teor de ferro microsegregado aumenta com a temperatura. O teor de silício é pouco sensível ao aumento de temperatura e o teor de manganês microsegregado aparentemente diminui. Em ambas as ligas, o teor de microelementos segregados é maior que seu valor nominal, em qualquer temperatura de tratamento. Observar-se ainda que os teores de ferro e manganês microsegregados são maiores na liga de maior teor de silício (liga 3) e, contrariamente, o teor de silício microsegregado é ligeiramente maior na liga de menor teor deste elemento (liga 2).

Tabela 2. Teor de microelementos segregados nas regiões interdendríticas.

Temperatura	Liga 2 (0,099% Si)			Liga 3 (0,186% Si)		
	% Fe	% Mn	% Si	% Fe	% Mn	% Si
480° C	4,24	1,38	0,74	5,91	1,87	0,66
495° C	4,36	1,41	0,79	8,92	1,81	0,69
510° C	5,20	1,13	0,76	14,5	1,10	0,74

4. DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

A liga AA 8023 apresenta uma condição de metaestabilidade muito peculiar. Em estudos anteriores Sanguinetti *et al.* (1998) mostrou que as fases de equilíbrio, os intermetálicos FeAl₃ e MnAl₆, não são formadas em tempos inferiores a 66 horas. Em lugar destas fases de equilíbrio, foram observadas partículas de forma globo-lamelar ricas em elementos de soluto, principalmente de ferro e manganês (fig 7). Estas partículas são nucleadas coerentemente com a matriz através do mecanismo difusional de cluster, cujos núcleos são formados a partir dos microconstituintes segregados nas regiões interdendríticas. Estes núcleos tendem a aumentar e coalescer com o tempo e a temperatura de tratamento. Estas partículas foram analisadas previamente e associadas à fase AlFe (Sanguinetti *et al.*,2000).

A cinética de amolecimento da liga AA 8023, caracterizada pelas propriedades mecânicas levantadas, pode ser justificada pela separação de soluto e pela formação da fase AlFe. Portanto, o limite de escoamento diminuir com a temperatura pode ser justificado pela separação de soluto da matriz; uma vez que as partículas de segunda fase, em pequenas frações de volumes, não incrementam significativamente a dureza do material durante a decomposição. Em princípio, uma matriz menos saturada pode torna-se menos rígida e o escoamento pode ser iniciado em tensões de menor valor. Entretanto, os resultados mostraram que a redução no limite de escoamento tende a ser menor na temperatura mais elevada pelo fato da segregação dos microconstituintes ser mais intensa nesta temperatura. Conforme pode ser visto nas figuras 10-a, b e c, para um tratamento de 6 horas (H6), os elementos segregados nas regiões interdendríticas apresentam uma tendência para formação de partículas que cresce com a temperatura de tratamento. Então, a matriz dendrítica, apesar de menos saturada, pode tornar-se mais rígida pela presença destas partículas em seus contornos. Os resultados obtidos com a liga AA 8023 estão coerentes com Moris (1977), Clemente (1987) e Rodrigues *et al.* (1990) que sugerem que quanto maior for o volume e o tamanho das partículas maior será a resistência à deformação.

que o tratamento feito à 480° C seguido de deformação produz um maior alongamento na liga de maior teor de silício. Nas outras temperaturas, a situação se inverte; ou seja, a liga de menor teor apresenta um maior alongamento.

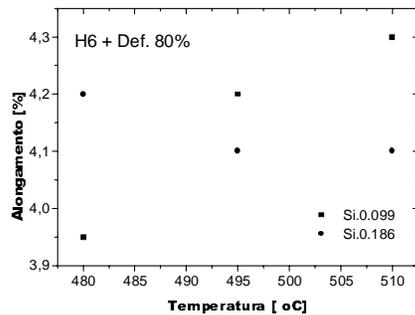


Figura 3. Variação do alongamento em função da temperatura e diferentes teores de silício para condição H6 e $\delta=80\%$

3.4 Evolução microestrutural

Em trabalhos anteriores (Sanguinetti *et al.* 1998) já foi mostrado que estrutura bruta de "Roll Caster" é constituída de células dendríticas, cujos contornos apresentam-se enriquecidos de microconstituintes, principalmente, ferro, manganês e traços de silício. A solidificação rápida no caster, da ordem de 3000° C na superfície da chapa, não é suficiente para evitar a microsegregação, mantendo os microconstituintes em solução.

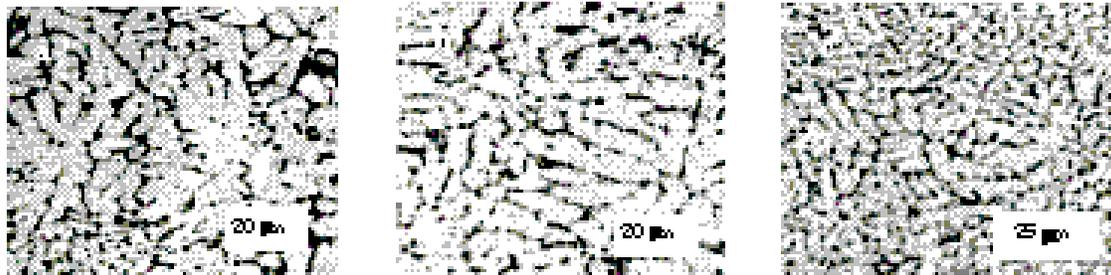


Figura 7. Evolução microestrutural da liga 1 no estado bruto, após tratamentos térmicos H6, em diferentes temperaturas : a-) 480° C ; b-) 495° C e c-) 510° C.

A estrutura bruta da liga AA 8023, qualquer que seja sua composição, quando decomposta isotermicamente apresenta modificações na morfologia, conforme está mostrado na figura 7-a, b e c. Nesta figura, vê-se claramente uma tendência à formação de partículas globulares a partir dos elementos microsegregados nas regiões interdendríticas. A tendência ao crescimento destas partículas de segunda fase é maior na temperatura mais elevada. Para o tratamento H6 - 480° C, a fração volumétrica de partículas ricas em soluto é menor que a fração volumétrica das ligas tratadas em temperaturas mais elevadas (fig. 7). Resultados anteriores (Sanguinetti *et al.* 1998) já mostraram que qualquer que seja o teor de silício da liga AA 8023, em tratamentos prolongados H18 ou H24, a estrutura dendrítica é completamente modificada para uma estruturas de partículas, qualquer que seja a temperatura de decomposição entre 480 e 510° C.

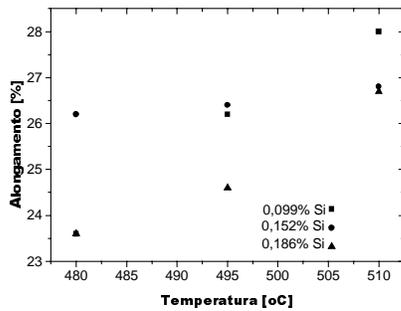


Figura 3. Variação do alongamento em função da temperatura e diferentes teores de silício para condição H6.

3.3 Influência do teor de silício, da temperatura de tratamento e da deformação

Para verificação da influência do teor de silício, da temperatura e da deformação sobre a formabilidade foram utilizadas apenas as ligas 2 (0,099% Si) e 3 (0,186% Si), uma vez que a liga 1 apresenta um comportamento muito próximo da liga 3. Para este estudo, as ligas 2 e 3 foram submetidas a um tratamento de decomposição nas mesmas condições anteriores. Seguindo-se os tratamentos térmicos, as chapas de cada uma das ligas foram reduzidas 80% por laminação a frio, com taxa de deformação média de $1,6 \text{ s}^{-1}$. Nestas condições de tratamento seguido de deformação, a formabilidade de cada liga pôde ser avaliada, a posteriori, através das propriedades mecânicas correlatas. Os limites de escoamento e limites resistência à tração são mostrados nas figuras 4 e 5, respectivamente e o alongamento é mostrado na figura 6. Comparando-se aos resultados anteriores, vê-se que a deformação de 80% duplica os níveis de tensão e reduz, em média, seis vezes o alongamento, devido ao estado encruado do material.

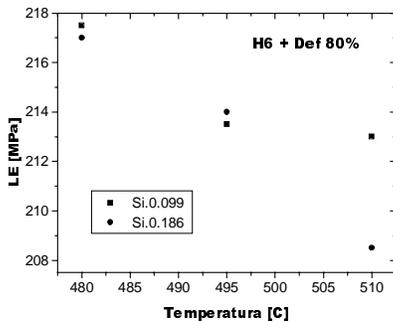


Figura 4. Variação do limite de escoamento em função da temperatura e diferentes teores de silício após $\delta = 80\%$.

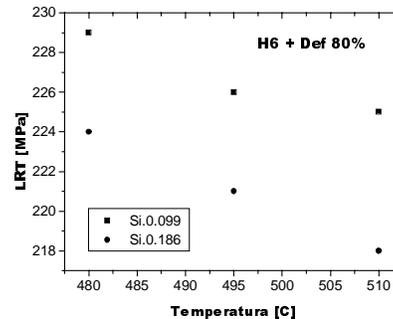


Figura 5. Variação do limite de resistência em função da temperatura e diferentes teores de silício após $\delta = 80\%$.

Na figura 4, vê-se, em ambas as ligas, que o limite de escoamento cai continuamente com o aumento da temperatura do tratamento. Estes resultados mostram que a cinética de amolecimento é mais significativa na liga de mais alto teor de silício (liga 3). Para liga 2, a partir da temperatura de 495°C , o valor da tensão de escoamento tende a se estabilizar. O limite de resistência à tração é mostrado na figura 5, onde pode ser visto que as duas ligas têm um comportamento semelhante. O valor da resistência diminui continuamente com a temperatura e os valores relativos à liga de mais baixo teor de silício são sempre menores. A figura 6 mostra que o alongamento cresce continuamente com a temperatura na liga de baixo teor de silício (liga 2). Para a liga de mais alto teor, o alongamento diminui até a temperatura de 495°C e, a partir desta temperatura, tende a se estabilizar. Observa-se apenas

de 1,6 s⁻¹ e passes sucessivos de 0,5 mm, até a espessura final de 1,0 mm. Finalizados os tratamentos e os ensaios mecânicos, os materiais foram submetidos ao processamento metalográfico tradicional para caracterização microestrutural. Para difração de raios-x, foi usado um difratômetro D5000 Siemens, equipado de um goniômetro de montagem omega e monocromador de cobre, que permite trabalhar com a raia K α_1 de comprimento de onda $\lambda = 1,5405 \text{ \AA}$. Para observação da morfologia em microscopia eletrônica de varredura-MEV, os corpos de prova, após metalografia tradicional, receberam um polimento suplementar com sílica coloidal. Tanto a morfologia quanto a microanálise química foram realizados em um MEV Leica S440Si, equipado com detector de elétrons retroespalhados e com Espectrômetro a Dispersão de Energia - EDS.

3. RESULTADOS

3.1 Influência do teor de silício e da temperatura

A influência do teor de silício sobre as propriedades mecânicas foi verificada em três composições diferentes da liga AA 8023. As figuras 1, 2 e 3 mostram a variação das propriedades mecânicas como função da temperatura e do teor de silício nas três ligas, após um tratamento de seis horas (H6). Os valores para os limites de escoamento, limite de resistência e escoamento representam uma média de três ensaios para cada ponto levantado. Os desvios padrão de cada propriedade foram $s_E = 1,0 \text{ MPa}$, $s_R = 1,0 \text{ Kg/mm}^2$ e $s_A = 0,3\%$, respectivamente. Os resultados mostraram que os limites de escoamento (fig. 1) diminuem com o aumento da temperatura de tratamento, excetuando-se a liga 3 com 0,186% de silício, cujos valores, aparentemente, não se altera. Quanto ao limite de resistência, os resultados mostraram (fig.2) que seus valores diminuem com a temperatura. A liga 2, de menor teor de silício, apresenta valores de escoamento e resistência inferiores aos valores observados nas outras ligas e o amolecimento é mais sensível ao efeito da temperatura de decomposição.

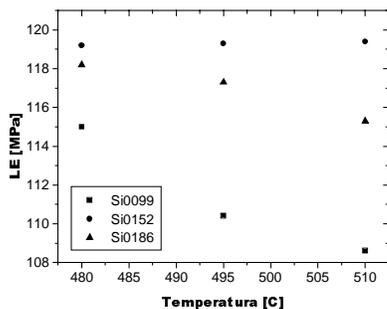


Figura 1. Variação do limite de escoamento em função da temperatura (H6) e dos diferentes teores de silício.

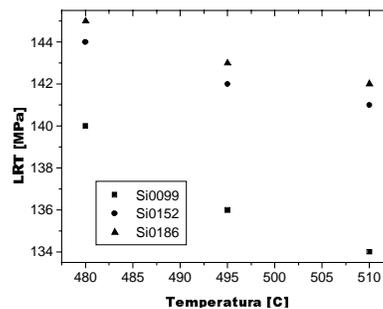


Figura 2. Variação do limite de resistência em função da temperatura (H6) e dos diferentes teores de silício.

As ligas 1 e 3, cujos teores de silício são 0,152% e 0,186%, respectivamente, apresentaram valores das propriedades muito próximos. Nestas ligas, a tensão de escoamento, praticamente, não é alterada com o aumento da temperatura de decomposição. A figura 3 mostra uma tendência do alongamento crescer com a temperatura em todas as ligas. O crescimento relativo observado no alongamento é significativamente menor na liga 2, cujo teor de silício é 0,099%. Na liga 1 (0,152% Si), foi observado um crescimento do alongamento com a temperatura de tratamento bem superior ao da liga 2. A liga 3 (0,186% Si), dentre as ligas estudadas, foi a que apresentou um crescimento relativo no alongamento mais representativo, nas condições (H6) de tratamento.

Clemente (1987) e Rodrigues *et al.* (1990), para diversos sistemas de ligas de alumínio. Os resultados, embora que ainda qualitativos já mostram que a adequação é possível e depende fundamentalmente do entendimento dos mecanismos difusionais que interagem durante a decomposição da liga (Sanguinetti *et al.* 1998).

As ligas eutéticas de alumínio com sistemas ternários obtidas pelo processo "Roll Caster" podem evoluir, segundo Li Ben Q. (1995) e Westengen *et al.* (1984), para uma microestrutura de grãos extremamente finos e com propriedades mecânicas bastante interessantes, do ponto de vista industrial. Durante tratamentos para decomposição isotérmica, uma nova fase pode ser nucleada em condições metaestáveis como consequência da redução do campo interno de deformação produzida no caster. Segundo Clemente (1987) e Moris (1977) estas finas partículas quando uniformemente dispersas tendem a estabelecer uma combinação perfeita entre a formabilidade e a alta resistência. Estudos recentes feitos na liga AA 8023 revelaram que a formabilidade tende a ser condicionada pelo rejeito de soluto da matriz (microsegregação), conduzindo a um ordenamento de curto alcance durante uma decomposição isotérmica. Por outro lado, a resistência tende a ser condicionada pela forma, dispersão e fração volumétrica das partículas de segunda fase, formadas a partir do ordenamento (Sanguinetti *et al.* 1998).

A importância da variação do teor de silício para a formabilidade na liga AA 8023 ainda não foi estudada para esta liga. A principal dificuldade reside no fato desta liga apresentar faixas de composição bastante flexíveis para este elemento. Neste trabalho, será verificada a influência da variação composicional deste elemento nas propriedades mecânicas e o seu papel na fenomenologia do conflito entre a formabilidade e a resistência mecânica.

2. MÉTODOS EXPERIMENTAIS

A composição química da liga AA 8023, com diferentes teores de silício, é dada na tabela 1 mostrada abaixo.

Tabela 1. Composição química da liga AA 8023 com diferentes teores de Si.

Liga	% Si	% Fe	% Mn	% Cu	outros
1	0,152	1,396	0,432	0,109	0,075
2	0,099	1,354	0,492	0,104	0,079
3	0,186	1,355	0,437	0,117	0,073

As ligas foram produzidas pela Alcoa Alumínio SA. Todo o material para o estudo foi fornecido em forma de tiras, obtidas de chapas semi-acabadas, recém saídas do processo "Roll Caster". Para estudo da decomposição, foi feita uma estimativa prévia dos tempos de transformação em análise térmica diferencial. Com base neste estudo preliminar em DSC, cujos resultados já foram apresentados anteriormente (Sanguinetti *et al.* 2000), foram programadas as seqüências térmicas. Os tratamentos de decomposição foram feitos em temperaturas entre 480 e 510° C em tempos que variavam entre 3 e 18 horas. Estes tratamentos térmicos foram realizados ao ar em um forno do tipo mufla, equipado com termopares do tipo K e acuidade de $\pm 3^{\circ}\text{C}$.

Os ensaios mecânicos foram feitos, segundo norma ASTM-E8M-89B, onde foram obtidos valores para o alongamento e para os limites de escoamento e de resistência a tração. Duas diferentes condições de tratamento foram utilizadas: Primeiramente, as propriedades foram levantadas a partir das ligas tratadas nas temperaturas de 480, 495 e 510° C num tempo de 6 horas (H6). Em seguida, as propriedades foram obtidas a partir das ligas tratadas nas mesmas condições anteriores, porém laminadas a frio com deformação da ordem de 80%. A laminação foi feita em um laminador tipo ourives, utilizando uma taxa de deformação média

INFLUÊNCIA DA SEQÜÊNCIA TERMOMECAÂNICA E DO TEOR DE Si NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA DE ALUMÍNIO AA 8023

Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira

Tiziana Tavares Alves

Emmanuel Pacheco Rocha Lima

Flávio Gustavo Ribeiro Freitas

Renata Dourado Pinho

Departamento de Engenharia mecânica da Universidade Federal de Pernambuco - DEMEC / UFPE - Av. Acadêmico Hélio Ramos s/n Cidade Universitária 50.741-530, Recife-PE. E-mail: ras@npd.ufpe.br

Resumo

O silício é um elemento de liga normalmente utilizado para melhorar a tenacidade à fratura e a trabalhabilidade a quente nas ligas de alumínio. Neste trabalho, foi verificada a influência do teor deste microconstituente nas propriedades mecânicas de uma liga do sistema Al-Fe-Mn; após diferentes tratamentos térmicos. A ligas, com suas diferentes composições, foram tratadas em diferentes tempos e temperaturas e as propriedades mecânicas foram avaliadas por ensaios de tração uniaxial, segundo norma ASTM-E8M-89B. A caracterização microestrutural foi feita por raios-x e microscopia eletrônica de varredura - MEV e espectrometria a dispersão de energia. Os resultados mostraram que a redução nos níveis das tensões de escoamento e resistência é maior na liga de menor teor de silício. As análises em EDS mostraram que os teores de ferro e manganês microsegregados são menores nas ligas de mais baixo teor de silício. Assim, o ferro e o manganês retidos em solução tendem a comprometer o campo elástico da matriz, elevando o nível das tensões de escoamento e resistência à tração. Quando rejeitados, estes elementos de soluto tendem a formar partículas que, dependendo do tamanho e da fração volumétrica, podem enrijecer a matriz dendrítica pelos contornos, comprometendo a plasticidade.

Palavras-Chave: Ligas Al-Fe-Mn, Ligas de alta formabilidade, Roll caster.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novas ligas de alumínio tem sido uma preocupação constante dos produtores mundiais que visam atender a demanda deste insumo nos mais variados segmentos industriais. A indústria automotiva e de embalagens, por exemplo, com demandas importantes no mercado, tem puxado o desenvolvimento destas ligas que têm mostrado uma grande capacidade de adequar-se aos mais exigentes processos de fabricação a partir de folhas.

Para produção de folhas finas, a matéria prima para produtos derivados, é necessária uma adequação de duas propriedades mecânicas conflitantes como a formabilidade e a resistência. O atendimento deste compromisso tem sido postulado por vários autores como Moris (1987),