

ESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DA FITA A359 SOLIDIFICADA RAPIDAMENTE

C. Triveño Rios, ¹triveno@ufmt.br

C. Bolfarini, ²cbolfa@ufscar.br

W. J. Botta, ²wjbottaf@ufscar.br

C. S. Kiminami, ²kiminami@ufscar.br

¹Engenharia Mecânica Instituto de Ciências Agrícolas e Tecnológicas (ICAT) – Campus Universitário Rondonópolis, Universidade Federal de Mato Grosso. 78735-901, Rondonópolis, MT, Brasil.

²Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, CP 676, 13565-905, São Carlos, SP, Brasil.

Resumo: *No presente estudo, foi estudado o efeito das características microestruturais sob as propriedades mecânicas da liga tipo-A359 solidificada rapidamente. Como resultado do processo de solidificação rápida através da técnica "melt-spinning" a fita metálica foi constituída por finos graos celulares equiaxiais bastante finos com tamanhos na faixa de 0,4 a 0,7 μm . Tratamentos térmicos da fita coquilhada mostraram um crescimento de nano-partículas de Si desde 19 nm para 80 nm (200 °C/12 h) e para 1,72 μm (450 °C/12 h). Foi observado uma melhoria na dureza e nas propriedades trativas da liga na condição coquilhada o que é relacionado à presença de solução sólida supersaturada de Al- α e ao refinamento microestrutural. A queda de dureza e nas propriedades trativas depois de envelhecidas termicamente são atribuídas à precipitação e subsequente crescimento de partículas de Si. A fita coquilhada e fita tratada termicamente em 200 °C mostraram uma fratura frágil diferente da fita tratada termicamente em 450 °C que mostrou uma superfície de fratura dúctil.*

Palavras-chave: *Liga A359, microestrutura, propriedades mecânicas, solidificação rápida.*

1. INTRODUÇÃO

Processos de Solidificação Rápida fornecem um caso típico de solidificação fora do equilíbrio. Nessas condições se obtém microestruturas muito refinadas, os limites de solubilidade em equilíbrio são estendidos, também são formadas fases metaestáveis (Jones, 1984, Lu et al, 2001). Os processos de solidificação rápida (RSP), geralmente são ferramentas potenciais para induzir modificações microestruturais, que podem melhorar as propriedades mecânicas de ligas (Lu et al, 2001).

As ligas fundidas (série 300) são amplamente usadas em muitos componentes automotivos. As ligas de esse tipo combinam excelentes propriedades mecânicas e alta resistência à corrosão com excelentes características de fluidez. Isso devido a que durante o processos de fundição convencional se tem baixa solubilidade sólida do Fe, Si e Mg em Al. Nessas condições são formadas as fases Al_3FeSi , $\text{Al}_8\text{Si}_6\text{Mg}_3\text{Fe}$, Mg_2Si e outras com estruturas mais complexas. Entretanto, por solidificação rápida se obtém um aumento substancial da solubilidade sólida dos elementos Fe, Si e Mg em Al- α e os precipitados Al_3FeSi , $\text{Al}_8\text{Si}_6\text{Mg}_3\text{Fe}$, Mg_2Si podem não ser formados dando lugar à formação de outras fases em estado metaestável. O objetivo do presente estudo é analisar as características microestruturais e as propriedades mecânicas da liga de alumínio A359 solidificada rapidamente.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A liga tipo-A359 com 9,4%Si, 0,7%Mg, 0,12%Fe e o restante de Al (% em peso) foi solidificada rapidamente através da técnica "melt-spinning" usando velocidade de rotação da roda de Cu de 56 m/s. Nessas condições se obteve uma fita metálica coquilhada (na condição bruta de fusão) com 27 mm de largura, 28 a 34 μm de espessura e de vários metros de comprimento. As amostras dessa fita foram caracterizadas através do uso de microscopia ótica (MO), microscopia eletrônica de varredura (SEM) e de Transmissão (TEM) com espectroscopia de energia dispersiva (EDS).

As medidas tanto de microdureza Vickers e ensaios de tração foram realizados usando equipamentos indentaMet-1100 – Buehler e Instron-5544, respectivamente. Ambas as medidas foram realizadas em temperatura ambiente de fita coquilhada e de fitas depois de tratadas termicamente em 200, 350 e 450 °C. Os ensaios de tração foram realizados em

velocidade constante de deformação de 1,0 mm/min e de 40 mm de comprimento livre entre as garras planas de fixação. O tamanho de grão foi medido usando o método de interceptação linear (ASTM E 112-84). As medidas de microdureza Vickers foram realizadas na zona central da seção transversal (direção longitudinal) da fita, com o objetivo de evitar efeitos de borde. A carga utilizada nas impressões Vickers foi de 10 gf por 15s. Cada valor de dureza Vickers é o resultado de no mínimo seis medidas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na figura 1a é mostrada uma micrografia ótica da seção transversal da fita metálica como coquilhada. A micrografia mostra duas zonas bem definidas: (i) Zona sem característica definida e obtida sobre o lado da roda de Cu, e (ii) Zona central com microestrutura celular-dendrítica com estrutura muito refinada e que apresenta uma tendência de engrossamento em direção oposta ao lado da fita em contato com a roda de Cu. A zona sem característica é geralmente típico de ligas resfriadas rapidamente e como resultado apresentam um refinamento muito extremo do grão devido às altas taxas de resfriamento envolvidas durante a solidificação rápida. A análise TEM da zona central da fita coquilhada, observada na figura 1b, mostra um estrutura celular-dendrítica que apresenta um tamanho de grão entre 0,4 a 0,7 μm . Desde já usando a relação empírica proposta por Matyja et al. (1968) de: $R = (47/d)^3$ para uma liga Al-11%Si (% atômica), onde d é o tamanho celular (em μm) e R a taxa de resfriamento foi possível calcular a taxa de resfriamento (R) entre $\sim 3.01 \times 10^5 - 1.6 \times 10^6$ K/s para a liga A359, que são valores típicos obtidos durante o processo de “melt-spinning”. A estrutura celular equiaxial é constituída por partículas de silício preferencialmente precipitados ao longo dos contornos de grão formando canais de silício e também precipitados de silício distribuídos no interior das células de Al- α sem a presença da fase metaestável Mg_2Si . A presença de partículas de silício ao longo dos contornos celulares sugere que alguma fração de precipitados de silício pode ter-se formado durante o resfriamento. Também é sugerido que a solidificação foi principalmente sem difusão sugerindo que as partículas de silício foram aprisionadas na matriz de Al. A região A da figura 1.b não apresenta presença de precipitados de silício contrário aos contornos celulares que apresentam alta densidade de precipitados de silício, observado na região B. As análises de EDS mostraram que o conteúdo de silício nas regiões A e B foram de 2,84 e 14,0-19,0 % at., respectivamente, e o conteúdo de magnésio foi de 0,8 e 1,3 % at., respectivamente. O diâmetro médio dos precipitados de Si foi de $\sim 19 \pm 8$ nm. Esses resultados estão em acordo com o refinamento estrutural obtido para a liga A359 solidificada em molde de cobre com seção transversal variando que envolve altas e baixas taxas de resfriamento (Triveño et al, 2002).

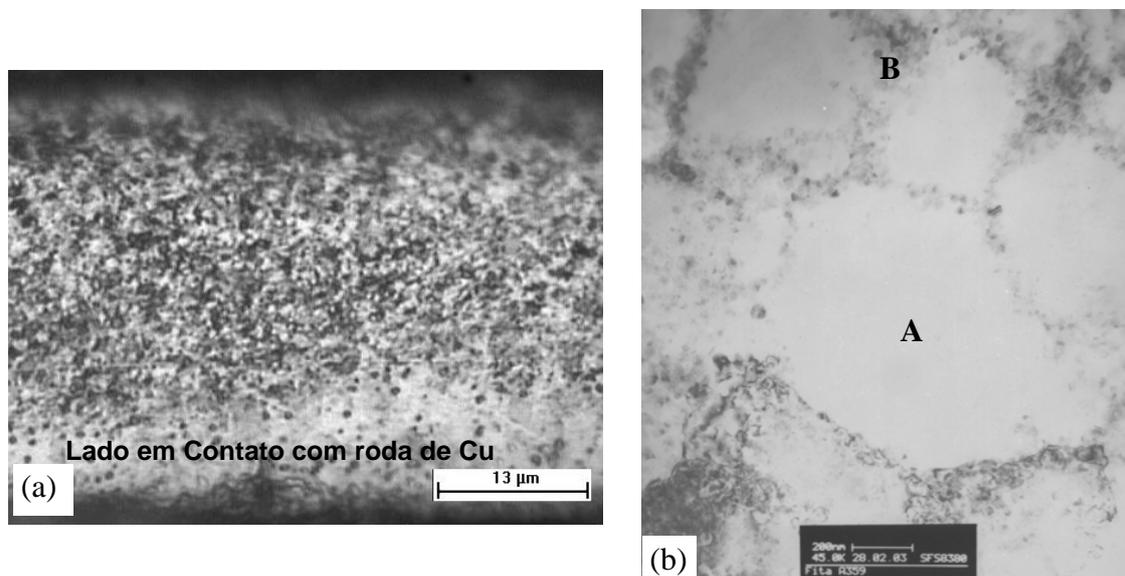


Fig. 1. (a) Micrografia ótica da seção transversal de fita metálica coquilhada, e (b) Imagem TEM de campo claro mostrando precipitados de silício nos contornos de grão e no interior de grãos de Al- α .

Neste estudo foi observado que as partículas de silício crescem desde dimensões de nano-tamanhos ($\sim 19 \pm 8$ nm) na fita coquilhada para partículas de 60-80 nm, e 1.7 ± 0.4 μm em diâmetro em fitas tratadas termicamente por 12 horas em 200 e 450°C, respectivamente, tal como observado na figura 2. Observa-se na figura 2a que a fase Si parece não experimentar um crescimento. Isso sugere que em temperaturas baixas de tratamento térmico, tal como de 200°C é necessário tempos longos de incubação para o crescimento da fase Si. Já com o aumento da temperatura de tratamento térmico acima de 200°C, a fase de Si experimenta um crescimento acentuado. Tais mudanças de comportamento por aumento da temperatura de recozimento com altas taxas de crescimento seguem uma lei exponencial de tempo ($t^{1/3}$), principalmente, através do mecanismo de difusão de volume (Mahanti et al, 1993) ou através de engrossamento estrutural (Wagner, 1961). Também é sugerida uma precipitação de Si desde a matriz de Al supersaturada em Si e que pode ocorrer entre 150 e 190°C, desaparecendo os contornos inter-dendríticos (Stoichev, 2002).

As curvas tensão-deformação são mostradas na figura 3. Aparentemente a relação tensão-deformação é quase linear até a fratura observada na fita coquilhada e na fita recozida em 200 °C, e é menos linear na fita recozida em 450 °C. Entretanto, existe linearidade somente até certo alongamento atrás do qual ocorre um encurvamento até a fratura, sem mostrar um ponto claro do fenômeno de escoamento. Em geral a resistência ao escoamento (YS) e a máxima resistência á tração (UTS) são reduzidas com aumento da temperatura de tratamento térmico, devido às mudanças nas características microestruturais, tal como, precipitação intermetálica, amolecimento da matriz de Al, engrossamento das partículas de Si que são relacionados aos mecanismos de reforço. Os valores de UTS e YS diferem grandemente, sendo 274 e 253, 210 e 202, 79 e 68 MPa para a fita coquilhada e fitas tratadas termicamente em 200 e 450°C, respectivamente. Entretanto, a deformação plástica encontrada nas três amostras foi pequena sendo mais característica e acentuada na fita recozida em 450°C. A Figura 4 mostra medidas de microdureza na seção transversal das fitas. A microdureza da fita coquilhada foi de 136,5 kgf/mm² e depois de recozidas em 200°C/12h a microdureza aumento para 148.1 kgf/mm². Porém, aumentando a temperatura de recozimento para 450°C resultou numa redução da microdureza para 42 kgf/mm².

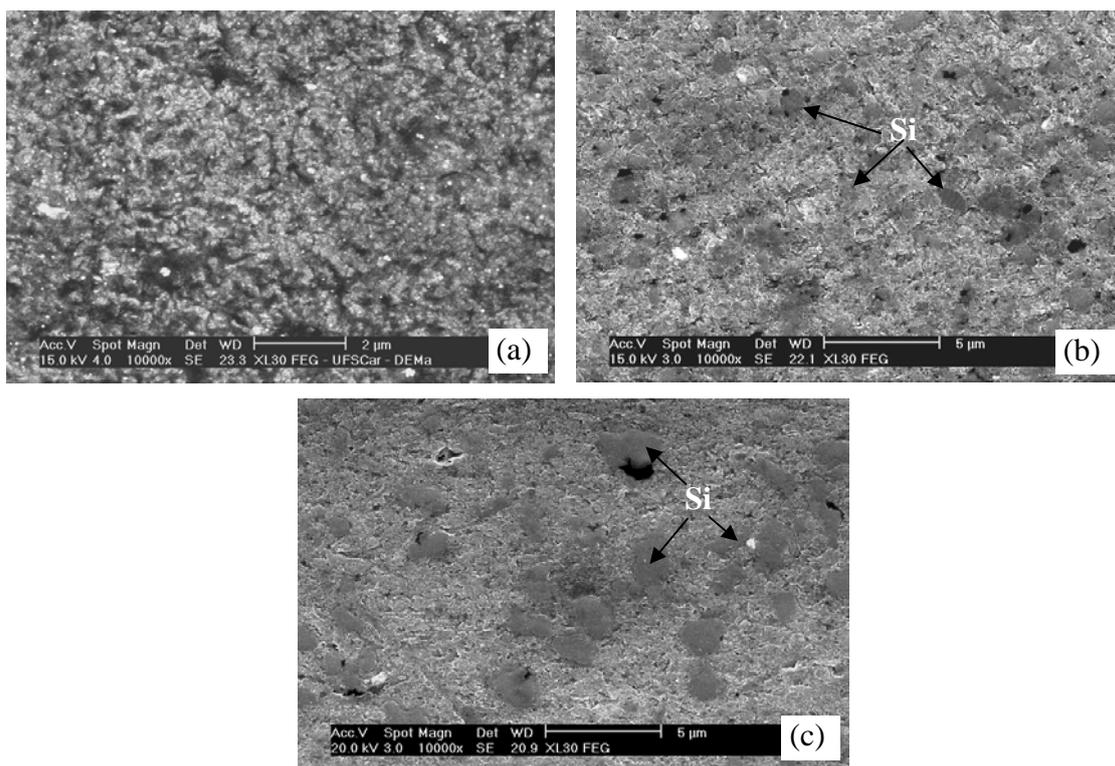


Figura 2. (a) Micrografias SEM depois de fitas tratadas termicamente por 12h em: (a) 200°C, (b) 350°C, e (c) 450°C.

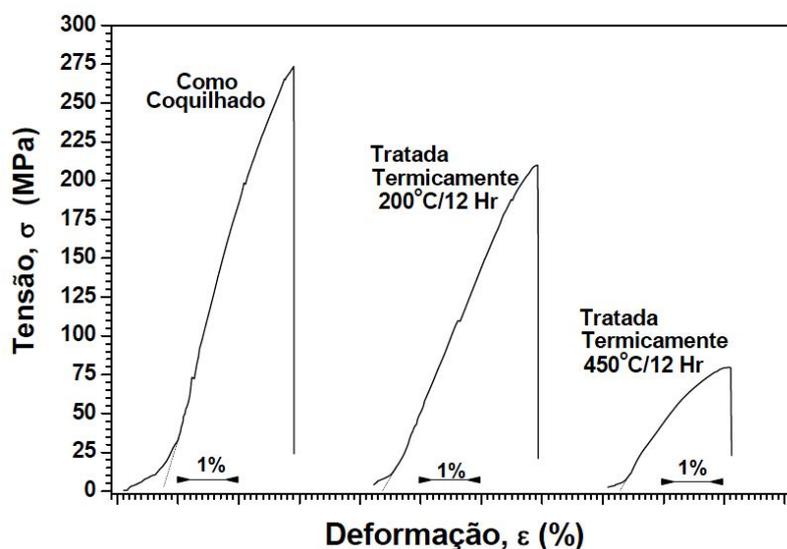


Figura 3. Curvas tensão–deformação obtidas em temperatura ambiente desde ensaios de tração de fitas metálicas A359.

Os valores de UTS, YS e microdureza da fita coquilhada é superior às ligas Al-Si produzidas em molde permanente que apresentam valores de UTS e YS de 98 e 66 MPa para a liga Al-12.6%Si [8], 81 e 58 MPa para a liga Al-7%Si (Oian et al, 2005), e 234 e 131 MPa para a liga 319.2 com 15 μm de espaçamento de braços dendríticos secundários (λ_2) (Samuel e Samuel, 1995), respectivamente. Por outro lado, a dureza da zona central celular-dendrítica da fita coquilhada e após tratada termicamente em 200°C, é ~2.2 e ~2.35 vezes superior a amostras fundidas de forma convencional e que apresentaram uma dureza de ~62 kgf/mm² para $\lambda_2 = 33 \mu\text{m}$.

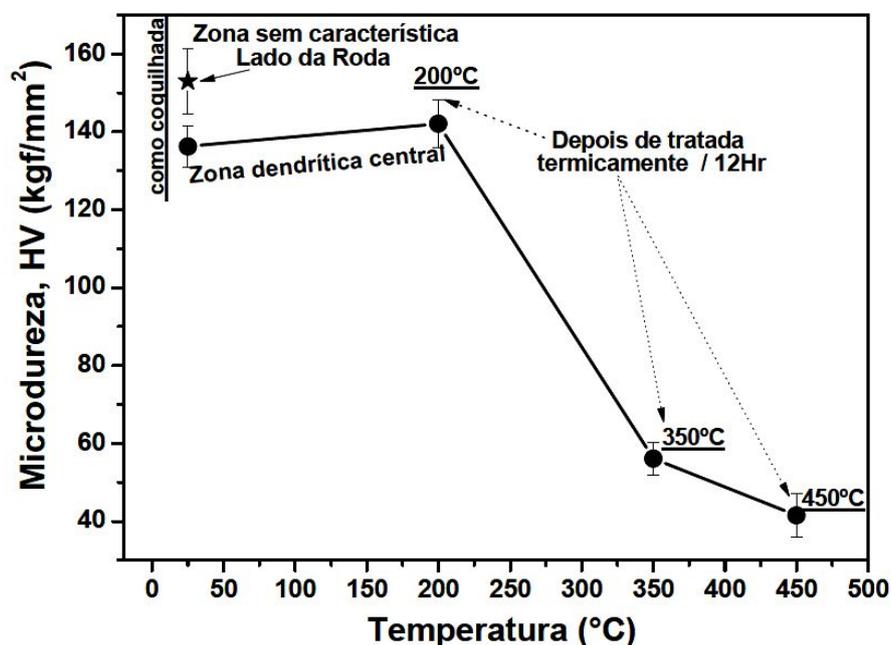


Figura 4. Medidas de Microdureza Vickers em temperatura ambiente para a fita coquilhada e fitas tratadas termicamente em 200, 350 e 450 °C/12 h.

Os altos valores de UTS, YS e dureza podem ser relacionadas ao estado coquilhado da fita metálica que consiste de uma solução sólida supersaturada com presença de soluto não-dissolvido na matriz de Al (ver figura 1). Neste caso, os átomos de soluto afetam o arranjo da rede reticular do solvente, assim como, a natureza das forças de ligação, devido à interação das diferentes espécies atômicas. Outro fator que pode contribuir é relacionado às tensões internas que podem ser retidas durante o resfriamento rápido até a temperatura ambiente. Tais tensões podem surgir desde a diferença na expansão térmica dos diferentes precipitados e do solvente. O desaparecimento desses mecanismos parece ser responsável pela redução de UTS e YS em fitas tratadas termicamente em 200°C/12h devido ao processo de relaxamento das tensões internas. O aumento de dureza na mesma amostra sugere que o tratamento térmico em 200°C por 12 horas ainda corresponde ao tratamento de endurecimento para a liga A359. Embora, esses tratamentos geralmente são realizados em temperaturas abaixo de 175°C para ligas do sistema Al-Si-Mg (Zhang, 1996). O aumento de dureza pode ser atribuído à precipitação de partículas de β'' -Mg₂Si fora da solução sólida supersaturada de Al- α e possivelmente à baixa relação atômica Mg:Si em ligas solidificadas rapidamente e que provavelmente, também deveriam aumentar a fração de volume dos precipitados de β'' -Mg₂Si (Martin, 1980). Aumentando a temperatura de tratamento térmico para 450°C a dureza repentinamente foi reduzida para ~42 kgf/mm². Esse valor é inferior a amostras fundidas de forma convencional. Tal redução é resultado basicamente do engrossamento estrutural, da redução de níveis de tensão interna e da redução da quantidade de precipitados.

A figura 5 mostra imagens de elétrons secundários (SEM) da superfície fraturada da fitas tracionadas em temperatura ambiente. Os padrões de fratura na fita coquilhada e depois de tratada termicamente em 200 °C, podem ser relacionadas a uma fratura frágil com características de fratura de clivagem. A superfície de fratura de grãos celulares na fita coquilhada (Fig. 5a-a1), sugere uma fratura intergranular, como resultado do processo de solidificação rápida. O mesmo tipo de fratura é observado na fita tratada termicamente em 200 °C (Fig. 5b-b1). Entretanto, a propagação da trinca não é muito clara nos contornos de grão devido a que é observada uma aparência de superfície de fratura mais plana. Esse comportamento concorda bem com o aumento da dureza devido ao tratamento de térmico de endurecimento e à precipitação de segundas fases na fita recozida em 200°C/12 h. Por outro lado, a fita tratada termicamente em 450°C (Fig. 5c-c1) mostrou uma superfície de fratura que é caracterizado por presença de “dimples” com tamanhos próximos a 2 μm que são superiores à partículas localizadas no interior dos “dimples”. Também é sugerido que a propagação da trinca tomou lugar através do mecanismo de coalescência de vazios (onde os vazios resultam desde fratura ou eliminação de partículas de Si). Os “dimples” e padrões de ondulações observados na superfície de fratura sugerem um tipo de fratura transgranular ao longo dos contornos de grão. Esses resultados contribuem à redução de UTS, YS e da dureza. Sugerindo, que um aumento da temperatura de tratamento térmico aumenta o tamanho das partículas

precipitadas, entretanto, o número desses precipitados diminuiu resultando num amolecimento gradual da matriz Al- α devido à redução gradual de soluto.

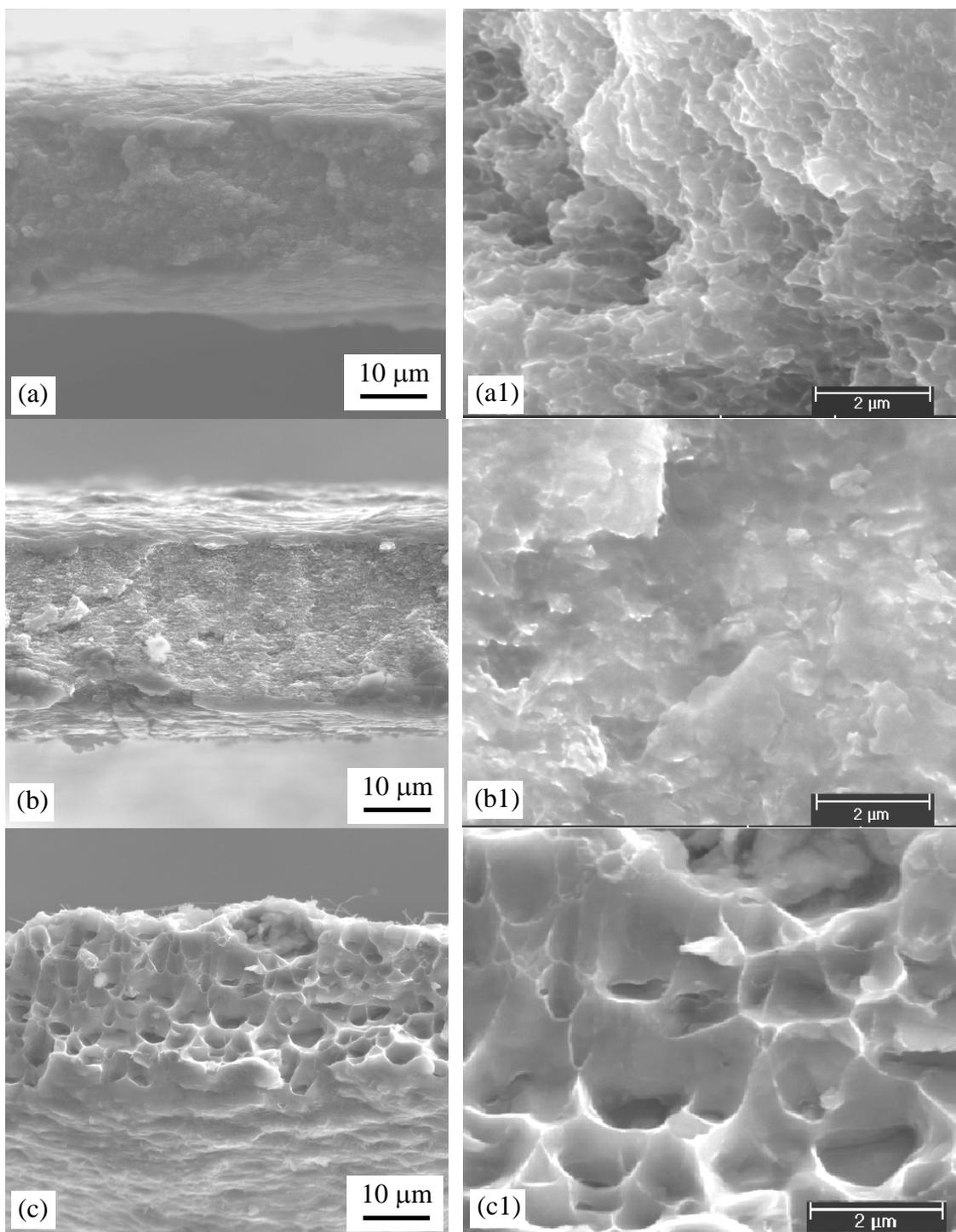


Figura 5. Superfície de fratura de fitas após ensaio de tração em: (a-a1) fita coquilhada, e fitas tratadas termicamente em (b-b1) 200°C / 12 h, e (c-c1) 450°C / 12 h.

4. CONCLUSÕES

No presente trabalho foram analisadas as características microestruturais, a dureza e o comportamento de tração da fita A359. A seção transversal da fita coquilhada exibiu um refinamento estrutural com zonas constituídas de grãos celulares-dendriticos e zona sem característica. A estrutura celular equiaxial foi constituída por partículas de silício preferencialmente precipitados ao longo dos contornos de grão formando canais de silício e também precipitados de silício distribuídos no interior das células de Al- α . A taxa de resfriamento da fita coquilhada foi estimada entre 3.01×10^5 – 1.6×10^6 K/s. Tratamentos térmicos da fita coquilhada mostraram um crescimento de nanopartículas de Si de 19 nm

para 80 nm (para 200 °C/12 h) e 1.72 µm (450 °C/12 h). O melhoramento de dureza, UTS e YS da fita coquilhada em relação às ligas preparadas de forma convencional são relacionadas à quantidade de Si em forma de solução sólida e devido ao refinamento microestrutural. A diminuição das propriedades térmicas após tratamentos térmicos de recozimento podem ser atribuídos à precipitação de silício e ao subsequente crescimento das partículas de silício. Entretanto, a ductilidade não foi melhorada como resultado da solidificação rápida e dos tratamentos térmicos. A fita coquilhada e após tratada termicamente em 200°C mostrou uma fratura frágil do tipo-clivagem diferente da fita tratada termicamente em 450 °C, que mostrou uma fratura do tipo-dimple.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP e CNPq pelo suporte financeiro.

6. REFERÊNCIAS

- Jones, H., 1984, Mater. Sci. Eng. V.65, pp.145.
Lu, X. Y., Cao, C. D., Wei, B., 2000, Mater. Sci. Eng., V.A313, pp.198.
Mahanti, R. K., Lai, K., Shiha, A. N., Sivaramakrishnam, C. S., 1993, Mater. Trans. JIM, V.34, pp.1207.
Martin, J. W., 1980, "Micromechanisms in particle hardened alloys", Cambridge University Press, England, V.54.
Matyja, H., Giessen, B. C., Grant, N. J., 1968, J. Inst. Metals, V.6, pp.30.
Qian, L., Toda, H., Nishido, S., Akahori, T., Niinomi, M., Kobayashi, T., 1995, Metall. Mater. Trans. A, V.36A, pp.2979.
Samuel, A. M., Samuel, F. H., 1995, Metall. Mater. Trans. A, V.26^a, pp.2359.
Stoichev, N., Petrov, K., Yaneva, S., Kovachev, P., 2002, Mater. Sci. Eng. V.A337, pp.12.
Triveño Rios, C., Bolfarini, C., Botta, W. J., Kiminami, C. S., 2004, J. Metastable and Nanocrystalline Materials, V.20-21, pp.594.
Wagner, C., 1961, Zs. f. Elektrochemie, V.65, pp.581.
Zhang, D. L., 1996, Mater. Sci. Forum, V.217-222, pp.771.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material incluído no presente trabalho.

MIICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES Of Al-Si-Mg RIBBONS

C. Triveño Rios, ¹triveno@ufmt.br

C. Bolfarini, ²cbolfa@ufscar.br

W. J. Botta, ²wjbottaf@ufscar.br

C. S. Kiminami, ²kiminami@ufscar.br

¹Engenharia Mecânica Instituto de Ciências Agrícolas e Tecnológicas (ICAT) – Campus Universitário Rondonópolis, Universidade Federal de Mato Grosso. 78735-901, Rondonópolis, MT, Brasil.

²Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, CP 676, 13565-905, São Carlos, SP, Brasil.

Abstract. *In this study, the effect of the microstructural characteristics on the mechanical properties of rapidly solidified A359-type alloy was studied. As a result of the rapid solidification processing by melt-spinning, fine equiaxed cells grains with sizes in the range of 0.4 to 0.7 µm were observed in the ribbon. Heat treatment of the as melt-spun ribbon showed a growth of the nanozided Si particles from 19 nm to 80 nm (200 °C/12 h) and 1.72 µm (450 °C/12 h). The improvement in hardness and tensile properties are related to supersaturated α-Al solid solutions and to the structural refinement. The decrease in hardness and tensile properties after thermal ageing are attributed to Si precipitation and subsequent growth of Si particles. The as melt-spun and after heat treated at 200 °C ribbons exhibited a brittle fracture different of the after heat treated at 450 °C ribbon which showed a ductile fracture surface.*

Keywords. *Microstructure, mechanical properties, quenching, metals and alloys.*