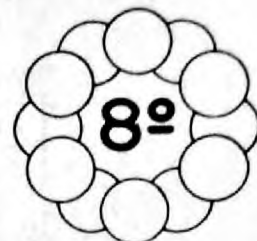




UNICAMP

CARACTERIZAÇÃO DE LIGAS DE ALUMÍNIO SOLIDIFICADAS RAPIDAMENTE

WALDEMAR ALFREDO MONTEIRO  
Departamento de Metalurgia Nuclear - IPEN-CNEN/SP



cbecimat

*O objetivo deste trabalho foi investigar as propriedades mecânicas (ensaios de tração e microdureza) e microestruturais (metalografia óptica e eletrônica) de fitas das ligas de alumínio 3003, 7050 e da liga Al-9% Mg obtidas pelo processo de solidificação rápida (taxa de resfriamento  $10^4$  a  $10^6$  K/s).*

*O processo de solidificação rápida destas ligas de alumínio leva ram a uma microcristalinidade e ausência de precipitação grosseira nas mesmas além de melhoria das propriedades mecânicas comparando-as com as ligas obtidas por processos convencionais.*

### INTRODUÇÃO

Crescentes necessidades na melhoria das propriedades de ligas metálicas utilizadas em sistemas estruturais tem levado pesquisadores a estudos visando este objetivo. Uma consideração importante é o peso destes materiais, por isso é fundamental o uso de materiais de baixa densidade. Assim sendo, o alumínio e suas ligas são os primeiros candidatos a aplicações estruturais [1,2].

A tecnologia de solidificação rápida tem sido largamente utilizada em ligas de alumínio com o intuito de alcançar microestruturas singulares e de aumentar o intervalo e quantidade de elementos de liga que podem ser adicionados. Um dos métodos mais simples para realizar o processo de solidificação rápida é o método chamado "Melt Spinning". O processo de solidificação rápida produz materiais amorfos e microcristalinos que tem propriedades físicas interessantes (mecânica, magnética, resistência à corrosão, maior resistência à irradiação com partículas energéticas, etc) [3].

Como sabemos, a solidificação rápida de metais e ligas traz um aumento no comportamento mecânico dos mesmos que juntamente com uma suficiente estabilidade térmica da microestrutura permite processar-se o material (por exemplo, a solidificação de pós a quente) ou utilizá-lo em altas temperaturas de serviço [4,5].

O objetivo deste trabalho foi investigar propriedades mecânicas (ensaios de tração e microdureza) e microestruturais (metalografia óptica e eletrônica) de fitas das ligas de alumínio das séries 219, 3003 e 7050, obtidas pelo processo de solidificação rápida.

### PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A partir de ligas de alumínio comerciais (3003; 7050) e de laboratório (Al-9%Mg) foram produzidas as fitas metálicas, pelo método "Melt spinning" (solidificação rápida), com o qual se consegue taxas de resfriamento da ordem de  $10^4$  a  $10^6$  K/s. A espessura média obtida foi de 0,06mm e largura média de 3mm (as fitas metálicas foram obtidas no laboratório do Departamento de Física dos Materiais e Mecânica do IFUSP).

Para caracterização das fitas metálicas solidificadas rapidamente utilizaremos ensaios de tração e microdureza e observações metalográficas ópticas e eletrônicas. Para os ensai-

os de tração utilizou-se célula de carga de 50Kgf, com velocidade da ponte de 0,5mm/min em uma máquina Instron. As amostras de tração foram selecionadas utilizando-se trechos da fita metálica que não apresentassem muita variação de largura e espessura; o "gage length" utilizado foi de 30mm. Para os ensaios de microdureza e observação metalográfica óptica, as fitas solidificadas rapidamente, foram embutidas a frio em resina. Foram feitos ensaios de microdureza na seção longitudinal e transversal das fitas e obtido a média. A carga utilizada foi de 20 gramas. Tanto para os ensaios de microdureza como para a observação metalográfica óptica, seguiram-se os procedimentos usuais de polimento mecânico. A revelação de grãos foi feita com polimento eletrolítico (eletrólito: 700ml de álcool etílico, 120ml de água destilada, 100ml de butil-glicol e 68ml de ácido perclórico com ddp de 14 volts. Para a preparação de amostras de microscopia eletrônica de transmissão, obteve-se a partir das fitas metálicas, discos de 3mm de diâmetro, que foram polidos eletroliticamente com o intuito de se conseguir regiões da amostra que fossem transmissíveis aos eletrons; o equipamento utilizado foi o JEM-200C.

### RESULTADOS

A composição química das ligas de alumínio utilizadas para a confecção das fitas solidificadas rapidamente está colocada na Tabela 1.

Foram realizados ensaios mecânicos com as fitas solidificadas rapidamente (SR) e os resultados estão apresentados na tabela 2; para fins de comparação estão colocados valores dos ensaios mecânicos nestas mesmas ligas obtidas pelo processo convencional, na condição de liga só fundida (valores retirados da literatura) [6].

A escolha destas três ligas de alumínio (3003; Al-9%Mg; 7050) se deveu principalmente ao fato de que apresentam crescente resistência mecânica, respectivamente, além do fato de que os elementos de liga presentes favorecem esta condição endurecedora. É também importante, reduzir-se o tamanho de partículas de segunda fase com o intuito de aumentar a resistência à fratura destas ligas.

Tabela 1. Composição química das ligas de alumínio

Liga	%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Cr	%Zn	%Ti	Outros	%Al
3003	0,19	0,65	0,14	0,90	0,01	0,01	0,01	0,01	0,15	restante
219	0,25	0,35	0,12	0,60	9,05	0,08	0,07	0,02	0,15	restante
7050	0,12	0,15	2,60	0,10	2,50	0,30	5,60	0,06	0,15	restante

Tabela 2. Ensaio Mecânicos da ligas de alumínio

Liga	Processo de solidificação	UTS (MPa)	$\delta\%$	Microdureza Vickers (Kg/mm <sup>2</sup> )
3003	solid. rápida	69,2 <sub>±3,5</sub>	11	34,7 <sub>±1,7</sub>
	conv.	50-56	6-8	28-31
219	solid. rápida	159,6 <sub>±8,0</sub>	8	66,2 <sub>±3,3</sub>
	conv.	80-95	3-4	55-60
7050	solid. rápida	227,8 <sub>±9,5</sub>	7	90,9 <sub>±4,5</sub>
	conv.	100-130	4-5	65-70

A microestrutura das ligas de alumínio SR apresentou a microcristalinidade desejada. A figura 1 nos mostra a microestrutura (corte transversal) por microscopia óptica da liga de alumínio 3003 SR, nota-se um tamanho de grão bem reduzido. Para uma observação detalhada desta microestrutura, as figuras 2 e 3 apresentam micrografias eletrônicas (Microscopia eletrônica de transmissão) que evidenciam o refinamento dos grãos, apresentando estrutura celular com fina segregação localizada nas paredes celulares.

Na liga Al-9%Mg SR novamente observou-se a diminuição do tamanho de grão. A figura 4 traz a microestrutura por microscopia óptica onde a distinção dos grãos é muito difícil. As figuras 5 e 6 mostram micrografias eletrônicas (MET) com presença de grãos finos e precipitação reduzida, apesar da alta porcentagem de magnésio na liga.

Finalmente, na liga 7050 SR observou-se também a diminuição do tamanho de grão, maior solubilidade e a presença da precipitação que localizou-se junto a subcontornos de grão. A figura 7 apresenta a microestrutura típica por microscopia óptica da fita solidificada rapidamente. As figuras 8 e 9 trazem as micrografias eletrônicas desta liga onde se vê, em alguns subgrãos, o arranjo de discordâncias e a baixa presença de precipitação no interior dos mesmos.

Em todas as fitas SR das três ligas estudadas observou-se, por microscopia óptica, em corte transversal, uma zona com solidificação de grãos bem finos, junto ao lado do substrato, seguida de uma região com uma estrutura de solidificação colunar que apresentou uma ligeira inclinação destes grãos para o lado da direção da velocidade do substrato e finalmente uma região com estrutura de solidificação de grãos equiaxiais situado no topo da fita. Outro aspecto observado foi o de que há uma ligeira alteração da taxa de resfriamento das ligas durante o processo alterando a microestrutura da fita (aumento do tamanho de grão e mais precipitação presente).

#### DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

A tabela 2 apresenta os dados obtidos em ensaios mecânicos (tração e microdureza) para as três ligas. Constata-se uma melhoria das

propriedades mecânicas utilizando-se o processo de solidificação rápida (melt spinning) em comparação com o processo de solidificação convencional. O que leva a melhoria das propriedades mecânicas destas ligas pode ser constatado por meio das microestruturas obtidas. Em razão destas alterações microestruturais (tamanho de grão refinado, extensão da solução sólida, dispersão uniforme dos precipitados finos) haverá introdução de precipitações locais da matriz, mudança do módulo elástico e da falha de empilhamento, afetando a passagem de discordâncias e isto determina a tensão de escoamento da liga. Em processos convencionais de solidificação, o grau de resistência é limitado a baixa solubilidade em equilíbrio e pela tendência de segregação de muitos elementos.

Além disso, o tamanho das partículas de dispersóides presentes é muito crítico, já que uma distribuição de tamanho bem fino faz com que as partículas atuem como endurecedores sem atuarem como sítios de nucleação de vazios [7].

Com relação as micrografias eletrônicas, convém salientar que devido ao processo de polimento eletrolítico, simultâneo aos dois lados da fita, só se pôde documentar microestruturas da região intermediária da fita. As microestruturas observadas mostraram que o tamanho de subgrãos situou-se entre 0,2 $\mu$ m a 1,5 $\mu$ m, permanecendo um arranjo de discordâncias mais próximo aos subcontornos e na região dos subcontornos encontrou-se maior precipitação. O refinamento estrutural e a melhoria das propriedades mecânicas de ligas de alumínio então podem ser esclarecidos por meio de muitos parâmetros microestruturais: tamanho de grão refinado, estrutura celular com fina segregação, uma distribuição mais homogênea de partículas de dispersóides de baixa solubilidade e um aumento da solubilidade do soluto que poderá levar a uma subsequente precipitação adicional.

Naturalmente, existem inconvenientes no processo de solidificação rápida que com posteriores melhorias de processo poderão ser eliminados, como por exemplo, limitação da espessura das fitas. Por outro lado, a solidificação rápida poderá ser uma das etapas na preparação de ligas metálicas por metalurgia do pó, levando consigo a manutenção de refinamento de grão e maior solubilidade dos segundos elementos de liga, diminuindo etapas de conformação mecanotérmicas, levando a uma economia do processo e obter-se ligas metálicas mais resistentes mecanicamente e à corrosão.

#### AGRADECIMENTOS

O autor gostaria de agradecer ao Prof. F.P. Missell e à MSc Maria Virginia Altoé pela produção das fitas SR; a MSc Maria da Conceição B.V. Soares; Mariano Castagnet; Eliezer D. de Oliveira; Glauson A.F. Machado pela realização dos ensaios mecânicos, preparação metalográfica, ensaios de microdureza e confecção das fotos, a Ana Lúcia Rodrigues de Paula pela datilografia do texto, sem os quais este trabalho não teria sido realizado.

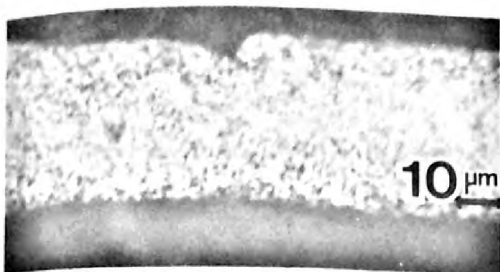


Figura 1. Microestrutura da liga de alumínio 3003 solidificada rapidamente, metalografia óptica, secção transversal da fita, a parte inferior na foto é a parte de contacto com o substrato (roda de cobre-cromo).

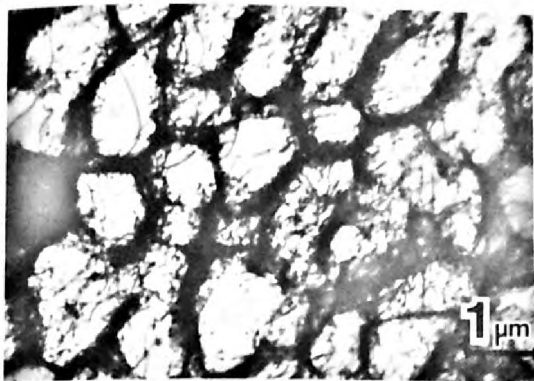


Figura 2. Microestrutura da liga de alumínio 3003 SR, metalografia eletrônica, arranjo celular/subgrãos onde a precipitação ocorre junto às paredes celulares.

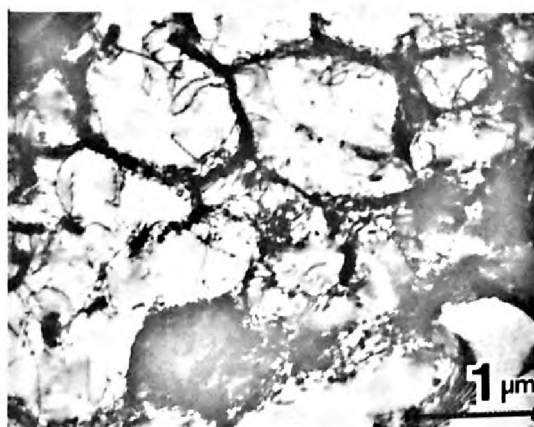


Figura 3. Microestrutura da liga de alumínio 3003 SR, metalografia eletrônica, presença de precipitados interagindo com rede de discordâncias.

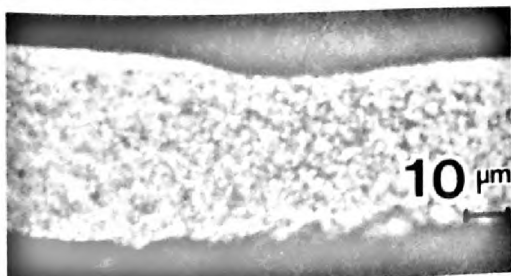


Figura 4. Microestrutura da liga Al-9%Mg solidificada rapidamente, metalografia óptica, secção transversal da fita, a parte inferior na foto de contato com o substrato.

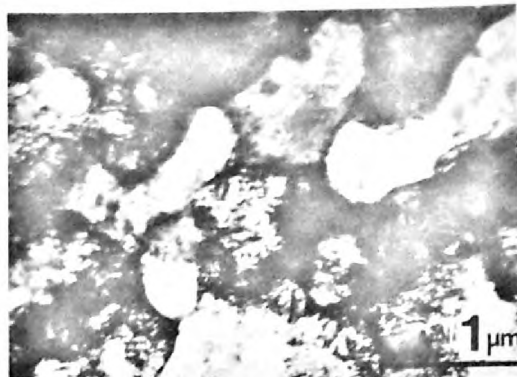


Figura 5. Microestrutura da liga Al-9%Mg SR, metalografia eletrônica, grãos contendo rede de discordâncias com pouca precipitação presente.

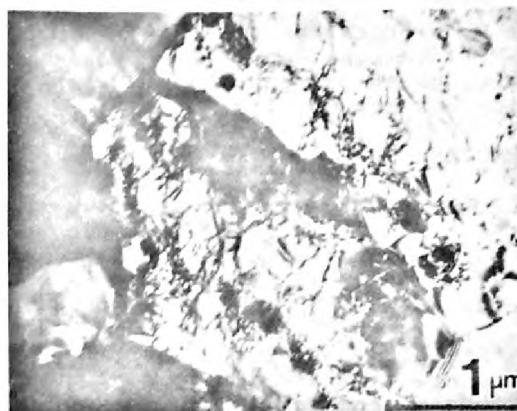


Figura 6. Microestrutura da liga Al-9%Mg SR, metalografia eletrônica, grãos apresentando arranjos de discordâncias interagindo com precipitação fina.

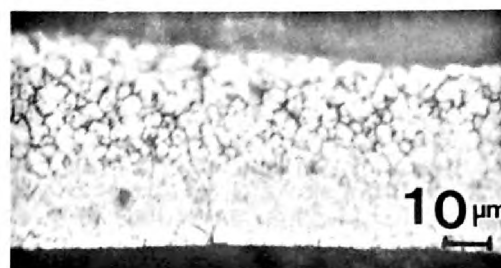


Figura 7. Microestrutura da liga de alumínio 7050 solidificada rapidamente, metalografia óptica, corte transversal da fita, parte inferior na micrografia é a parte de contacto com o substrato.

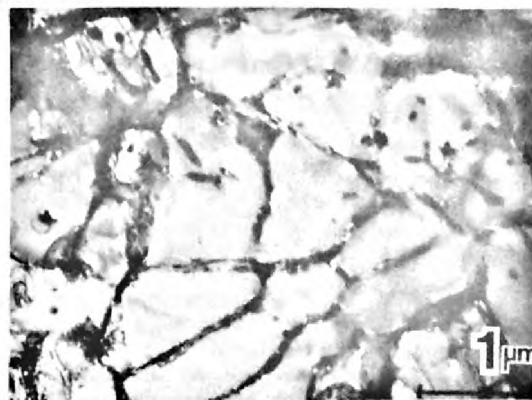


Figura 8. Microestrutura da liga de alumínio 7050 SR, metalografia eletrônica, arranjo "celular" onde pode-se observar a baixa densidade de precipitados no interior, a precipitação se dá preferencialmente nos contornos.

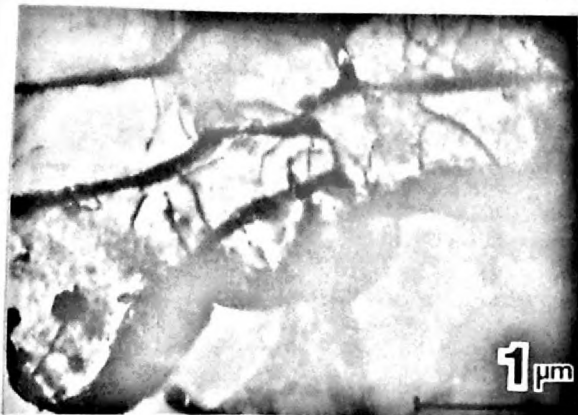


Figura 9. Microestrutura da liga de alumínio 7050 SR, metalografia eletrônica, detalhe dos subgrãos, baixa presença de precipitados no interior dos mesmos.

#### REFERÊNCIAS

- (1) Starke Jr., E.A., Aluminium alloys of the 70's: Scientific Solutions To Engineering Problems. An Invited Review, Mat.Sc. and Eng. 29 (1977), pag 99-115.
- (2) Lavernia, E., Poggiali, B., Servi, I., Clark, J. Katrak, F. and Grant, N., Rapidly Solidified Aluminium Alloys: A Market Assessment, Journal of Metals, nov.1985, pag.35-38.
- (3) Steeb, S. and Warlimont, H. (eds.) Rapidly Quenched Metals (1985), Elsevier Science Publishers B.V., North Holland, Amsterdam.
- (4) Duszczyk, J. and Jongenburger, P., Properties of Particles Produced By Different Rapid Solidification Techniques, Powder Metallurgy (1986) vol. 29 n°1, pags 20-25.
- (5) Froes, F.H. and Pickens, J.R., Powder Metallurgy Of Light Metal Alloys For Demanding Applications, Journal Of Metals, jan.1984, pag 14-26.
- (6) Van Lancker, M., Metallurgy Of Aluminium Alloys, (1967), Chapman and Hall Ltd., London.
- (7) Williams, J.C. and Hirth, J.P., Rapid Solidification Processing: Principles And Technologies III, R. Mehrabian (ed), National Bureau of Standards, 1983, pag 135.

#### SUMMARY

This paper discusses the investigation of the microstructural and mechanical properties of the aluminium alloys (3003; 7050; Al-9% Mg) rapidly solidified by melt spinning process (cooling rate:  $10^4 - 10^6$  K/s).

The rapidly solidification process of the studied aluminium alloys brought a microcrystallinity, a minimum presence of coarse precipitation and, also, better mechanical properties of them comparing to the same alloys using ingot process.