

# Processos de solidificação rápida em ligas de alumínio

Waldemar A. Monteiro

*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 levou 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

A necessidade crescente da melhoria das propriedades de ligas metálicas utilizadas em sistemas estruturais, aliada ao próprio peso destes materiais, tem levado a se estudar, cada vez mais, materiais de baixa densidade, como é o caso do alumínio e suas ligas<sup>(1,2)</sup>. Processos empregando a tecnologia de solidificação rápida têm sido largamente utilizados em ligas de alumínio, visando alcançar microestruturas singulares e aumentar o intervalo e quantidade dos elementos de liga que podem ser adicionados.

O processo de solidificação rápida produz, em muitos casos, materiais com acentuada microcristalinidade, que induz melhoria das propriedades mecânicas, aumentando a resistência à corrosão e melhorando as propriedades elétricas dos mesmos<sup>(3)</sup>. Um dos métodos mais simples para se realizar o processo de solidificação rápida é o método chamado "Melt Spinning" (Figura 10). Este método produz longas fitas metálicas com espessura média situada em 60  $\mu$ m e largura de 10 mm.

A solidificação rápida pode ser uma das etapas na preparação de ligas metálicas por metalurgia do pó, levando consigo a manutenção do refino de grão e maior solubilidade dos segundos elementos de liga, diminuindo etapas de conformação mecanotérmicas, com conseqüente economia de processo, obtendo-se ligas metálicas mais resistentes mecanicamente e à corrosão<sup>(4,5,6)</sup>.

Neste trabalho, apresentamos uma análise microestrutural e mecânica de três ligas de alumínio obtidas pelo método de solidificação rápida (melt spinning).

## 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 0,06 mm e largura média de 3 mm (as fitas metálicas foram obtidas no laboratório do Departamento de Física dos Materiais e Mecânica do IFUSP).

Para caracterização das fitas metálicas solidificadas rapidamente utilizaram-se ensaios de tração e microdureza e observações metalográficas ópticas e eletrônicas. Para os ensaios de tração utilizou-se célula de carga de 50 kgf, com velocidade da ponte de 0,5 mm/min em 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 30 mm. 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 secção longitudinal e transversal das fitas e obtida 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: 700 ml de álcool etílico, 120 ml de água destilada, 100 ml de butil-glicol e 68 ml 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 3 mm 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.

Waldemar A. Monteiro – Físico, Membro da ABM, DrSc., Pesquisador da Diretoria de Materiais Nucleares, IPEN-CNEN/SP, Professor da CPG/USP.

Contribuição técnica nº 2160, apresentada no II Seminário de Tecnologia da Indústria do Alumínio, promovido pela ABAL/ABM, em S. Paulo, de 2 a 7 de abril de 1989.

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)<sup>(7)</sup>.

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.

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 evidenciaram o refino dos grãos, apresentando estrutura celular com fina segregação localizada nas paredes celulares.

Na liga Al-9%Mg SR novamente se observou 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 (MET) com presença de grãos finos e precipitação reduzida, apesar da alta porcentagem de magnésio na liga.

Finalmente, na liga 7050 SR observa-se também a diminuição do tamanho de grão, maior solubilidade e a presença de precipitação que se localizou 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 maior precipitação presente).

## DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

A tabela 2 apresenta os dados obtidos em ensaios mecânicos (tração e microdureza) para as três ligas. Consta-se uma melhoria das propriedades mecânicas, utilizando-se o processo de solidificação rápida (melt-spinning) em comparação com o

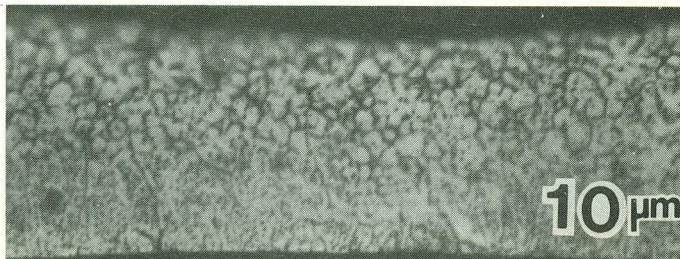


Fig. 1 – Microestrutura da liga de alumínio 3003 solidificada rapidamente, metalografia óptica, secção transversal da fita, a parte inferior na foto é a parte de contacto com o substrato (roda de cobre-cromo).



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

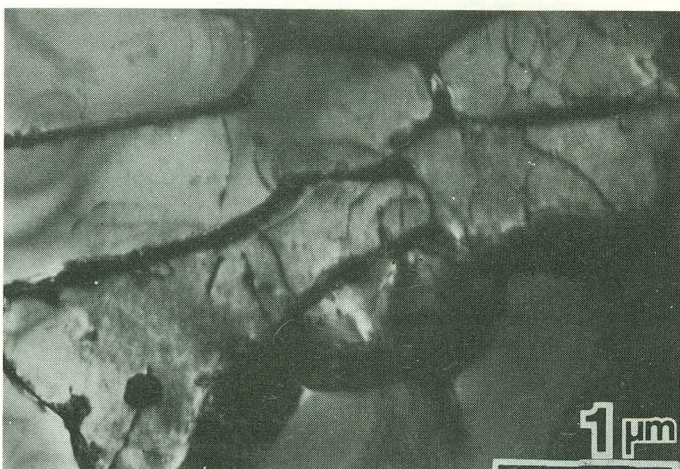


Fig. 3 – Microestrutura da liga de alumínio 3003 SR, metalografia eletrônica, presença de precipitados interagindo com rede de discordâncias.

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 – Ensaios Mecânicos das ligas de alumínio.

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

processo de solidificação convencional. O que leva à 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 deformações 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 ten-

dência 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<sup>(8,9)</sup>.

Com relação às 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  $\mu\text{m}$  a

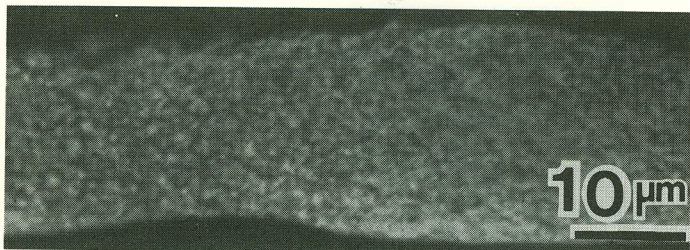


Fig. 4 – Microestrutura da liga Al-9%Mg solidificada rapidamente, metalografia óptica, seção transversal da fita, a parte inferior na foto de contato com o substrato.

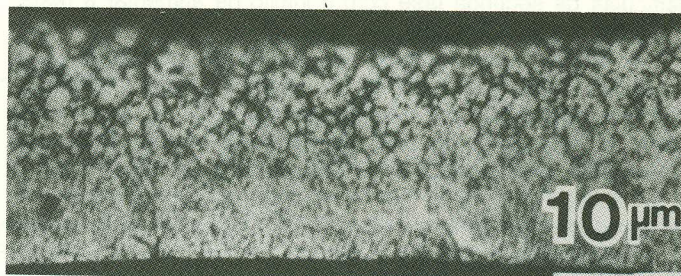


Fig. 7 – Microestrutura da liga de alumínio 7050 solidificada rapidamente, metalografia óptica, corte transversal da fita, parte inferior na micrografia é a parte de contacto com o substrato.



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



Fig. 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.

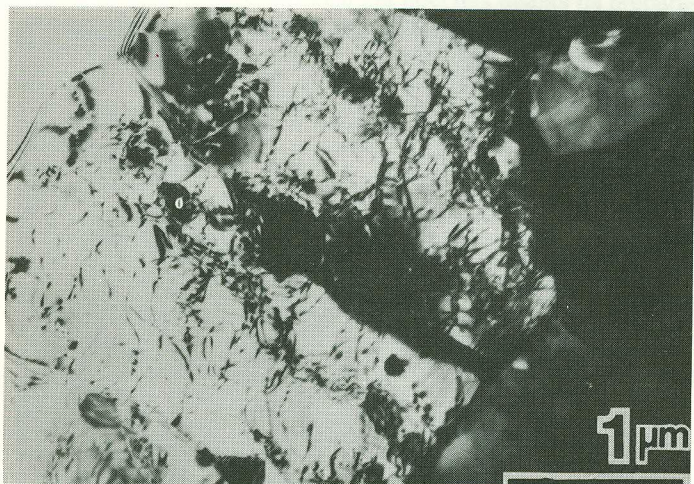


Fig. 6 – Microestrutura da liga Al-9%Mg SR, metalografia eletrônica, grãos apresentando arranjos de discordâncias interagindo com precipitação fina.

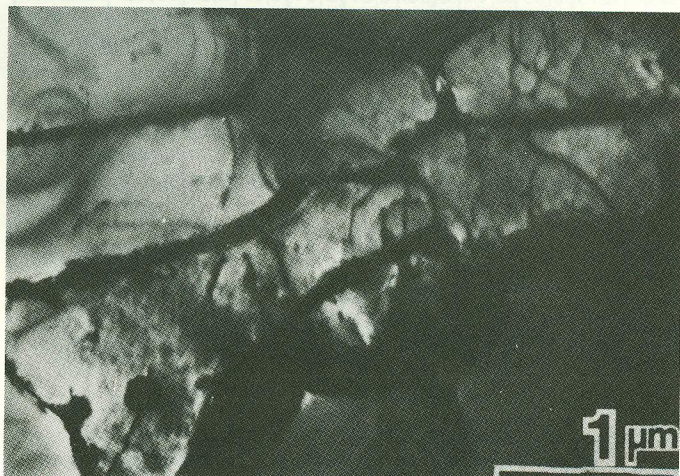


Fig. 9 – Microestrutura da liga de alumínio 7050 SR, metalografia eletrônica, detalhe dos subgrãos, baixa presença de precipitados no interior dos mesmos.

## AGRADECIMENTOS

O autor gostaria de agradecer ao Prof. F.P. Missel e a MSc Maria Virgínia Altoé pela produção das fitas metálicas solidificadas rapidamente.

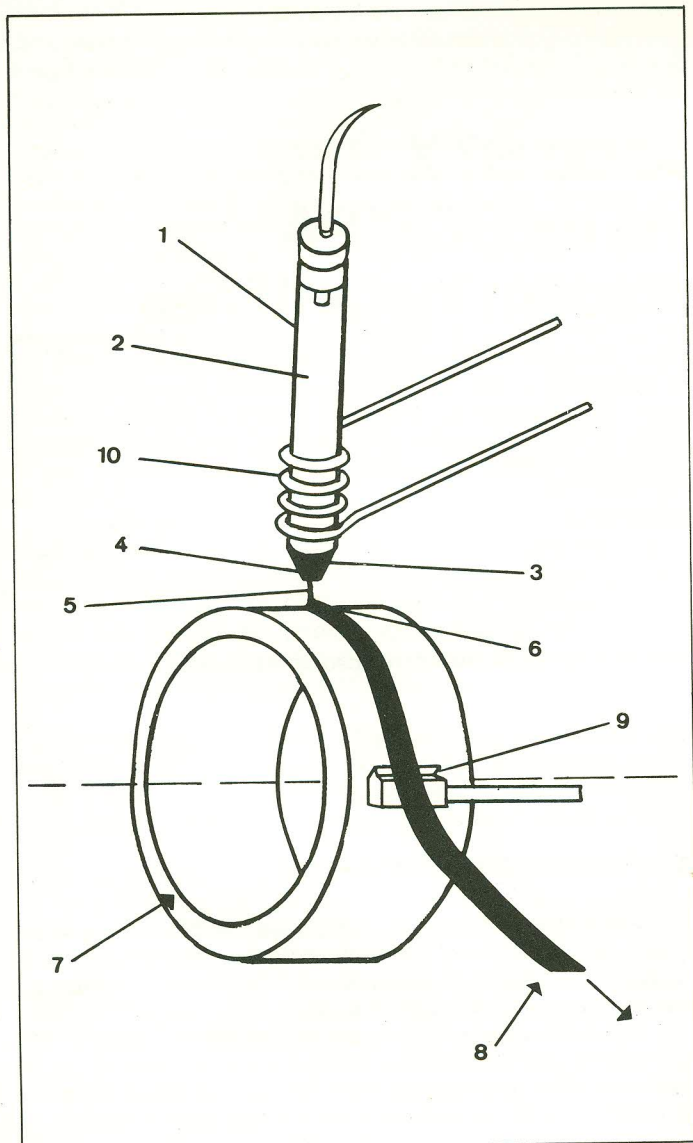


Fig. 10 - Processo "Melt Spinning" (Esquemático)  
 1. Tubo de Quartzo; 2. Gás; 3. Liga metálica no estado líquido;  
 4. Bocal; 5. Jato; 6. Poça do metal fundente; 7. Roda de cobre;  
 8. Fita; 9. Pressão de gás; 10. Bobina de Redução.

1,5  $\mu\text{m}$ , permanecendo um arranjo de discordâncias mais próximo aos subcontornos e na região dos subcontornos encontrou-se maior precipitação. O refino 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, persistem ainda inconvenientes no processo de solidificação rápida que, com posteriores melhorias do processo, poderão ser eliminados (como, por exemplo, limitação da espessura das fitas). Como já foi mencionado antes, a solidificação rápida poderá ser uma das etapas na preparação de ligas metálicas por metalurgia do pó, pois as referidas fitas metálicas solidificadas rapidamente podem ser fabricadas em pedaços bem reduzidos, com conseqüentes processamentos de compactação e sinterização (processos usuais em metalurgia do pó). A vantagem é a permanência do refino de grão e maior solubilidade dos segundos elementos de liga, com diminuição das etapas convencionais de conformação mecanotérmicas e tendo maior economia de processo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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. Duszczuk, J. and Jongenburger, P., Properties of Particles Produced By Different Rapid Solidification Techniques, *Powder Metallurgy* (1986) vol. 29 nº 1, pages. 20-25.
5. Collins, L.E., Overview of rapid solidification technology *Canadian Metallurgical Quarterly*, vol. 25, nº 1, pages. 59 a 72 (1986).
6. Froes, F.H. and Pickens, J.R., *Powder Metallurgy of Light Metal Alloys for Demanding Applications*, *Journal of Metals*, Jan. 1984, pag. 14-26.
7. Van Lancker, M. *Metallurgy of Aluminium Alloys*. (1967). Chapman and Hall Ltd., London.
8. Williams, J.C. and Hirth, J.P., *Rapid Solidification Processing: Principles and Technologies III*. R. Mehrabian (ed). National Bureau of Standards, 1983, pag. 135.
9. Russell, K.C. and Froes, F.H., Dispersoid formation and stability in alloys. *Journal of Metals*, March 1988, pag. 29-35.