

Caracterização da liga comercial de alumínio 3003 produzida por fundição contínua de chapas (twin roll caster) - microestrutura

Juliana de Paula Martins

*Dra. Pós-graduada pelo Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da EPUSP
E-mail: jpaula@usp.br*

Angelo Fernando Padilha

*Dr. Professor Titular - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da EPUSP
E-mail: padilha@usp.br*

Resumo

O presente trabalho caracterizou a microestrutura da liga comercial de alumínio 3003, produzida em escala industrial pelo processo de fundição contínua de chapas. Microscopia óptica com luz polarizada e campo escuro, microscopia eletrônica de varredura e ensaios de dureza Brinell foram utilizados. Os teores de manganês em solução sólida foram avaliados por medidas de resistividade elétrica. A análise química, ao longo da espessura da chapa é homogênea, ou seja, revela ausência de macro-segregação. A microestrutura da liga caracteriza-se pela presença de grãos com estrutura dendrítica, partículas primárias da fase $Al_6(Mn,Fe)$ localizadas, preferencialmente, nos contornos de grão e a fração volumétrica de precipitados varia ao longo da espessura.

Palavras-chave: Liga de alumínio 3003, fundição contínua de chapas, caracterização.

Abstract

The present work characterized the microstructure of a commercial 3003 aluminum alloy produced on an industrial scale by a twin roll caster process. Optical microscopy using polarized light and dark field, scanning electron microscopy, and Brinell hardness tests were carried out. The manganese content in solid solution was evaluated by electric resistivity measurements. The chemical composition across sheet thickness is homogeneous, in other words, there is no macro-segregation. A microstructural examination showed the presence of: grains with a dendritic structure, primary phase particles $Al_6(Mn,Fe)$ in the grain boundaries, and variable volumetric fractions of the precipitated along the thickness.

Keywords: 3003 aluminum alloy, twin roll caster, characterization.

1. Introdução

A produção direta de chapas bobinadas, pelo processo denominado “Twin Roll Caster” (TRC), tornou-se uma prática comum na indústria de alumínio [Li, 1995]. O uso da tecnologia Caster, para produtos laminados de alumínio, começou a crescer nos anos 70 e, hoje, contribui para um mercado de cerca de 20% dos produtos laminados de alumínio, ocupando um lugar de destaque na fabricação de bobinas [Altenpohl, 1997; Benedyk, 2001].

A grande vantagem do Caster é converter o metal fundido diretamente em chapa bobinada, pronta para laminação a frio, eliminando, assim, as operações associadas ao tradicional método de vazamento de placas “Direct Chill” (DC), que necessita de posterior laminação a quente [Taraglio, 1995; Uriz, 2000]. O sistema de vazamento Caster consiste na produção de chapas de alumínio a partir da passagem de metal líquido por dois cilindros refrigerados a água, combinando solidificação e laminação a quente em uma única operação e produzindo tiras que são facilmente bobinadas [Spinelli, 2002]. A espessura da chapa pode variar de 2 a 20 mm, enquanto a largura pode ultrapassar os 2150 mm [Gupta, 1999; Tricibar, 1999].

A liga de 3003 é uma das ligas de alumínio mais antigas e, até hoje, está entre as mais amplamente utilizadas. Ela preenche, em parte, o vazio existente entre o alumínio comercialmente puro e as ligas de alumínio de alta resistência (endurecíveis por precipitação coerente). A adição de manganês proporciona aumento de resistência mecânica, causando uma redução ligeira na ductilidade. A liga 3003 é utilizada, principalmente, em radiadores [Altenpohl, 1997].

2. Materiais e métodos

Chapas foram retiradas de bobinas vazadas com espessura de 7,0 mm e largura de 1360 mm. Como a velocidade de solidificação nas bordas das bobinas obtidas pelo processo Caster é maior que no centro, foram descartadas as laterais. A liga 3003 foi produzida pela Companhia Brasileira de Alumínio (CBA). As amostras foram analisadas na condição bruta de fundição e após tratamento térmico de homogeneização a 500°C por 12 horas.

A técnica de microscopia óptica foi utilizada na observação da microestrutura (sob luz polarizada) e na determinação da fração volumétrica de precipitados (campo escuro). A microestrutura bruta de fundição foi analisada, nas direções longitudinal e transversal, em relação à direção de laminação, e em três posições ao longo da espessura: superfície, centro e ¼ da espessura da chapa. A preparação metalográfica envolveu técnicas convencionais. Após o polimento, as amostras foram anodizadas, para revelar a estrutura dos grãos sob luz polarizada.

A microscopia eletrônica de varredura foi utilizada na determinação da fração volumétrica de precipitados, analisando imagens obtidas no modo de elétrons retroespalhados. A determinação da fração volumétrica de precipitados foi realizada com auxílio do software de análise de imagens KS300, a partir de imagens da microestrutura das ligas obtidas pelas técnicas de microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura.

Ensaio de dureza Brinell foram realizados em amostras da liga em dois estados: bruto de fundição e após homogeneização a 500°C por 12 horas.

Medidas de resistividade elétrica foram realizadas na liga 3003, na condição inicial (bruta de fundição), e após homogeneização, para avaliação do teor de Mn em solução sólida. Essas medidas foram realizadas pelo método das quatro pontas. Utilizando-se tinta prata, foram colocados quatro contatos nas amostras. As amostras são fixadas em um bloco de cobre (porta-amostra) juntamente com um sensor de temperatura. Elas são excitadas por uma corrente elétrica que varia de zero até 0,5 A. Para uma dada corrente de excitação I , a partir da leitura da tensão V , a resistência elétrica na amostra é obtida a partir da relação: $V = R * I$.

Após a obtenção da curva $V \times I$ em temperatura ambiente, as amostras são mergulhadas em nitrogênio líquido (77K) e o mesmo procedimento é repetido. A resistência elétrica é obtida a partir do ajuste linear dos pontos da curva $V \times I$. O equipamento utilizado está instalado no Departamento de Engenharia de Materiais da EEL/USP, Lorena.

3. Resultados e discussão

3.1 Análise química

A composição química analisada da liga 3003 é apresentada na Tabela 1. Pode-se observar que a relação Mn÷Fe é de 1,9.

Os resultados das análises de composição química, ao longo da espessura das amostras (superfície, ¼ de espessura e centro), apresentaram pequena variação, estando dentro da faixa de erro da técnica de análise empregada. Conclui-se que não há variação de composição

Tabela 1 - Composição química da amostra utilizada (% em peso).

Posição	Si	Fe	Mg	Mn	Cu	Cr	Ni	Ti	V	Zn	Ga	B
Superfície	0,084	0,631	0,001	1,224	0,236	0,004	0,002	0,024	0,008	0,009	0,012	0,003
1/4	0,083	0,630	0,001	1,223	0,236	0,004	0,003	0,029	0,008	0,009	0,013	0,004
Centro	0,084	0,631	0,001	1,221	0,236	0,004	0,002	0,028	0,008	0,009	0,013	0,004

química, ao longo da espessura, nas chapas obtidas pelo processo Caster.

3.2 Microestrutura da liga 3003

As microestruturas da liga 3003, bruta de fundição, nas secções longitudinal e transversal, são apresentadas nas Figuras 1a e 1b. Nota-se que os grãos estão bastante alongados na seção longitudinal.

Hupalo et al [2005] observaram que a microestrutura da liga 3003 proveniente do processo Twin Roll Caster, próxima à superfície, é similar à um material deformado. Os grãos aparecem mais alongados e paralelos à direção longitudinal. A região central, por outro lado, revela grãos relativamente equiaxiais, sugerindo que a deformação, durante a fundição, foi concentrada na superfície [Birol, 2002].

A Figura 2 apresenta a microestrutura encontrada na região central (metade da espessura) da amostra Caster. Comparando-se as Figuras 2a e 2b, percebe-se que a incidência de precipitados ocorre, principalmente, nos contornos de grão. Nota-se que a precipitação ocorre com mais frequência na região central da amostra.

A liga 3003 contém partículas primárias de $Al_6(Mn,Fe)$ e $\alpha-Al(Mn,Fe)Si$ [Mathew et al, 1984; Sperry, 1955; Martins, 2005]. Enquanto partículas de $Al_6(Mn,Fe)$ são maiores e originárias da solidificação, as partículas de $\alpha-Al(Fe,Mn)Si$ são, em geral, mais finas e podem, tanto ser formadas na solidificação, como ser produto da transformação do $Al_6(Mn,Fe)$ em $\alpha-Al(Fe,Mn)Si$, que ocorre durante o tratamento térmico de homogeneização. Padrões de difração de elétrons foram obtidos em microscopia eletrônica de transmissão e usados para a identificação de fases. As partículas primárias de $Al_6(Mn,Fe)$ são encontradas, com muita frequência, nas amostras Caster brutas de fundição, como pode ser visto na Figura 3a. Na Figura 3b, encontra-se a figura de difração de elétrons do precipitado $Al_6(Mn,Fe)$ encontrado na amostra Caster.

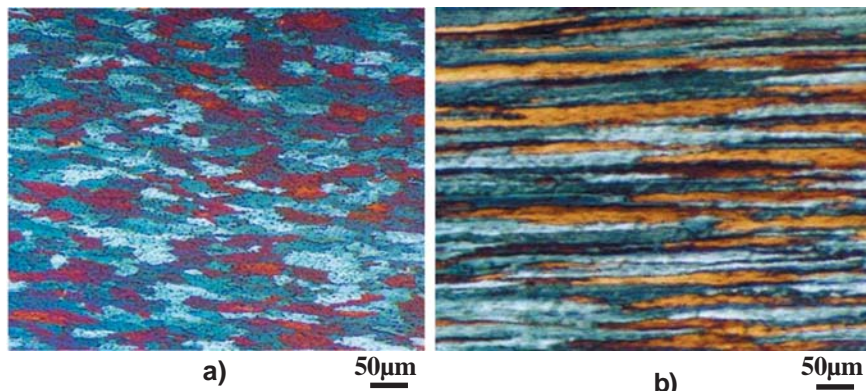


Figura 1 - a) Microestrutura na seção transversal da amostra Caster (bruta de fundição). b) Microestrutura na seção longitudinal da amostra Caster (bruta de fundição). Amostra anodizada com solução contendo ácido fluobórico. Microscopia óptica sob luz polarizada. Direção de laminação paralela à direção horizontal.

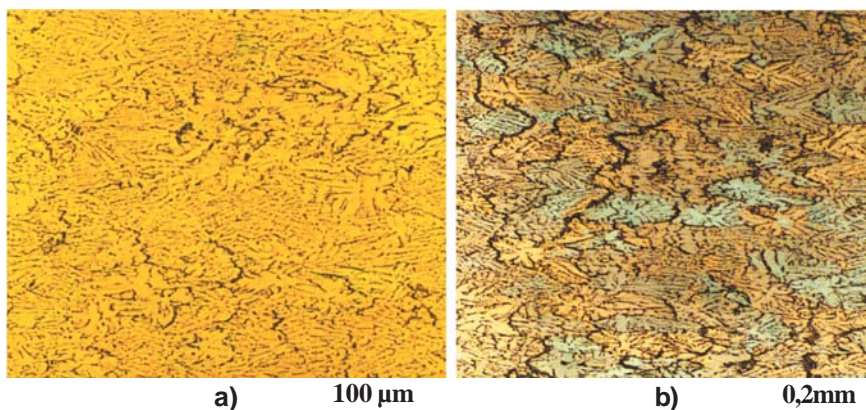


Figura 2 - a) Microestrutura da amostra Caster na região $\frac{1}{4}$ da superfície. b) Microestrutura da amostra Caster na região central. Direção de laminação paralela à direção horizontal.

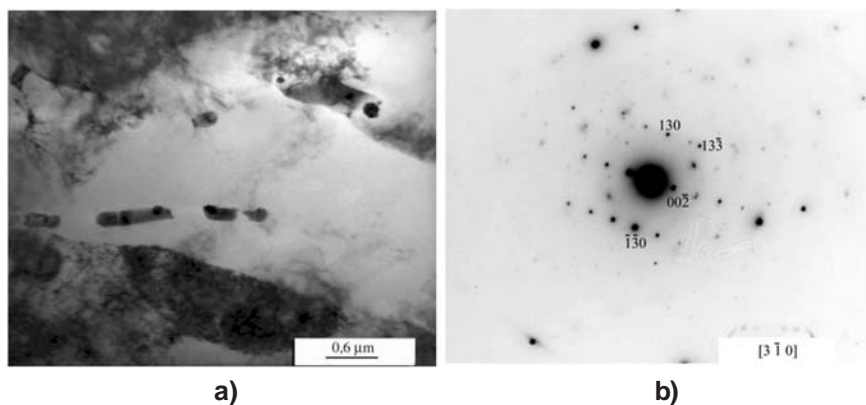


Figura 3 - Microestrutura da amostra Caster revelando a presença de dispersóides e difração de elétrons de um precipitado identificado como $Al_6(Mn,Fe)$. A direção do feixe de elétrons está indicada na micrografia. Microscopia eletrônica de transmissão. Amostra afinada eletroliticamente com solução contendo ácido perclórico.

3.3 Fração volumétrica de precipitados

A fração volumétrica foi determinada, ao longo da espessura das chapas, em três posições: superfície, ¼ da espessura e ½ da espessura (centro). Exemplos de imagens obtidas pela técnica utilizada, para a determinação da fração volumétrica de precipitados, são mostrados na Figura 4.

Utilizando-se medidas de metalografia quantitativa, foi possível comprovar que, na região central da chapa Caster bruta de fundição, a fração volumétrica de precipitados é maior (Tabela 2).

É interessante ressaltar que há diferença de fração volumétrica de precipitados, ao longo da espessura, mas não há variação de composição química como já foi mostrado (vide Tabela 1). Estudos feitos a partir de modelos matemáticos de fluxo de fluidos e transferência de calor [Saxena, 2002] revelam que há níveis ou contornos de temperatura, ou seja, enquanto a temperatura da superfície da chapa está menor (como por exemplo, 300 Kelvin para a liga Al-4,5%Cu), devido ao contato com os cilindros refrigerados, a temperatura da região da zona líquida encontra-se ainda bastante alta (920 Kelvin para a liga Al-4,5%Cu). Essa diferença de temperatura, ao longo da espessura, pode explicar a fração volumétrica de precipitados maior na região ½ de espessura da amostra Caster, devido à variação de solidificação da superfície para o centro.

Para a amostra homogeneizada, a fração volumétrica foi determinada apenas na região central. Exemplo de imagem obtida por essa técnica foi mostrado na Figura 4b.

As amostras brutas de fundição apresentam precipitados mais grosseiros, agrupados em colônias (vide Figura 4a). Observa-se, na Figura 4b, que após a homogeneização a 500°C/12h os precipitados apresentam formato mais próximo ao esférico e encontram-se distribuídos de maneira mais homogênea. Pode-se observar, na Tabela 3, que as amostras homogeneizadas apresentaram mai-

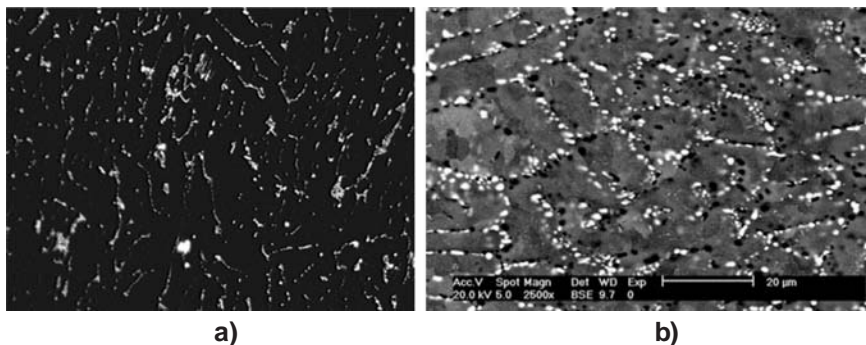


Figura 4 - a) Microestrutura da amostra bruta de fundição, ¼ da espessura, aumento de 1000 X, MO, campo escuro; b) Microestrutura da amostra homogeneizada em ½ da espessura (MEV/BSE).

Tabela 2 - Frações volumétricas de precipitados determinadas na superfície, em ¼ e em ½ da espessura. Amostras da liga 3003 (Caster) brutas de fundição.

Amostra	Fração volumétrica (%)
Superfície	4,2 ± 0,8
1/4 espessura	5,2 ± 0,7
1/2 espessura	6,3 ± 0,9

Tabela 3 - Fração volumétrica de precipitados para amostras da liga 3003, brutas de fundição e homogeneizadas (½ da espessura), obtendo-se imagens pelo MEV.

Amostra	Fração volumétrica (%)
Bruta de fundição	6,3 ± 0,9
Homogeneizada	8,6 ± 0,4

Tabela 4 - Valores de L (distância entre eletrodos), A (área de seção transversal) e resistividade elétrica (ρ) para amostras da liga 3003 nas condições: bruta de fundição e homogeneizada.

Amostra	L (cm)	A (cm ²)	ρ (Ω .cm) Temperatura ambiente	ρ (Ω .cm) Nitrogênio líquido
Bruta de fundição	0,4	7,84E-03	8,50E-06	5,80E-06
Homogeneizada	0,4	2,64E-03	4,70E-06	1,30E-06

ores frações volumétricas de precipitados, devido à precipitação de partículas durante o tratamento térmico de homogeneização.

3.4 Resistividade elétrica

Os resultados das medidas de resistividade elétrica são apresentados na Tabela 4. Pode-se observar a influência dos teores de elementos em solução sólida, principalmente manganês, ao lado

da influência da temperatura de ensaio no valor de resistividade elétrica (ρ). As amostras apresentaram comportamento caracterizado pela diminuição do valor de resistividade com o tratamento térmico de homogeneização e com a redução da temperatura de ensaio. Os menores valores de resistividade para as amostras homogeneizadas indicam a diminuição do teor de manganês em solução sólida, devido, principalmente, à precipitação de partículas durante o tratamento de homogeneização.

3.5 Ensaios de dureza

Ensaios de dureza Brinell foram realizados em amostras da liga 3003 nas duas condições: brutas de fundição e homogeneizadas. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

Observa-se que houve uma redução de 30% do valor de dureza da condição bruta de fundição para a homogeneizada, sugerindo a ocorrência de recuperação e recristalização durante a homogeneização.

4. Considerações finais

A liga 3003, produzida pelo processo Caster, apresenta composição química homogênea, ao longo da espessura da chapa, indicando a ausência de macrosegregação. Por meio da técnica de microscopia óptica em campo escuro, seguida de análise de imagens, foi possível determinar a fração volumétrica de precipitados de forma rápida e eficiente. A fração volumétrica de precipitados varia ao longo da espessura da chapa, sendo maior na região central da amostra, devido ao resfriamento mais lento no centro da chapa. A amostra homogeneizada apresenta maior fração volumétrica de precipitado, devido à precipitação de partículas durante o tratamento térmico. Com o auxílio da microscopia eletrônica de transmissão, foi possível observar a presença de dispersóides e os padrões de difração de elétrons foram utilizados para a identificação de fases.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Companhia Brasileira de Alumínio, pela cessão dos materiais utilizados no presente trabalho. À Dra. Maria José Ramos Sandim (DEMAR/FAENQUIL), pelas análises de resistividade elétrica. E à FAPESP, pelo apoio financeiro dado através do processo n°. 02/03252-6 (bolsa de doutorado de Juliana de Paula Martins).

Tabela 5 - Dureza Brinell da liga 3003.

Liga	Brutas de fundição	Homogeneizadas
3003	50,9	35,5

6 Referências bibliográficas

- ALTENPOHL, D.G. *Aluminium: Technology, applications, and environment*. 6 ed. Pennsylvania: TMS, 1997.
- BENEDYK, J. Thin strip casting for aluminum sheet applications developed by Pechiney at Neuf-Brisach. *Light Metals*, v. 59, n. 11-12, p. 28-30, Dec. 2001.
- BIROL, Y., ZEYBEKOGLU, H.G., OKUMUS, E., KARA, G., AKKURT, A.S., ROMANOWSKI, C. The response of twin roll cast aluminum strips to thermo-mechanical processing. *Light Metals*, 2002.
- GUPTA M., COOK, D.P., SAHAI, Y. Strip casting of aluminum using twin roll casters. *Light Metals*, p. 925-930, 1999.
- HUPALO, M. F., FERNANDES, R. C., MARTINS, J. P., PADILHA, A. F. Caracterização microestrutural das ligas comerciais de alumínio 3003 e 8106 produzidas por fundição contínua de chapas ("twin roll caster"). Contribuição Técnica ao 12º Congresso de Fundição, 27 a 30 de setembro de 2005, São Paulo - SP.
- LI, B.Q. Producing Thin strips by twin-roll casting - Part I: Process aspects and quality issues. *JOM*, p. 29-33, May. 1995.
- MARTINS, J.P. *Evolução da microestrutura e da textura durante o processamento de chapas da liga Al-Mn-Fe-Si (3003) produzidas por lingotamento contínuo: um estudo comparativo com o processo semi-contínuo*. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2005. 171p. (Tese de Doutorado).
- MATHEW, E. V., RAMACHANDRAN, T. R., GUPTA, K. P., DAS, S. Homogenization of commercial Al-Mn alloys. *Journal of Materials Science Letters*, v. 3, p. 605-610, 1984.
- SAXENA, A., SAHAI, Y., Modeling of fluid flow and heat transfer in twin roll caster of aluminum alloys. *Materials Transactions*, p. 206-213, v.43, 2002.
- SPERRY, P. R. Metallographic study of equilibrium relationships in 3S aluminum alloy. *Journal of Metals*, v.7, p. 145-151, 1955.
- SPINELLI, J. E., SANTOS, C.A., GARCIA, A., SPIM, J. A. Jr. Modelagem física do sistema de alimentação do processo Twin Roll para lingotamento contínuo de tiras de aço inoxidável. *REM- Revista Escola de Minas*, v. 55, p.179-184, 2002.
- TARAGLIO, B., ROMANOWSKI, C. Thin-gauge/High speed roll casting technology for foil production. *Light Metals*, p. 1165-1182, 1995.
- TRICIBAR, R., JIN, I. Rolling aspects of twin roll casting. *Light Metals*, p. 1129-1143, 1999.
- URIZ, J.P.I., SALAS, J.F., SANABRIA, A. S. Recristalización de bandas de aluminio procedentes de colada continua, laminadas em frío. *Revista de Metalurgia - Cenim*, v. 36, p. 435-451, 2000.

Artigo recebido em 30/03/2006 e aprovado em 20/10/2006.

Rem - Revista Escola de Minas
70 anos divulgando CIÊNCIA.
