



EFEITO DAS VARIÁVEIS TÉRMICAS DE SOLIDIFICAÇÃO NA LIGA AA3003 SOLIDIFICADA UNIDIRECIONALMENTE¹

*Christopher Cardoso de Brito²
Flaviano dos Santos Rodrigues³
André Luiz de Moraes Costa⁴
Cláudio Siqueira Filho⁵*

Resumo

A utilização do alumínio para a fabricação de latas para envase de bebidas vem crescendo ao longo dos anos. No processo de reciclagem do alumínio há economia de recursos naturais e de energia, em 2008 o Brasil reciclou 91,5% do total de latas de alumínio para bebidas comercializadas no mercado interno, minimizando o impacto sobre o meio ambiente. Desta forma o presente trabalho buscou analisar uma nova rota para reutilização da liga AA3003 através do processo de Solidificação Direcional. Nesta pesquisa foram analisadas as variáveis térmicas de solidificação (Taxa de Resfriamento, Velocidade Isoterma *Liquidus* e Gradiente de Temperatura). Foi observado que o uso de superaquecimentos maiores diminuiu o ponto onde ocorre a TCE, possibilitando obter uma zona colunar em torno de 60% da área do lingote para a condição de superaquecimento igual a temperaturas *liquidus*.

Palavras-chave: Reciclagem de latas de alumínio; Solidificação direcional; TCE.

EFFECT OF THERMAL SOLIDIFICATION VARIABLES IN AA3003 ALLOY DURING UNIDIRECTINAL SOLIDIFICATION

Abstract

The use of aluminum to make cans for packaging of beverages have grown over the years. In the process of aluminum recycling are saving natural resources and energy, in 2008 Brazil recycled 91.5% of aluminum cans for beverages sold in the domestic market, minimizing the impact on the environment. Thus the present study was to examine a new route to re utilization AA3003 alloy by the process of Directional Solidification. This study were measured thermal solidification (Cooling Rate, Tip growth rate and temperature gradient). It was observed that the use of more fallen overheating to the point where the CET is the possibility to obtain a columnar zone around 60% of the ingot to the condition of overheating $\Delta T_V=0\%T_L$.

Key words: Recycling aluminum cans; Directional solidification; CET.

¹ Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Aluno de Graduação, Universidade Federal do Pará – UFPA. christopher_engmat@yahoo.com.br

³ Aluno de Graduação, Universidade Federal do Pará – UFPA. flavianoengmat@hotmail.com

⁴ Professor Doutor, Universidade Federal de Sergipe – UFS. andrekosta@bol.com.br

⁵ Professor Doutor, Universidade Federal da Paraíba – UFPB. siqueira@ct.ufpb.br

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos as novas técnicas de processamento e de manufatura de peças e componentes metálicos mostram que, com exceção dos artigos produzidos por técnicas de metalurgia do pó, todos os demais passam pelo menos uma vez pelo processo de solidificação.⁽¹⁾ Isso faz com que a fundição constitua a rota mais econômica na conformação de uma peça metálica, desde que o ponto de fusão não seja extremamente elevado.

A estrutura que se forma imediatamente após a solidificação determina as propriedades do produto final. Em geral, a macroestrutura de solidificação pode apresentar três zonas distintas: zona coquilhada, zona colunar e zona equiaxial. As três zonas podem não estar presentes em um mesmo caso; entretanto, quando um metal fundido contém grãos colunares e equiaxiais, a transição entre as duas morfologias dá-se em uma faixa estreita, com as zonas colunar e equiaxial completamente distintas. A Figura 1 ilustra como ocorre a transição entre as zonas colunar e equiaxial (Transição Colunar/Equiaxial – TCE).

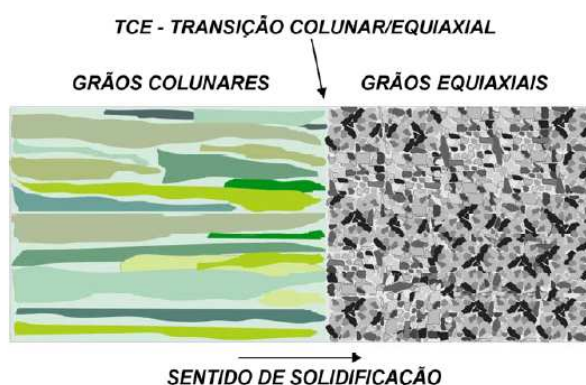


Figura 1. Macroestrutura com transição colunar/equiaxial.⁽¹⁾

Peças fundidas ou lingotes de materiais metálicos podem apresentar estruturas completamente colunares ou totalmente equiaxiais, dependendo da composição química da liga e das condições de solidificação. A determinação do ponto onde ocorre a TCE é importante para planejamento do processo que irá gerar as propriedades mecânicas finais do produto.⁽²⁾

Ao contrário das ligas Al-Cu, as ligas Al-Mn não são endurecíveis por precipitação, ou seja, não obtêm nenhum ganho de dureza mediante tratamento térmico, as ligas desse sistema somente podem ser endurecidas por encruamento. Entretanto, as ligas contendo mais de 1% de manganês, como por exemplo, a liga AA3003 é muito utilizada na fabricação de painéis e latas para acondicionamento de bebidas, possuindo considerável importância comercial.⁽³⁾

Os principais elementos da liga AA3003 são Mn, Fe e Si. A solubilidade sólida do Mn no alumínio é de 1,82 a 659°C. A solidificação se inicia com a formação de uma rede de dendrias e é imediatamente seguida pela precipitação da fase $Al_6(FeMn)$.⁽³⁾ Neste sistema binário o Mn tem apenas um leve efeito na diminuição do ponto de fusão.

A reciclagem de produtos pós-consumo é uma atividade complexa em termos técnicos e econômicos sociais. A reciclagem e o desenvolvimento sustentável têm em comum o fato de ambos exigirem não apenas mudanças tecnológicas, mas, sobretudo, mudanças de atitudes, tanto políticas como culturais.⁽⁴⁾ O destaque no processo de reciclagem do alumínio são suas vantagens, como a economia de

recursos naturais e de energia, minimizando os impactos ambientais, evitando o desperdício de matéria-prima e de recursos naturais não-renováveis.

A Associação Brasileira do Alumínio e a Associação Brasileira dos Fabricantes de Latas de Alta Reciclabilidade informaram que o país reciclou 91,5% do total de latas de alumínio para bebidas comercializadas no mercado interno ⁽⁴⁾, em 2008. Segundo dados das duas entidades, foram reciclados no ano passado 165,8 mil t de sucata de latas.

Desta maneira analisou-se a influência do superaquecimento (ΔT_V) sob as variáveis térmicas de solidificação (Taxa de Resfriamento [\dot{T}], Velocidade Isoterma *Liquidus* [V_L] e Gradiente de Temperatura [G_L]). O presente trabalho também investigou a influencia do ΔT_V na determinação da TCE para a liga AA3003.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

A liga AA3003 foi obtida a partir da fusão do corpo de latas de alumínio para bebidas. As latas foram compactadas em “pacotes” de 15 latas, com o auxílio de uma prensa de 100 t. Em seguida os “pacotes” foram fundidos em forno de Resistência a uma temperatura de 760°C para fornecer energia suficiente para a homogeneização do material fundido.⁽⁵⁾ É feita uma limpeza do banho para a retirada da escoria (resto de materiais contidos nas latas). A Tabela 1 mostra a composição química da liga segundo o padrão ASTM.

Tabela 1 – Composição Química da liga AA3003⁽³⁾

Liga	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Outros	Outros
Corpo (ASTM3003)	0,3	0,7	0,25	1,6-1,9	-	0,25	-	0,05	0,15

2.2 Parâmetros do Processo

Após a fusão do material a liga foi vazada numa lingoteira de aço Inox posicionada dentro do forno de Solidificação Direcional Ascendente refrigerado a água, Figura 2. A T_L da liga AA3003 igual a 645°C⁽³⁾ os parâmetros desta pesquisas foram baseados na variação do superaquecimento (ΔT_V), e foram utilizados três diferentes valores:

- sem superaquecimento;
- 5% da $T_L = 677$ °C; e
- 10% da $T_L = 709$ °C.

Foram monitoradas as curvas de extração de calor através de termopares do tipo K conectados a um Registrador de temperaturas com interface on-line a um computador onde os dados são armazenados.

Posteriormente foram feitas as análises da taxa de resfriamento, velocidade da isoterma *liquidus* e gradiente de temperatura. Os termopares foram posicionados em 3 mm, 5 mm, 7 mm, 15 mm, 30 mm e 50 mm da base da lingoteira.

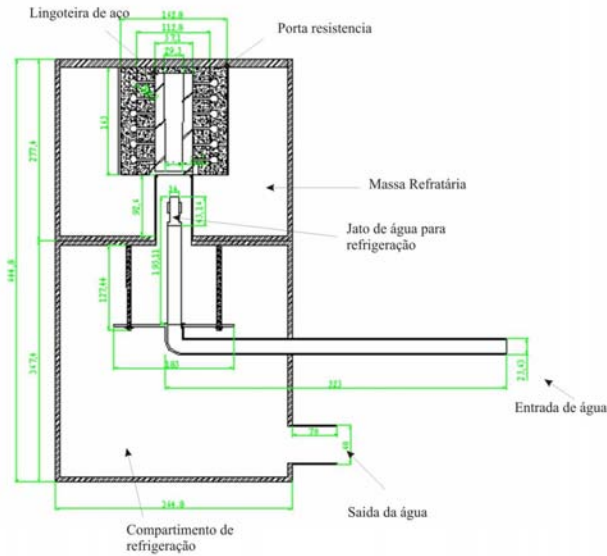


Figura 2. Desenho esquemático do Forno de Solidificação Unidirecional.

2.3 Análise Macroestrutural

A análise macroestrutural foi realizada a partir do seccionamento do lingote na direção longitudinal em relação ao centro. A macroestrutura foi obtida através de ataque químico com o reagente de Tucker⁽⁶⁾ (45 ml HCl, 15 ml HNO₃, 15 ml HF e 25 ml de H₂O).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Curvas de Resfriamento

Considerando o sistema analisado, para cada superaquecimento foram obtidos os mapeamentos de temperaturas para seis posições dos termopares no metal a partir da interface metal/molde.

A Figura 3 mostra as curvas de resfriamento, respectivamente, para superaquecimento de $\Delta T_V=0\%T_L$, $\Delta T_V=5\%T_L$ e $\Delta T_V=10\%T_L$. Os superaquecimentos foram sendo ajustados de forma a proporcionar uma transição colunar/equiaxial. As posições dos termopares durante os ensaios experimentais foram definidas visando ao máximo obedecerem às possibilidades unidirecionais de extração de calor, bem como a importância dos instantes iniciais do processo de solidificação.

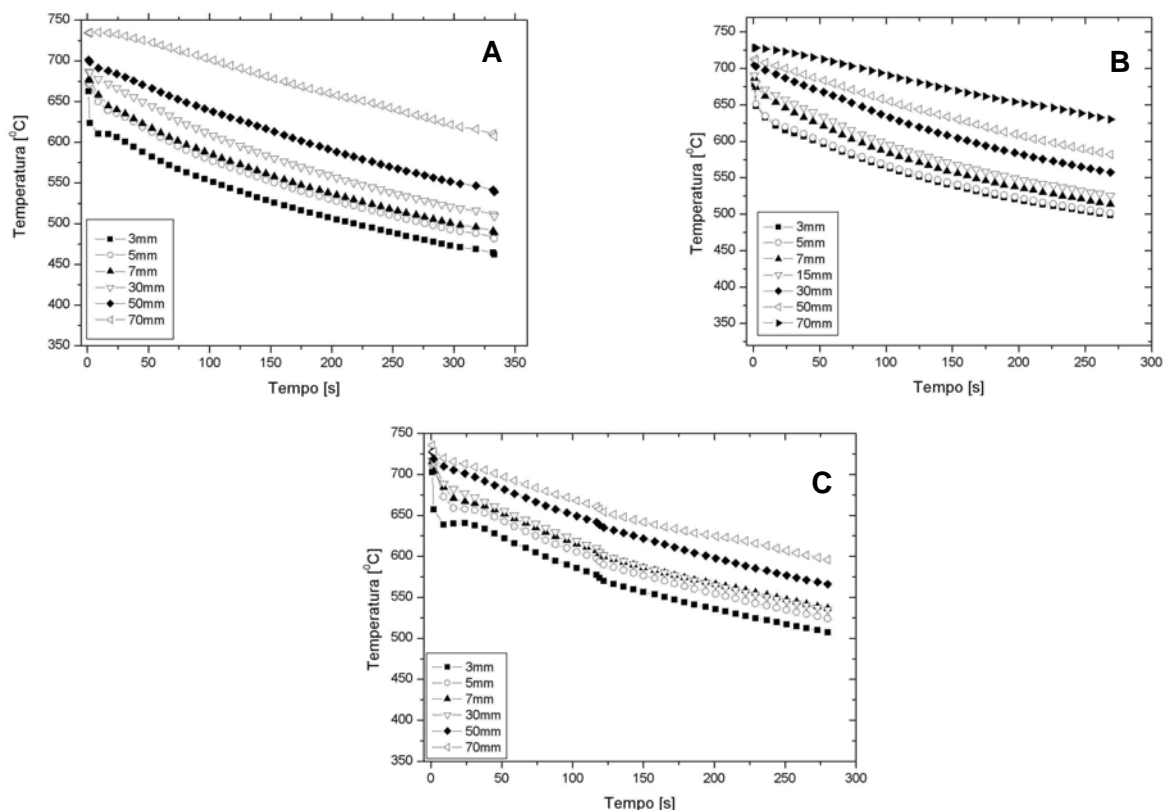


Figura 3. Perfis térmicos experimentais para a liga AA3003 com superaquecimento de: a) sem superaquecimento, b) 5% da T_L e c) 10% da T_L .

3.2 Variáveis Térmicas de Solidificação

A partir das curvas de resfriamento foi possível estabelecer a relação PosiçãoXTempo para cada superaquecimento, dessa forma determinou-se os parâmetros térmicos de solidificação.

De acordo com Siqueira,⁽⁷⁾ em seus trabalhos com ligas dos sistemas Al-Cu e Sn-Pb, o superaquecimento tem influência direta na determinação do coeficiente de transferência de calor (h_i) metal/molde. Os resultados das posições da transição colunar/equiaxial, das velocidades da isoterma liquidus, gradientes térmicos e taxas de resfriamento determinados no ponto onde ocorre a TCE para a liga AA3003 encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros térmicos experimentais de solidificação associados à transição colunar/equiaxial para Liga AA3003

Liga AA 3003 (Superaquecimento)	Posição TCE [mm]	Velocidade Isotherma Liquidus (V_L) [mm/s]	Gradiente de Temperatura (G_L) [°C/m]	Taxa de Resfriamento (\dot{T}) [°C/s]
$\Delta T_V = 0\% T_L = 645 \text{ °C}$	84	0,20	2,0	0,40
$\Delta T_V = 5\% T_L = 677 \text{ °C}$	78	0,18	2,6	0,47
$\Delta T_V = 10\% T_L = 709 \text{ °C}$	78	0,17	2,94	0,50
Média		0,18	2,55	0,46

A Figura 4 apresenta os resultados experimentais da posição da isoterma liquidus versus o tempo [$P = f(t)$].⁽⁸⁾

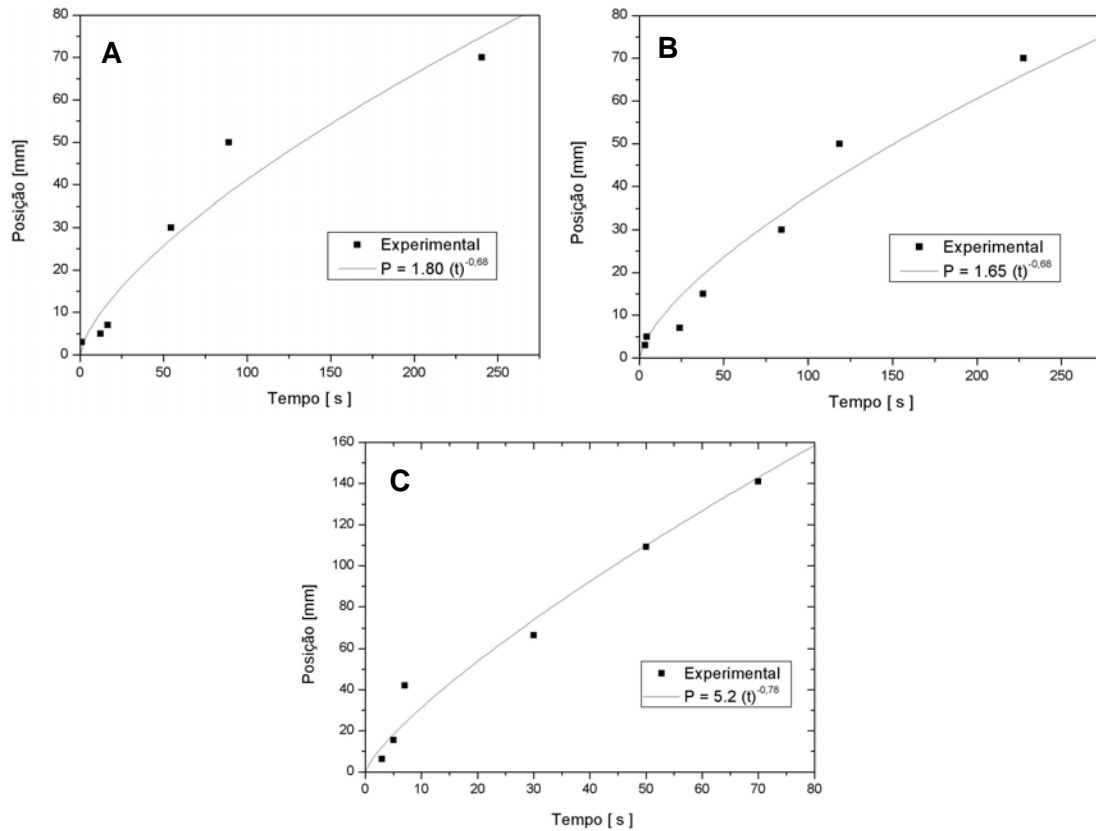


Figura 4. Gráfico Posição X Tempo para a liga AA3003 com superaquecimento de: a) sem superaquecimento, b) 5% da T_L e c) 10% da T_L .

As velocidades da isoterma liquidus (V_L) experimentais, para todos os casos analisados, são determinadas por meio da derivada da função $P = f(t)$ obtida experimentalmente e indicada na Figura 4, isto é, $V_L = dP/dt$. Observa-se pelo gráfico da Figura 5, a diminuição da velocidade da isoterma *Liquidus* para as posições mais afastadas da base refrigerada.

A Figura 6 mostra as curvas experimentais que representam a taxa de resfriamento como função da posição solidificada em molde de aço inoxidável. Observa-se neste caso, a evolução da taxa de resfriamento à frente da isoterma *liquidus* durante a solidificação para o superaquecimento analisados para a liga AA3003. Observa-se também a diminuição progressiva desta variável térmica para as posições mais afastadas da base refrigerada.

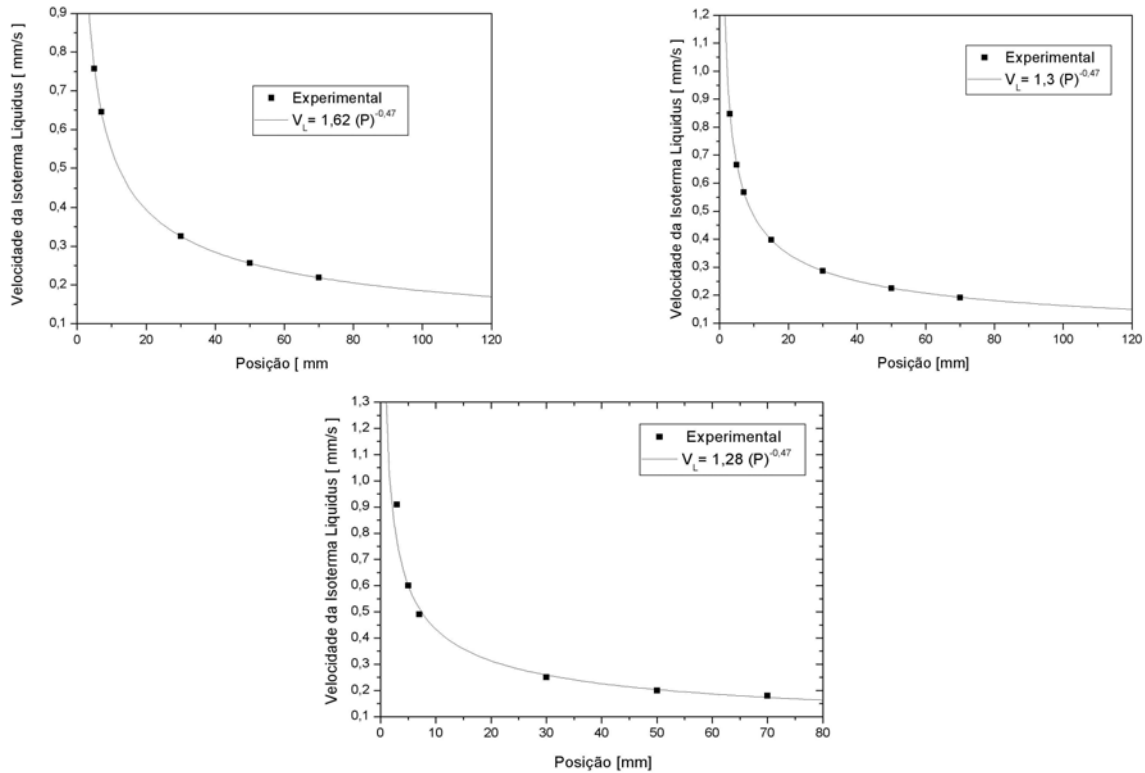


Figura 5. Gráfico Velocidade da Isotherma *Liquidus* X Posição para a liga AA3003 com superaquecimento de: a) sem superaquecimento, b) 5% da T_L e c) 10% da T_L .

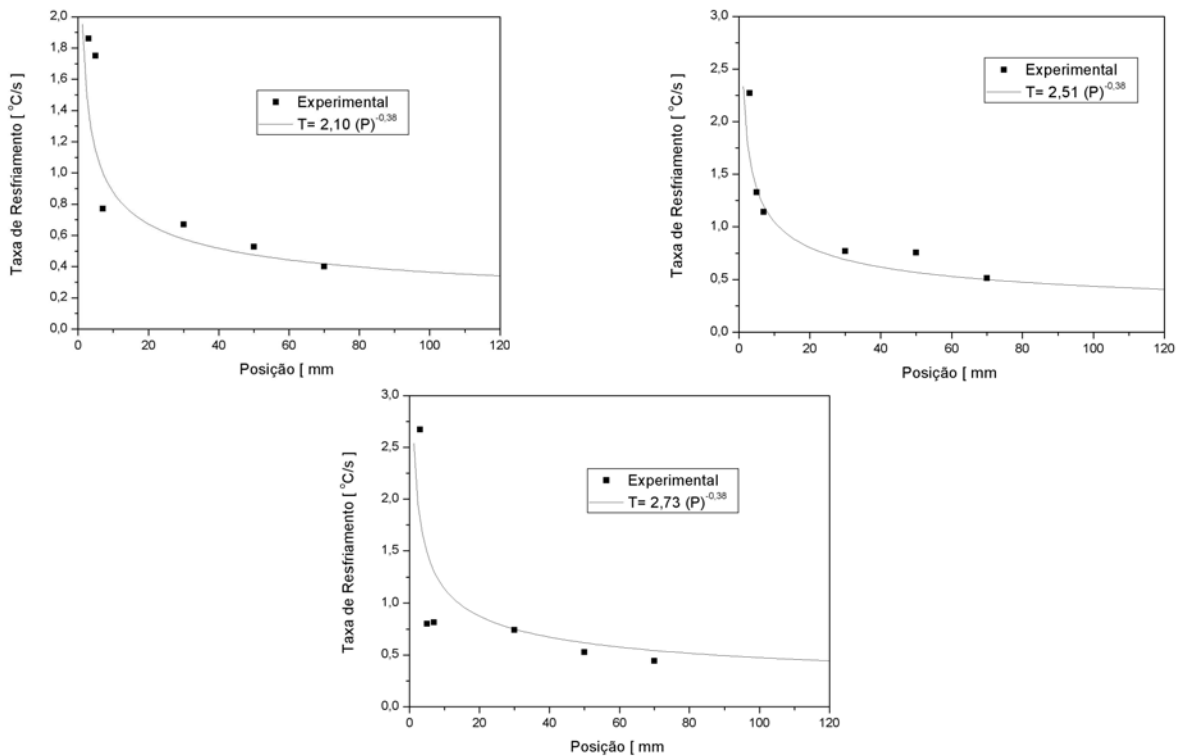


Figura 6. Gráfico Taxa de Resfriamento X Posição para a liga AA3003 com superaquecimento de: a) sem superaquecimento, b) 5% da T_L e c) 10% da T_L .

Superaquecimentos crescentes e Taxas de resfriamento mais elevadas podem retardar a transição colunar/equiaxial,⁽⁷⁾ aumentando dessa forma o comprimento



relativo da zona colunar. Correlacionando os dados dos gráficos da Figura 6 para a Taxa de resfriamento com os valores de superaquecimento adotados, observa-se essa relação, de forma que para maiores ΔT_V a o valor da \dot{T} também aumentou. A Tabela 2 mostrou que no ponto onde ocorreu a TCE, um superaquecimento de 65 °C proporcionou uma \dot{T} de 0,50 °C/s, para $\Delta T_V = 33$ °C a \dot{T} foi de 0,47 °C/s, e para $\Delta T_V = 0$ °C a \dot{T} no mesmo ponto foi de 0,40 °C/s.

Nos gráficos da Figura 6, ver-se que no ponto onde ocorreu a TCE a velocidade da isoterma *liquidus* diminui em função do aumento do superaquecimento, embora se tenha observado um gradiente térmico positivo e crescente.

3.3 Macroestruturas

Alguns fatores que influenciam na TCE para ligas binárias são:⁽⁹⁾ superaquecimentos crescentes, capacidade de resfriamento na interface metal/molde, taxa de resfriamento, teor de soluto.

Para a liga AA3003 verificou-se que o superaquecimento parece não favorecer o crescimento da zona colunar para $\Delta T_V = 5\% T_L$ e $10\% T_L$, de forma que a TCE ocorreu no mesmo ponto a 78mm da base para os dois superaquecimentos. Para $\Delta T_V = 0\% T_L$ a TCE ocorreu a 84 mm da interface metal/molde, ou seja, 6 mm acima do ponto onde ocorreu a TCE para a condição com superaquecimento.

Segundo Burden e Hun,⁽¹⁰⁾ as temperaturas de crescimento da zona colunar variam com a velocidade da isoterma *liquidus* e o gradiente de temperatura. Para um elevado gradiente positivo de temperatura à frente da zona colunar, a temperatura primeiro aumenta depois diminui com o aumento da velocidade, sugerindo um repentino aumento rápido na velocidade de crescimento de cristais equiaxiais, o que pode produzir a transição colunar/equiaxial. Para a liga AA3003 observou-se que a velocidade diminui para maiores Taxas de resfriamento proporcionadas por maiores superaquecimento. Dessa forma a velocidade de crescimento de cristais equiaxiais aumenta rapidamente e a velocidade de crescimento da interface colunar diminui. Eventualmente, pode-se alcançar uma condição onde a frente colunar está quase parada, mas onde os cristais equiaxiais estão crescendo rapidamente. Este fenômeno conduz a uma mudança repentina na estrutura, gerando zonas colunares menores para maiores superaquecimento, antecipando assim a TCE.

Analisando a Figura 7 observa-se que a TCE ocorre essencialmente em um plano horizontal e que se distancia da interface metal/molde com coeficientes de transferência de calor crescentes e com aumento no superaquecimento do metal líquido. Para as condições de fluxo de calor unidimensional examinada experimentalmente, a tendência de variação da velocidade da isoterma *liquidus* acompanha o gradiente térmico, com velocidades altas junto à face refrigerada, e baixas velocidades na parte onde ocorre a TCE.

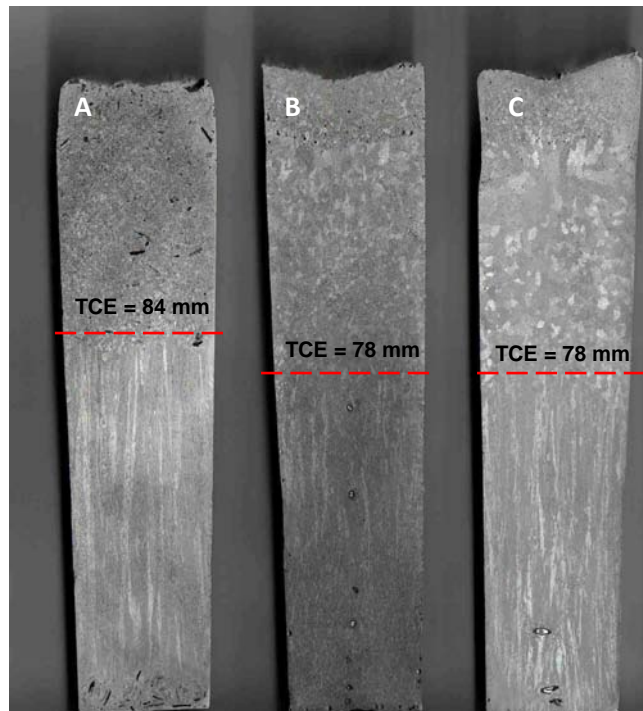


Figura 7. Macroestruturas da liga AA3003: a) sem superaquecimento, b) 5% da T_L e c) 10% da T_L .

4 CONCLUSÕES

A partir do trabalho realizado pode-se concluir que:

- O superaquecimento exerceu influencia direta nas variáveis térmicas de solidificação de forma que à medida que o se elevou o valor de ΔT_V a taxa de resfriamento tende a aumentar, mostrando uma melhor ângulo de molhamento do metal com a chapa molde consequentemente melhorando a extração de calor na interface metal/molde e na interface solido/liquido.
- Verificou-se que a Taxa de resfriamento a aumentou com a elevação do superaquecimento de 0°C para 65°C, entretanto a velocidade da isoterma *liquidus* não sofreu a mesma influencia, mesmo para um gradiente de temperatura positivo e crescente, mostrando dessa forma que houve um favorecimento no crescimento dos cristais equiaxiais à frente do crescimento colunar, antecipando assim a TCE. Em todo o caso, não é possível identificar uma determinada variável térmica como responsável isolada pela ocorrência da TCE, já que os valores experimentais de V_L , \dot{T} e G_L , são bastante próximos na transição para todos os superaquecimentos examinados.
- Quanto à macroestrutura observou-se que a TCE ocorre em uma seção próxima ao centro do lingote levando-se em conta os valores de superaquecimentos utilizados. Para 0°C de superaquecimento a TCE ocorreu a 84 mm da base da lingoteira e para 33°C e 65°C a mesma ocorreu a 78 mm.
- O processo de solidificação direcional se mostrou uma rota alternativa para o reaproveitamento da liga AA3003 na produção de peças nas quais se deseja propriedades anisotrópicas.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a Universidade Federal do Pará (UFPA) e CNPq, pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 GARCIA, Amauri. *Influência das variáveis térmicas de solidificação na formação da macroestrutura e da microestrutura e correlação com propriedades decorrentes*. Revista Projeções, v. 23, p. 13-32, jan./dez. 2005.
- 2 GARCIA, Amauri. *Solidificação: fundamentos e aplicações*, Campinas, SP. 2001.
- 3 BRAY, Jack W. *Aluminum Mill and Engineered Wrought Products*. ASM Handbook, vol 2, "Selection Non Ferrous", 9^o edition. pp. 124-14, 1988.
- 4 MEDINA, H. V. *Reciclagem de materiais: tendências tecnológicas de um novo setor*. Disponível em: <<http://cetem.gov.br>>. Acesso em: 05 de janeiro de 2010.
- 5 MARTINS, Juliana de Paula e PADILHA, Ângelo Fernando. *Caracterização da liga comercial de alumínio 3003 produzida por fundição contínua de chapas (twin roll caster) – microestrutura*. Revista Escola de Minas Metalurgia e Materiais. Ouro Preto, MG. 2006.
- 6 SENA, Hélio Cleidson de Oliveira; QUARESMA, José Maria do Vale. *ANÁLISE DE SOLUÇÕES ÁCIDAS PARA A CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DE MICRO E MACROGRAFIA NA LIGA DE Al-0,6%Mg-0,5%Si (6101)*. Revista Científica da UFPA Vol. 3. Belém, PA. 2002.
- 7 SIQUEIRA¹, Claudio Alves. *Influência de Parâmetros Térmicos de Solidificação na Transição Colunar/Equiaxial*. Tese de Doutorado. Unicamp. Campinas, SP. 2002.
- 8 PERES, Manoel Diniz. *Desenvolvimento da Macroestrutura e da Microestrutura na Solidificação Unidirecional Transitória de Ligas Al-Si*. Tese de Doutorado. Unicamp. Campinas, SP. 2005.
- 9 SIQUEIRA², C. A; Cheung, N; Garcia, A. *The columnar to equiaxed transition during solidification of Sn–Pb alloys*. Journal of Alloys and Compounds 351 (2003) 126–134. 2003.
- 10 BURDEN M. H. e HUNT, J. D. *Cellular and Dendritic Growth II*. Journal Crystal Growth, vol. 22 (2), pp. 109-116, 1974.