

ANÁLISE DA TRANSIÇÃO COLUNAR/EQUIAXIAL DE LIGAS DO SISTEMA AL-SI DURANTE A SOLIDIFICAÇÃO UNIDIRECIONAL HORIZONTAL SOB CONDIÇÕES TRANSIENTES DE EXTRAÇÃO DE CALOR

Andréa Moreira Moutinho, e-mail: dedeamoutinho@hotmail.com¹

Diego de Leon Brito Carvalho, e-mail: diegodlbc@hotmail.com¹

Antonio Luciano Seabra Moreira, e-mail: lmoreira@amazon.com.br¹

José Nazareno Silva, e-mail: jo.nazareno@hotmail.com²

Daniel Joaquim da Conceição Moutinho, e-mail: djcmoutinho@hotmail.com²

Otávio Fernandes Lima da Rocha, e-mail: otvrocha@oi.com.br²

¹Universidade Federal do Pará, Rua Augusto Corrêa nº 1, Guamá, CEP: 66075-110 – Belém-PA

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará Av. Almirante Barroso nº 1155, Marco, CEP: 66093-020 – Belém-PA

Resumo: A relação entre macroestrutura e propriedades mecânicas de um material tem sido objeto de intensa investigação pois o tamanho dos grãos, a orientação cristalina e a distribuição dos mesmos exercem influência direta no comportamento mecânico dos produtos acabados. Assim, o entendimento dos fatores que influenciam a formação das zonas estruturais coquilhada, colunar e equiaxial nos materiais fundidos como, por exemplo, o sistema de liga, composição da liga, temperatura de vazamento, temperatura do molde, material do molde, coeficientes de transferência de calor na interface metal/molde, taxa de resfriamento, gradientes térmicos, dimensão da peça, presença de convecção no líquido, transporte de soluto, etc é de fundamental importância para a melhoria da eficiência do processo de fundição envolvido. Com base no conhecimento dos princípios termofísicos em que essas zonas são formadas, é possível manipular de forma bastante razoável a estrutura dos produtos fundidos e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas dos mesmos. Tendo como principal foco a análise da mudança da zona colunar para a equiaxial, este trabalho apresenta um estudo teórico-experimental sobre a transição colunar/equiaxial (TCE) das ligas hipoeutéticas Al-3%Si e Al-7%Si solidificadas unidirecionalmente em um dispositivo horizontal refrigerado a água sob condições transientes de fluxo de calor. Um método numérico é utilizado na determinação de variáveis térmicas de solidificação como coeficientes de transferência de calor na interface metal/molde (h_i), velocidades das isotermas líquidas (V_L), gradientes térmicos (G_L) e taxas de resfriamento (T_R) que influenciam diretamente a referida transição estrutural. Um estudo comparativo entre os resultados obtidos neste trabalho e valores propostos na literatura para analisar a TCE durante a solidificação unidirecional vertical ascendente sob condições transientes de extração de calor das ligas investigadas, também é apresentado.

Palavras-chave: solidificação unidirecional, transição colunar/equiaxial, condições transientes, parâmetros de solidificação, ligas Al-Si

1. INTRODUÇÃO

A comprovada relevância científica e tecnológica do fenômeno da solidificação dos materiais metálicos e os seus inúmeros exemplos de aplicações industriais, certamente o caracterizam como o mais importante tipo de transformação de fases na cadeia produtiva da moderna indústria de fundição de nossos dias. Apesar da importância do referido fenômeno, somente nas últimas décadas surgiram as primeiras pesquisas sistemáticas sobre o assunto incentivadas pela sua crescente utilização no desenvolvimento de novos processos tais como fundição sob pressão, fundição centrífuga, fundição por microfusão, lingotamento contínuo, reofundição, processos de solidificação rápida (PSR), refusão superficial a laser, purificação de materiais e crescimento de cristais. Com o advento da pesquisa sistemática, sensíveis modificações têm sido introduzidas em operação industriais convencionais que envolvem a solidificação capazes de elevar o nível de produtividade, precisão dimensional, confiabilidade e otimização da fabricação de produtos obtidos bem como introduzir técnicas em áreas de desenvolvimento mais recente como é o caso da tecnologia eletrônica.

Atualmente, diversos aspectos de natureza física relacionados à formação da microestrutura e macroestrutura dos produtos obtidos necessitam ser ainda estudados. Assim, em geral, a macroestrutura de um fundido é constituída de três

diferentes zonas estruturais conhecidas, respectivamente, como zonas coquilhada, colunar e equiaxial que, dependendo das condições operacionais assumidas durante o processo de solidificação, podem ou não estar presentes em um caso particular. Devido a correlação existente entre a morfologia, dimensão e distribuição dos grãos cristalinos e as correspondentes propriedades mecânicas da peça obtida, a origem de cada uma delas tem sido objeto de intensa investigação teórica e/ou experimental por parte de muitos pesquisadores uma vez que a presença dessas diferentes zonas estruturais promove um elevado grau de anisotropia no material, o que não é desejável (Siqueira et al, 2002). Logo, na maioria das aplicações exigidas pela engenharia, com exceção de algumas muito especiais, são utilizadas estruturas constituídas de grãos equiaxiais de dimensões bastante reduzidas pois tais estruturas são isotrópicas e suas propriedades são, comprovadamente, superiores.

Em função das diversas variáveis operacionais e térmicas envolvidas durante a mudança de fase líquido/sólido, ainda não existe um consenso científico bem estabelecido quanto à previsão de um determinado tipo de macroestrutura para um lingote e nem, tão pouco, quanto aos mecanismos envolvidos na transição colunar/equiaxial (TCE), que ocorre quando o avanço da frente colunar é bloqueado pela formação de grãos equiaxiais no líquido. A referida transição, por exemplo, é dependente de várias condições térmicas associadas ao processo de solidificação como, por exemplo, sistema de liga, composição da liga, temperatura de vazamento, material do molde, temperatura do molde, coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde, dimensão da peça, taxa de resfriamento, gradientes térmicos, presença de convecção no líquido, transporte de soluto e concentração de partículas nucleantes que podem variar tanto com o tempo como com a posição ao longo do processo (Flood e Hunt, 1987; Wang e Beckermann, 1994; Sturz et al, 2005 e Canté et al, 2007). Desta maneira, o não completo entendimento da relação entre as condições térmicas de solidificação e a estrutura resultante tem limitado bastante o desenvolvimento de procedimentos experimentais e métodos matemáticos, analíticos e numéricos, que visem a obtenção de peças fundidas dotadas de propriedades mecânicas superiores. Com relação à TCE, por exemplo, embora muitos trabalhos experimentais (Ziv e Weinberg, 1989; Ares e Schvezov, 2000; Siqueira et al, 2003 e Silva et al, 2009), métodos analíticos (Hunt, 1984; Flood e Hunt, 1987a e Flood e Hunt, 1987b) e métodos numéricos (Wang e Beckermann, 1994; Dong e Lee, 2005; Ludwig e Wu, 2005 e Badillo e Beckermann, 2006) tenham sido apresentados nos últimos anos, os princípios físicos e/ou químicos que potencializam a mesma permanecem ainda não suficientemente esclarecidos. Os efeitos do vetor gravidade em relação à TCE têm sido investigados em sistemas de solidificação unidirecional com a extração de calor sendo realizada, principalmente, através da base (Ares e Schvezov, 2000; Siqueira et al, 2003 e Canté et al, 2007) ou da parte superior do molde (Spinelli et al, 2004). Assim, na solidificação direcional vertical ascendente, a influência da convecção é minimizada pois o soluto é rejeitado para regiões interdendríticas promovendo a formação de um líquido interdendrítico mais denso que o volume total de metal líquido. Por outro lado, no caso da solidificação direcional vertical descendente, ocorrem efeitos convectivos no líquido durante o processo devido a diferença entre as densidades do soluto e do solvente. Na solidificação unidirecional horizontal, no entanto, quando o fluxo de calor é extraído através de somente uma das paredes laterais do molde, a convecção em função dos gradientes de composição no líquido sempre ocorre. Uma interessante característica adicional do sistema horizontal durante a mudança de fase, é o gradiente de concentração de soluto bem como os efeitos de densidade na direção vertical pois o líquido enriquecido de soluto sempre decanta ao passo que o solvente tende a emergir devido as forças de flutuabilidade. Além disso, devido os efeitos impostos pela convecção termossolutal, sempre vai ocorrer um gradiente de temperaturas na direção vertical. Apesar dessas características particulares, são poucos os estudos propostos na literatura para investigar estes importantes efeitos convectivos no líquido na formação da TCE durante a solidificação unidirecional horizontal.

Considerando a importância do assunto, o principal objetivo deste trabalho é investigar o comportamento da TCE em duas ligas Al-Si solidificadas unidirecionalmente em um sistema de configuração horizontal refrigerado a água, sob condições transientes de extração de calor. Um método teórico-experimental é utilizado na determinação das variáveis térmicas de solidificação de interesse tais como coeficientes de transferência de calor na interface metal/molde (h_i), velocidades das isotermas liquidus (V_L), gradientes térmicos (G_L) e taxas de resfriamento (T_r) as quais influenciam diretamente a transição estrutural em questão. Um estudo comparativo entre os resultados obtidos neste trabalho e valores propostos na literatura para analisar a TCE durante a solidificação unidirecional vertical ascendente sob condições transientes de extração de calor das ligas investigadas, também é apresentado.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O dispositivo de solidificação empregado nos experimentos é mostrado de forma esquemática na Fig. (1). O mesmo foi projetado de tal maneira que o calor do metal líquido fosse extraído somente através de um sistema refrigerado a água, localizado em uma das paredes laterais do molde, promovendo assim a solidificação direcional horizontal. O molde de aço inoxidável utilizado possui 110 mm de comprimento, 70 mm de largura, 60 mm de altura e suas paredes 3 mm de espessura. As superfícies laterais internas do mesmo foram revestidas com camadas de alumina e a parte superior foi isolada com material refratário para evitar perdas de calor para o meio ambiente. A condição de contato térmico na interface metal/molde foi padronizada com a superfície de extração de calor sendo polida. Alguns experimentos foram inicialmente realizados com o objetivo de aferir-se a direcionalidade horizontal do fluxo de calor por parte do dispositivo de solidificação. Os experimentos foram realizados com as ligas hipoeutéticas Al-3%Si e Al-7%Si. As composições químicas dos metais empregados na elaboração das mesmas são apresentadas na Tab. (1). As correspondentes propriedades termofísicas de cada uma das ligas investigadas são mostradas na Tab. (2).

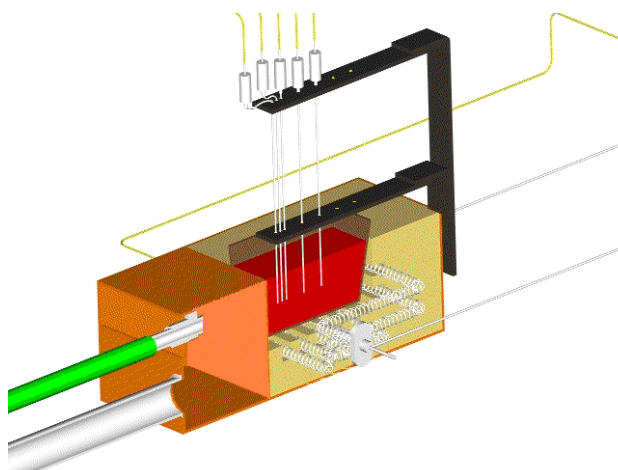


Figura 1. Representação esquemática do dispositivo de solidificação direcional horizontal utilizado nos experimentos deste trabalho

Tabela 1. Composição química dos metais usados na preparação das ligas estudadas.

Metal	Al	Fe	Ni	Si	P	Ca	Ti	Zn	Ga	V	Cu
Al	99,7	0,176	0,006	0,062	-	-	0,009	0,007	0,012	0,011	0,005
Si	0,1094	0,3164	0,0102	99,596	0,0100	0,0214	0,0455	-	-	-	-

Tabela 2. Propriedades termofísicas das ligas Al-Si utilizadas nos experimentos.

Propriedades	Densidade	Calor Latente	Calor Específico	Condutividade Térmica	Temperatura Solidus	Temperatura Liquidus
Símbolo/Unid.	ρ_S [kg/m ³] (sólido) ρ_L [kg/m ³] (líquido)	L [J/kg]	c_S [J/kg K] (sólido) c_L [J/kg K] (líquido)	K_S [W/m K] (sólido) K_L [W/m K] (líquido)	T_{SOL} [°C]	T_{LIQ} [°C]
Al-3%Si	2695 2385	389187	963 1084	121 91	577	644
Al-7%Si	2680 2394	397440	963 1080	90 90	577	610

Inicialmente, as ligas estudadas foram fundidas *in situ* no dispositivo de solidificação unidirecional mostrado na Fig. (1) e, em seguida, levadas até temperaturas correspondentes a 10% acima de suas respectivas temperaturas *liquidus*. Após atingidos os níveis de superaquecimento desejados, as resistências elétricas do dispositivo foram então desligadas e imediatamente acionado o sistema de refrigeração a água. Os jatos do fluido refrigerante, direcionados tão somente a uma das paredes laterais do molde, induziram uma extração de calor no sentido longitudinal do mesmo, ou seja, apenas na direção horizontal conforme estabelecido neste estudo. Durante o intervalo da solidificação, a temperatura do líquido refrigerante manteve-se constante e em torno de 28°C. A solidificação ocorreu dendriticamente a partir da superfície lateral do molde, constituindo assim uma estrutura colunar.

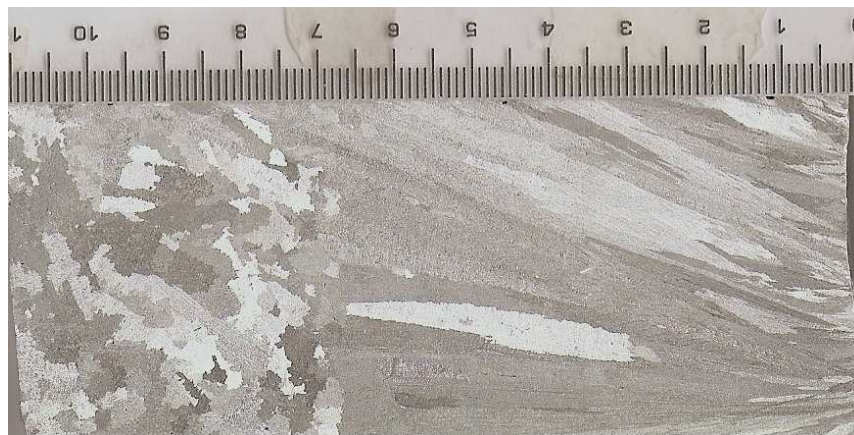
Os valores das temperaturas foram medidos em diferentes posições do lingote durante o processo de solidificação e os dados obtidos foram armazenados automaticamente. Para tanto, um conjunto de cinco termopares tipo K foram posicionados conforme indicado na Fig. (1). Os termopares foram calibrados com base no ponto de fusão do alumínio indicando flutuações em torno de 1°C e conectados através de cabos coaxiais a um sistema de aquisição de dados interfaciado a um computador. Os termopares de 1,6 mm e revestidos de aço foram posicionados a 5, 10, 15, 30 e 50 mm a partir da superfície de extração de calor.

Os lingotes resultantes foram cortados na direção longitudinal, a mesma em que ocorreu a extração de calor durante a solidificação. Em seguida, os mesmos foram mecanicamente lixados e polidos com materiais abrasivos de granulometrias crescentes e, posteriormente, atacados quimicamente com solução ácida composta de 5 ml de H₂O, 60 ml de HCl, 30 ml de HNO₃ e 5 ml de HF a fim de possibilitar a revelação de suas correspondentes macroestruturas. Finalmente, a posição da TCE foi localizada nas referidas amostras por meio de observação visual, tendo a distância existente entre a mesma e a interface metal/molde sido medida através de régua milimetrada.

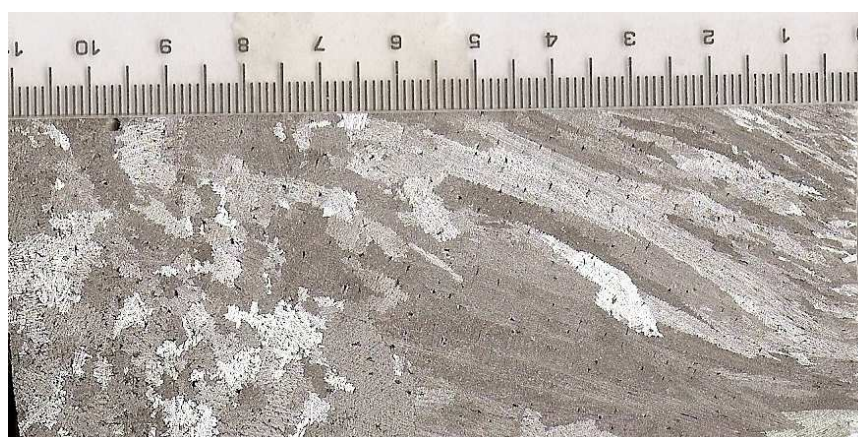
Os valores da análise térmica experimental relacionados às amostras das ligas foram utilizados para o cálculo teórico de V_L , G_L , e T_R que geralmente encontram-se associados à TCE.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As macroestruturas das ligas investigadas, solidificadas unidirecionalmente, segundo as condições assumidas neste trabalho são apresentadas na Fig. (2). Observa-se que a transição estrutural da zona colunar para a zona equiaxial ocorreu, respectivamente, a 68 e 65 mm a partir da interface metal/molde, ou seja, o aumento da concentração de soluto nas ligas estudadas parece não influenciar de maneira significativa a posição experimental da referida transição estrutural, o que confirma os resultados obtidos por Gandin (2000) ao analisar a solidificação direcional de ligas Al-Si por meio de um método teórico-experimental baseado na equação do fluxo de calor unidimensional. A principal característica da TCE mostrada pelas macroestruturas abaixo é que a mesma ocorre essencialmente em um plano vertical paralelo à interface metal/molde.



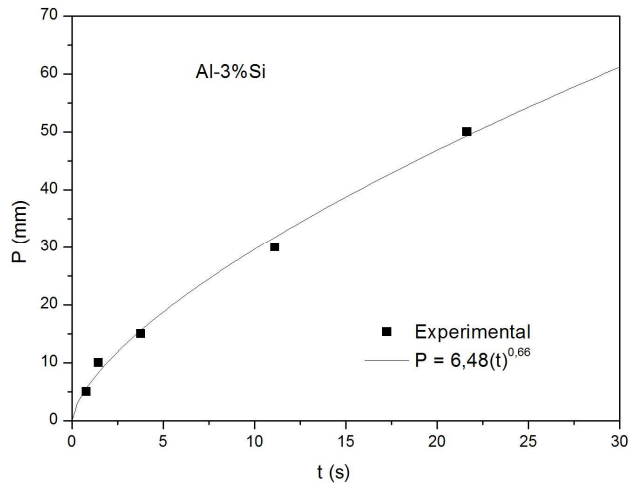
(a)



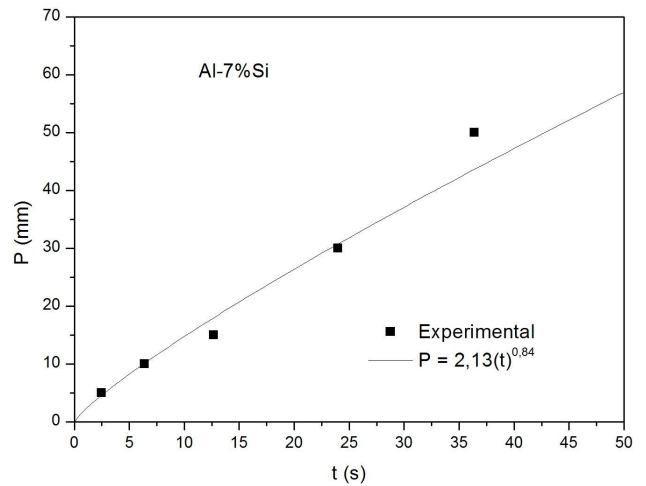
(b)

Figura 2. Macroestruturas de solidificação das ligas estudadas: (a) Al-3%Si e (b) Al-7%Si.

Com o objetivo de determinar os valores das variáveis térmicas de solidificação V_L , G_L , e T_R , que variam tanto em função do tempo como da posição durante a solidificação, os resultados da análise térmica experimental foram utilizados para o cálculo do deslocamento da isoterma *liquidus* a partir da interface metal/molde em função do tempo, o que corresponde à passagem da frente líquida por cada termopar. Assim, com base nesses pontos experimentais foram geradas funções potência da posição em função do tempo cujos resultados encontram-se apresentados na Fig. (3). A derivada destas funções com relação ao tempo permitiu a obtenção dos respectivos valores experimentais para as velocidades das isotermas *liquidus* (V_L) das ligas analisadas. Os resultados conseguidos são mostrados na Fig. (4). Por outro lado, os valores das taxas de resfriamento (T_R) foram determinados considerando os dados da análise térmica experimental obtidos após a passagem da frente líquida por cada termopar. Os resultados obtidos estão indicados na Fig. (5). Finalmente, os gradientes térmicos (G_L) referentes a cada liga estudada foram determinados através de relações analíticas entre as respectivas taxas de resfriamento e as velocidades das isotermas *liquidus*, ou seja, $T_R = G_L V_L$ (Spinelli et al 2004). Os resultados experimentais da posição da transição colunar-equiaxial das ligas investigadas em função dos correspondentes parâmetros térmicos obtidos neste trabalho são apresentados na Tab. (3).

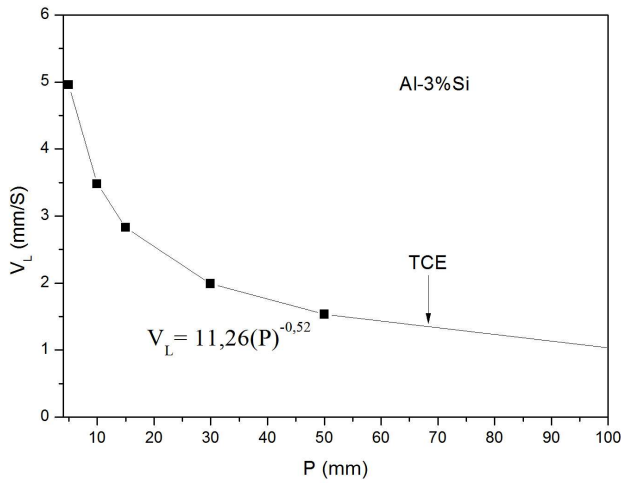


(a)

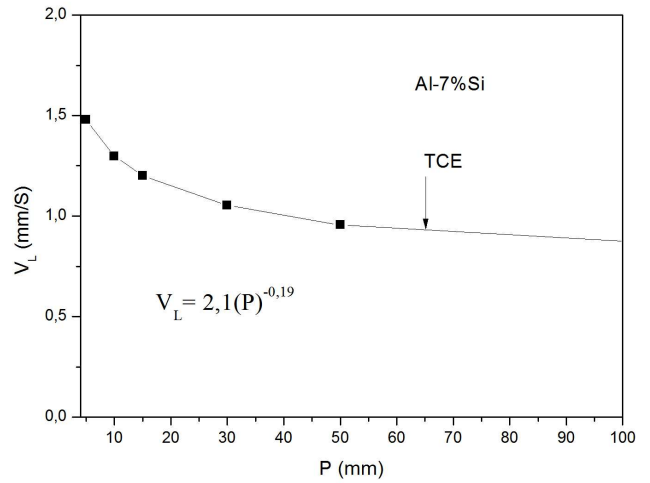


(b)

Figura 3. Posição da isoterma *liquidus* a partir da interface metal/molde em função do tempo. (a) Al-3%Si e (b) Al-7%Si.

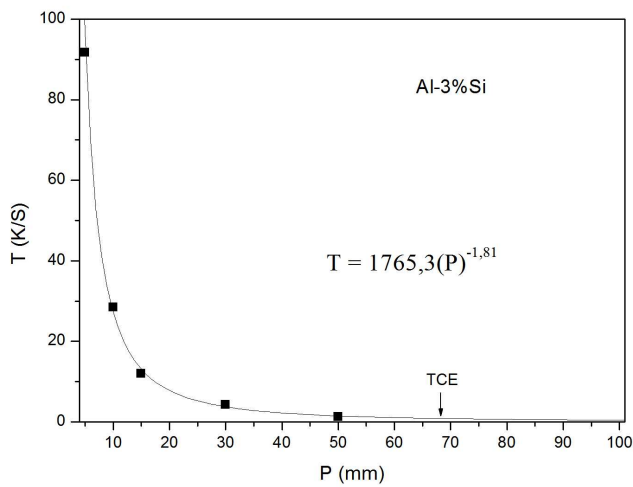


(a)

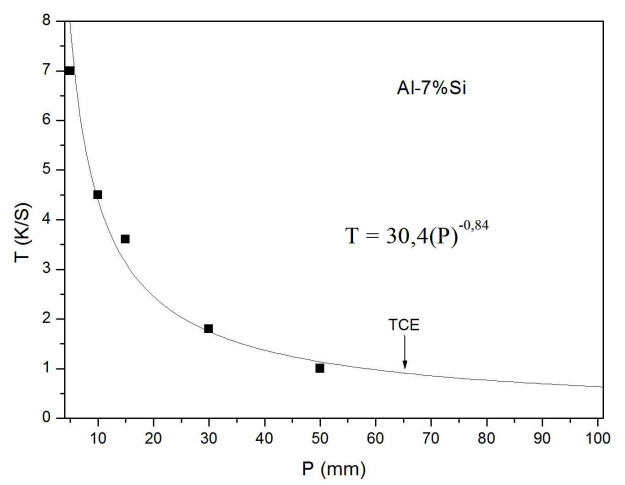


(b)

Figura 4. Velocidade da isoterma *liquidus* a partir da interface metal/molde em função do tempo. (a) Al-3%Si e (b) Al-7%Si.



(a)



(b)

Figura 5. Taxa de resfriamento a partir da interface metal/molde em função do tempo. (a) Al-3%Si e (b) Al-7%Si.

Tabela 3. Parâmetros térmicos de solidificação associados à posição da TCE.

Ligas	V_L (mm/s)	G_L (K/mm)	T_R (K/s)	Posição TCE (mm)
Al-3%Si	1,24	0,68	0,84	68
Al-7%Si	0,94	0,94	0,88	65

A Tabela (4) apresenta um estudo comparativo entre os resultados obtidos na presente investigação experimental e aqueles levantados por Peres et al (2004) com relação aos valores de V_L , G_L , e T_R na posição em que ocorre a transição colunar-equiaxial durante a solidificação das ligas Al-3%Si e Al-7%Si em sistemas com diferentes configurações.

Tabela 4. Parâmetros térmicos de solidificação associados à posição da TCE obtidos neste trabalho e por outros autores para as ligas investigadas.

Autor	Sistema	Convecção no líquido	Ligas	V_L (mm/s)	G_L (K/mm)	T_R (K/s)	Posição TCE (mm)
Peres et al. (2004)	Vertical Ascendente	Não	Al-3%Si	0,50	0,32	0,16	94
			Al-7%Si	0,45	0,33	0,15	95
Presente trabalho	Horizontal	Sim	Al-3%Si	1,24	0,68	0,84	68
			Al-7%Si	0,94	0,94	0,88	65

Pode-se observar que, em ambos os casos, o comprimento da zona colunar parece não ter sido influenciado pelo aumento do teor de soluto nas ligas estudadas. Os resultados obtidos durante a solidificação direcional vertical ascendente mostram que as observações de Peres et al (2004) foram conduzidas sob condições de menores valores para as velocidades da isoterma *liquidus*, gradientes térmicos no líquido e taxas de resfriamento quando comparados com aqueles encontrados no presente estudo. Apesar das variáveis térmicas envolvidas durante a transição colunar-equiaxial apresentarem similaridade apenas para o caso da solidificação vertical ascendente, é possível identificar um único critério para ambos os casos no que se refere à ocorrência da TCE. Tal critério é baseado nas respectivas taxas de resfriamento verificadas tendo o mesmo sido proposto por Siqueira et al (2002; 2003) e Spinelli et al (2004) ao investigarem a solidificação direcional de ligas Sn-Pb nos sistemas verticais ascendente e descendente. Assim, os resultados experimentais apresentados na Tab. (4) sugerem que para o caso das ligas Al-Si analisadas a TCE, sob condições transientes de extração de calor, ocorre quando uma taxa de resfriamento crítica é alcançada à frente da zona colunar em torno de 0,16 K/s durante a solidificação direcional vertical ascendente e de 0,86 K/s para o caso da solidificação direcional horizontal, com o crescimento colunar prevalecendo para taxas de resfriamento mais elevadas que estes valores críticos. Se T_R não alcançar o valor crítico, não ocorrerá a TCE. É importante notar, que o fim da zona colunar durante a solidificação horizontal é abreviado por uma taxa de resfriamento crítica aproximadamente cinco vezes e meia maior que aquela observada durante a solidificação vertical ascendente das ligas analisadas. Tal fato pode ser justificado em função da rejeição de soluto para o líquido, durante a transformação líquido/sólido, provocar um aumento na densidade do líquido e a diferença na densidade promover convecção interdendrítica. Logo, os efeitos de correntes de convecção no líquido induzidos pela segregação de soluto pode estimular a formação de grãos equiaxiais a partir dos grãos colunares onde parte de suas ramificações dendríticas secundárias são quebradas sendo então liberadas para a região localizada à frente da interface sólido/líquido. Os ramos dendríticos separados da zona colunar devem encontrar condições de crescimento no líquido à frente da interface de solidificação a fim de constituírem a zona equiaxial estimulando dessa maneira a ocorrência da TCE.

4. CONCLUSÃO

Os resultados encontrados neste trabalho permitem que sejam obtidas as seguintes conclusões com relação aos parâmetros térmicos de solidificação e a transição colunar-equiaxial observados nas ligas Al-Si estudadas:

- A TCE ocorre essencialmente em um plano vertical paralelo à interface metal/molde.
- A TCE ocorre quando o gradiente de temperatura no líquido à frente da zona colunar varia de 0,68 a 0,94 K/mm e quando a velocidade da isoterma liquidus atinge valores entre 0,94 e 1,24 mm/s.
- O aumento da concentração de soluto nas ligas estudadas parece não influenciar de maneira significativa a posição experimental da TCE.
- A convecção no líquido induzida pela segregação de soluto parece favorecer a TCE a qual acontece quando uma taxa de resfriamento crítica em torno de 0,86 K/s é alcançada à frente da zona colunar. Se T_R não alcançar o valor crítico, não ocorrerá a TCE.

- A convecção termossolutal estimula a formação de grãos equiaxiais, e conseqüentemente a ocorrência da TCE, por meio da quebra de dendritas dos grãos colunares que são então liberadas para a região de líquido localizada à frente da interface de solidificação onde encontram condições de crescimento.

- A comparação dos resultados encontrados neste trabalho com estudos desenvolvidos anteriormente com respeito à ocorrência da TCE nas ligas Al-3%Si e Al-7%Si solidificadas unidirecionalmente no sistema vertical ascendente, segundo as mesmas condições assumidas neste trabalho, indica que o critério proposto na literatura baseado em uma taxa de resfriamento crítica pode ser aplicado ao presente estudo.

5. REFERÊNCIAS

- Ares, A.E. and Schvezov, C.E., 2000, "Solidification Parameters During the Columnar-to-Equiaxed Transition in Lead-Tin Alloys", *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 31A, pp. 1611-1625.
- Badillo, A. and Beckermann, C., 2006, "Phase-Field Simulation of the Columnar-to-Equiaxed Transition in Alloy Solidification", *Acta Materialia*, Vol. 54, pp. 2015-2026.
- Canté, M.V., Cruz, K.S., Spinelli, J.E., Cheung, N. and Garcia, A., 2007, "Experimental Analysis of the Columnar-to-Equiaxed Transition in Directionally Solidified Al-Ni and Al-Sn Alloys", *Materials Letters*, Vol. 61, pp. 2135-2138.
- Dong, H.B. and Lee, P.D., 2005, "Simulation of the Columnar-to-Equiaxed Transition in Directionally Solidified Al-Cu Alloys", *Acta Materialia*, Vol. 53, pp. 659-668.
- Flood, S.C. and Hunt, J.D., 1987, "Columnar and Equiaxed Growth I. A Model of a Columnar Front with a Temperature Dependent Velocity", *Journal of Crystal Growth*, Vol. 82, pp. 543-551.
- Flood, S.C. and Hunt, J.D., 1987, "Columnar and Equiaxed Growth II. Equiaxed Growth Ahead of a Columnar Front", *Journal of Crystal Growth*, Vol. 82, pp. 552-560.
- Flood, S.C. and Hunt, J.D., 1987, "A Model of a Casting", *Applied Science Research*, Vol. 44, pp. 27-42.
- Gandin, Ch.-A., 2000, "From Constrained to Unconstrained Growth During Directional Solidification", *Acta Materialia*, Vol. 48, pp. 2483-2501.
- Hunt, J.D., 1984, "Steady State Columnar and Equiaxed Growth of Dendrites and Eutetic", *Materials Science and Engineering*, Vol. 65, pp. 75-83.
- Ludwig, A. and Wu, M., 2005, "Modeling the Columnar-to-Equiaxed Transition with a Three-Phase Eulerian Approach", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 413, pp. 109-114.
- Peres, M.D., Siqueira, C.A. and Garcia, A., 2004, "Macrostructural and Microstructural Development in Al-Si Alloys Directionally Solidified Under Unsteady-State Conditions", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 381, pp. 168-181.
- Santos, C.A., Quaresma, J.M.V. and Garcia, A., 2001, "Determination of Transient Interfacial Heat Transfer Coefficient in Chill Mold Casting", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 319, pp. 174-186.
- Silva, J.N., Moutinho, D.J., Moreira, A.L., Ferreira, I.L. and Rocha, O.L., 2009, "The Columnar to Equiaxed Transition During the Horizontal Directional Solidification of Sn-Pb Alloys", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 478, pp. 358-366.
- Siqueira, C.A., Cheung, N. and Garcia, A., 2002, "Solidification Thermal Parameters Affecting the Columnar-to-Equiaxed Transition", *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 33A, pp. 2107-2118.
- Siqueira, C.A., Cheung, N. and Garcia, A., 2003, "The Columnar to Equiaxed Transition During Solidification of Sn-Pb Alloys", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 351, pp. 126-134.
- Spinelli, J.E., Ferreira, I.L. and Garcia, A., 2004, "Influence of Melt Convection on the Columnar to Equiaxed Transition and Microstructure of Downward Unsteady-State Directionally Solidified Sn-Pb Alloys", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 384, pp. 217-226.
- Sturz, L., Drevemann, A., Pickmann, C., and Zimmermann, G., 2005, "Influence of Grain Refinement on the Columnar-to-Equiaxed Transition in Binary Al Alloys", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 413, pp. 379-383.
- Wang, C.Y. and Beckermann, C., 1994, "Prediction of Columnar to Equiaxed Transition During Diffusion-Controlled Dendritic Alloy Solidification", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 25A, pp. 1081-1093.
- Ziv, I. and Weinberg, F., 1989, "The Columnar-to-Equiaxed Transition in Al 3Pct Cu", *Metallurgical Transactions*, Vol. 20B, pp. 731-734.

6. DIREITOS AUTORAIS

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

ON THE COLUMNAR TO EQUIAXED TRANSITION OF HORIZONTAL UNSTEADY-STATE DIRECTIONALLY SOLIDIFIED AL–SI ALLOYS

Diego de Leon Brito Carvalho, e-mail: diegodlbc@hotmail.com¹

Andréa Moreira Moutinho, e-mail: dedeammoutinho@hotmail.com¹

Antonio Luciano Seabra Moreira, e-mail: lmoreira@amazon.com.br¹

José Nazareno Silva, e-mail: jo.nazareno@hotmail.com²

Daniel Joaquim da Conceição Moutinho, e-mail: djmoutinho@hotmail.com²

Otávio Fernandes Lima da Rocha, e-mail: otvrocha@oi.com.br²

¹Universidade Federal do Pará, Rua Augusto Corrêa n° 1, Guamá, CEP: 66075-110 – Belém-PA

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará Av. Almirante Barroso n° 1155, Marco, CEP: 66093-020 – Belém-PA

Abstract. *The macrostructure of cast ingots consists of three different zones, that is, the chill, columnar, and equiaxed zones respectively. The origin of each one has been the subject of numerous experimental and theoretical researches in the field of metallurgy because of the well-known correlation between grain structures and mechanical properties. The structure is almost determined in the solidification process, so it is essential to control the solidification process. Despite this effort there is as yet no way that the macrostructure of an ingot can be predicted nor even any clear agreement on how the columnar to equiaxed transition (CET) actually occurs. The CET during solidification has been studied for many years and experimental observations show that the position of the CET and the size of the equiaxed grains is dependent on thermal conditions associated with the casting process including alloy system, alloy composition, melt superheat, mold temperature, mold material, heat-transfer coefficients at the metal-mold interface, cooling rate, casting size, melt convection, transport of solute, and the concentration of nucleating particles. The objective of this contribution is the presentation of experimental results on the CET in two hypoeutectic Al-Si alloys during the horizontal unsteady-state directional solidification in a cooled mold. A combined theoretical and experimental approach is applied to quantitatively determine the solidification thermal parameters such as transient heat-transfer coefficients, tip growth rates, thermal gradients, and cooling rates which affect the structure transition. A comparative study between the results of this article and those from the literature proposed to investigate the CET during upward vertical solidification of Al-Si hypoeutectic alloys is also presented.*

Keywords: *directional solidification, columnar to equiaxed transition, unsteady-state conditions, solidification parameters, Al-Si alloys*