

Evolução do espaçamento eutético e dos parâmetros térmicos durante a solidificação direcional transitória das ligas hipereutéticas Al-15 e 18%Si

R. V. Reyes*, T. S. Bello*, T. A. P. S. Costa**, R. Kakitani**, N. Cheung*, A. Garcia**,
J. E. Spinelli*

Universidade Federal de São Carlos*, Universidade Estadual de Campinas**

Rodovia Washington Luís, Km 235, São Carlos / SP (rodrigoavreyes@gmail.com)

Ligas hipereutéticas Al-Si são caracterizadas pelo elevado teor de silício em sua composição, superior a 13% em peso, e são largamente utilizadas para fabricação de componentes automotivos (pistões, bielas, blocos de motores). O presente trabalho buscou compreender a evolução das microestruturas de ligas binárias hipereutéticas Al-Si submetidas a diversas taxas de resfriamento em experimentos de solidificação unidirecional vertical ascendente, sob condições transitórias de extração de calor. Para isso uma ampla faixa de taxas de resfriamento e velocidades de solidificação foi analisada ao longo do comprimento dos lingotes gerados para as duas ligas com 15 e 18%Si, variando para cada composição, dois níveis de superaquecimento acima da temperatura liquidus: 6% e 23%. Os efeitos tanto do superaquecimento quanto do teor de Si na evolução microestrutural foram examinados por meio da determinação experimental de relações do tipo espaçamento eutético (λ_E) versus velocidade de deslocamento da frente eutética (V_E) e gradiente térmico (G_E).

Palavras-chave: ligas hipereutéticas, solidificação, microestrutura, ligas Al-Si.

Introdução

Ligas hipereutéticas são aquelas que possuem teores de silício acima de 13% em peso. Propriedades como baixa densidade, alta rigidez específica, resistência a altas temperaturas, resistência ao desgaste e baixo coeficiente de expansão térmica fazem com que as ligas hipereutéticas de Al-Si sejam utilizadas em substituição ao ferro fundido em peças de motores da indústria automotiva¹.

Sabe-se que o tamanho e distribuição de silício na liga dependem principalmente das rotas de processamento e do tipo de tratamento dado ao metal líquido. Os efeitos das morfologias de silício primário nas propriedades das ligas hipereutéticas de Al-Si ainda não foram devidamente investigados. A dificuldade de produzir uma estrutura completamente refinada/modificada limita as aplicações das ligas Al-Si hipereutéticas. É sabido que o controle dos parâmetros térmicos de solidificação, para determinada composição química da liga, definirá a microestrutura final^{2,3}.

O sistema Al-Si não é um sistema completamente compreendido, o que demanda investigações tanto com ênfase em aspectos microestruturais tanto relacionando microestrutura vs. propriedades. De um modo geral, a microestrutura de uma liga Al-Si hipereutética apresenta fases conhecidas como partículas de silício primário, silício eutético e dendritas de Al- α . Estudos recentes buscam caracterizar as ligas hipereutéticas Al-Si por meio da reconstrução e visualização em 3D tanto das partículas de Si primário quanto do silício eutético, contribuindo na busca do controle da formação dessas microestruturas^{4,5}.

Agulhas grosseiras de silício eutético podem causar a fragilização das ligas Al-Si, reduzindo o campo de aplicações possíveis. Micro adições de elementos ternários, métodos de solidificação rápida e técnicas de metalurgia do pó tem sido tentadas com a finalidade de melhorar a ductilidade, que é considerada a maior limitação destas ligas^{6,7,8}.

O Al-Si eutético se enquadra na categoria dúctil/frágil dependendo do composto formado. Seu comportamento é complicado, pois com o aumento da velocidade de crescimento o gradiente térmico diminui, e a morfologia do Si eutético muda de Si-angular para agulhas de Si ou Si fibroso, além de morfologias regulares complexas em áreas ricas em Si⁹.

São escassos os trabalhos de ligas Al-Si solidificadas em regime transiente de extração de calor. Em estudo realizado com ligas binárias Al-Ni, Araujo e coautores¹⁰ relacionaram o espaçamento eutético (λ) com V e G e não somente com V, considerando mais apropriado a inter-relação entre λ e 2 parâmetros térmico de solidificação, representando melhor o crescimento eutético em ligas Al-Ni hipoeutéticas. Relações experimentais desta natureza permanecem não determinadas para ligas Al-Si solidificadas em condições transientes de extração de calor.

Considerando a importância do conhecimento dos aspectos estruturais como morfologias, distribuição e tamanho do Si presente no constituinte eutético, o presente trabalho tem como objetivo verificar os efeitos tanto do superaquecimento quanto do teor de Si na evolução microestrutural de ligas hipereutéticas Al-Si. Para examinar estes efeitos, serão determinadas experimentalmente as relações do tipo espaçamento eutético (λ_E) versus velocidade de deslocamento da frente eutética (V_E) e gradiente térmico (G_E) para as ligas hipereutéticas Al-15 e 18%Si.

Materiais e Métodos

Para atingir os objetivos do presente estudo, foram preparadas quatro ligas hipereutéticas de Al-Si. Duas de composição Al-15%Si e outras duas Al-18%Si (% em peso). Cada uma das ligas foi fundida em um forno de indução e posteriormente vazada em uma lingoteira cilíndrica bipartida de aço AISI 310 com uma base de aço carbono 1020, que está acoplada ao dispositivo de solidificação unidirecional vertical ascendente. O dispositivo é composto por um forno de resistências elétricas com controlador de temperatura e um sistema de refrigeração à água. A lingoteira possui 8 termopares do tipo K distribuídos ao longo de seu comprimento, de forma que é possível medir as variações de temperatura no metal líquido em seu interior. Todos os termopares estão ligados a um sistema de aquisição de dados que é conectado a um computador.

As paredes laterais da lingoteira foram revestidas interna e externamente por um cimento refratário com a finalidade de minimizar a perda de calor na direção radial do lingote a ser formado e evitar vazamentos de metal líquido. O esquema de montagem do aparato experimental está representado na Figura 1.

Uma porção do metal líquido é vazada em um cadinho de carvão de silício com um termopar fixo em seu interior, sendo dessa forma possível registrar a temperatura *liquidus* (T_L) das duas composições estudadas: 617 e 660°C para as ligas Al-15%Si e Al-18%Si respectivamente. Dois níveis de superaquecimento (ΔT) foram usados para produzir cada composição estudada por meio de solidificação direcional, quais sejam: 6 e 23% acima da temperatura *liquidus*.

As bases de aço carbono foram lixadas com lixas de granulometria até 1200 *mesh*, com exceção da liga Al-15%Si ($\Delta T=23\%$), que foi lixada com lixas de até 400 *mesh* de granulometria, com objetivo de reduzir as taxas de resfriamento (\dot{T}) durante a solidificação da liga.

No experimento de solidificação unidirecional vertical ascendente sob condições transitórias de extração de calor, são obtidos os perfis térmicos para cada liga, isto é, a leitura da temperatura registrada em cada termopar com uma frequência de aquisição de 1 ponto/segundo em todos os termopares. Dessa maneira foi possível analisar o tempo da passagem da frente eutética (t_E) em cada posição monitorada pelos termopares, e construir curvas do tipo $P \times t_E$, que servirão de base para determinar os parâmetros térmicos como a velocidade de avanço da frente eutética (V_E), taxa de resfriamento (\dot{T}_E) e gradiente térmico (G_E).

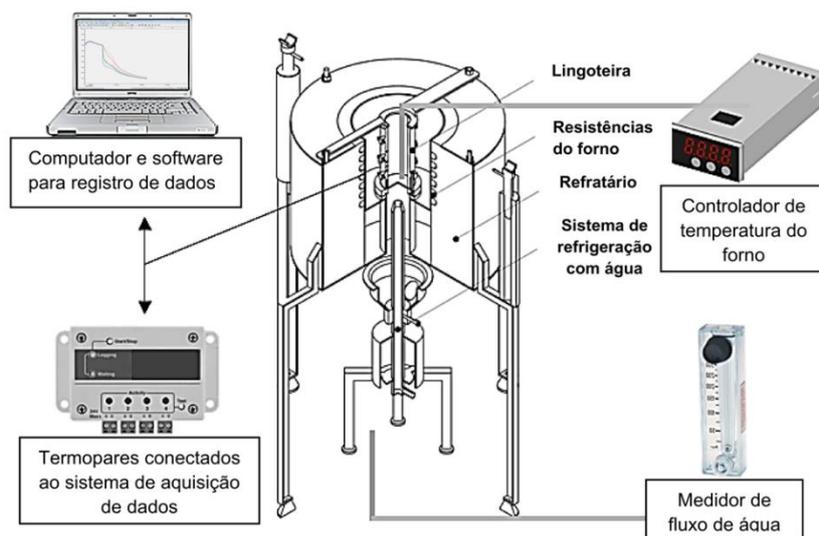


Figura 1 - Dispositivo de solidificação unidirecional vertical e acessórios conectados.

Após o experimento de solidificação unidirecional vertical ascendente, foram obtidos 4 lingotes cilíndricos que foram cortados para o preparo das amostras metalográfica, as quais foram posteriormente caracterizadas através de microscopia

ótica. A forma de obtenção dessas amostras, a partir do lingote, está representada na Figura 2.

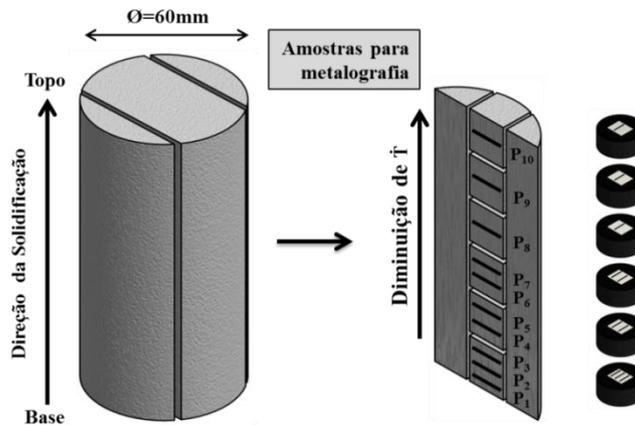
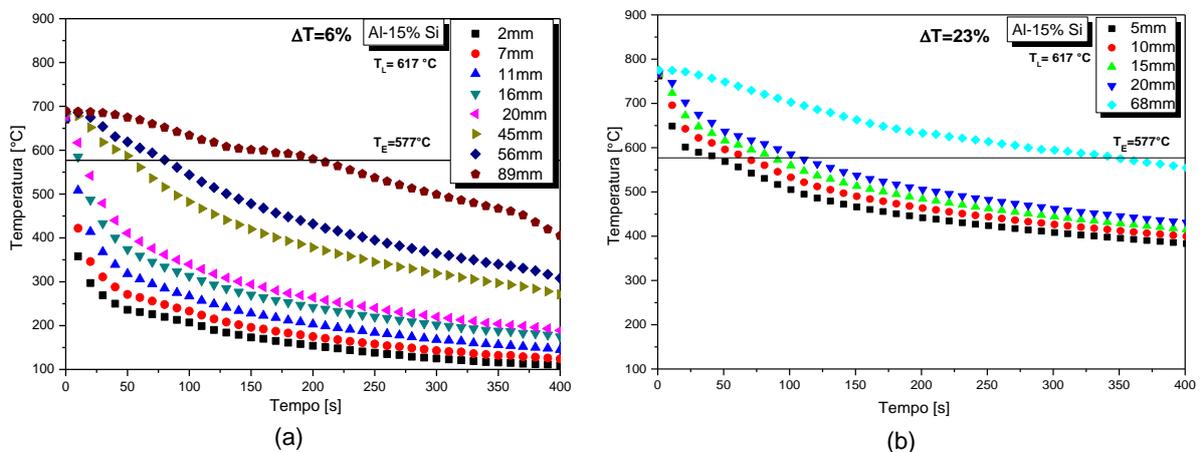


Figura 2 - Forma de obtenção das amostras metalográfica a partir de lingote Al-Si.

As amostras metalográficas foram atacadas com solução de NaOH por aproximadamente 10 segundos e as imagens foram registradas com uso de microscópio ótico com câmera acoplada. Utilizando o software ImageJ foi possível medir os espaçamentos eutéticos (λ_E) para diversas posições (P) ao longo do lingote por meio do método quantitativo do intercepto¹⁰.

Resultados e discussões

A Figura 3 mostra os perfis térmicos registrados para as 4 condições experimentais envolvendo solidificação direcional das ligas hipereutéticas Al-Si. Estes dados foram utilizados para determinação experimental de V_E , \dot{T}_E e G_E .



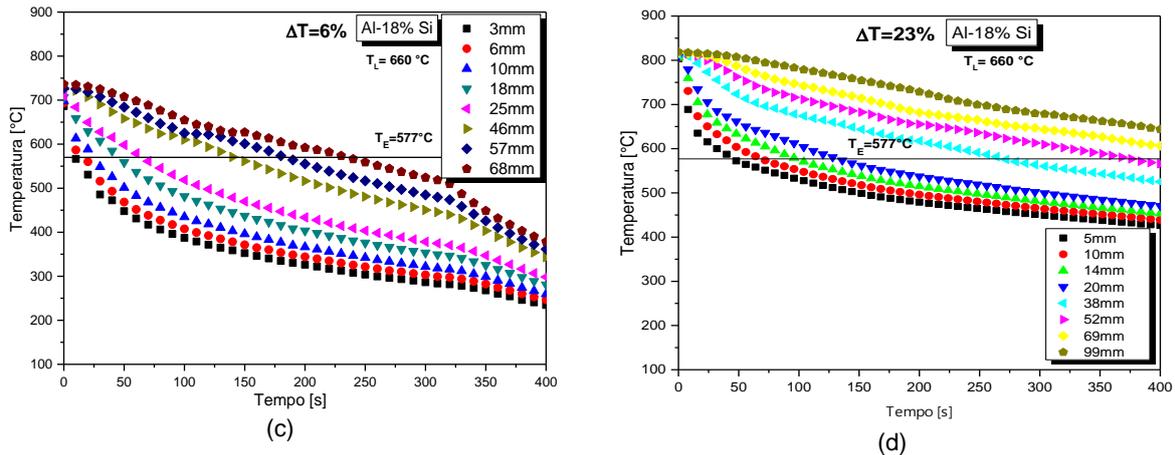
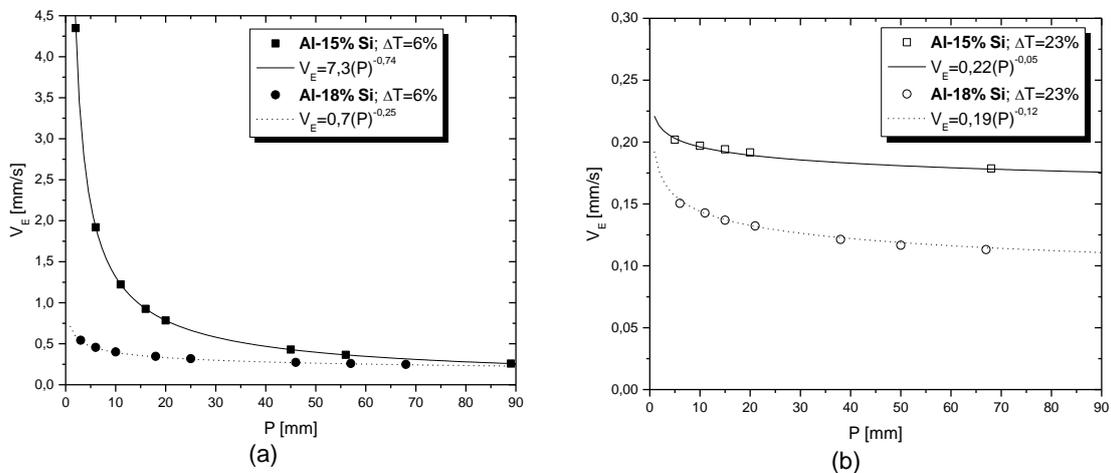


Figura 3 - Perfis Térmicos obtidos para diferentes termopares inseridos ao longo do comprimento dos lingotes para as seguintes condições: (a) Al-15%Si ($\Delta T=6\%$); (b) Al-15%Si ($\Delta T=23\%$); (c) Al-18%Si ($\Delta T=6\%$); e (d) Al-18%Si ($\Delta T=23\%$).

Todas as curvas experimentais da Figura 4 mostram uma redução dos parâmetros térmicos de solidificação ao longo do comprimento do lingote solidificado. As Figuras 4(a) e 4(b) mostram a evolução de V_E para ambas as ligas e no caso dos experimentos correspondendo a $\Delta T=23\%$ apenas pequenas variações na velocidade da frente eutética são notadas. Isso pode estar relacionado ao alto valor de superaquecimento. Comparando os perfis experimentais de V_E , é possível afirmar que valores inferiores referem-se à liga Al-18%Si. Ou seja, o aumento de Si tende a diminuir os valores de V_E . Uma faixa de V_E entre 0,11mm/s e 4,30mm/s foi obtida. Em função da significativa variação deste parâmetro, expressivas variações de espaçamento eutético foram determinadas, quais sejam: Al-15%Si \rightarrow entre 0,8 μm e 3,1 μm e Al-18%Si \rightarrow entre 1,3 μm e 4,4 μm .



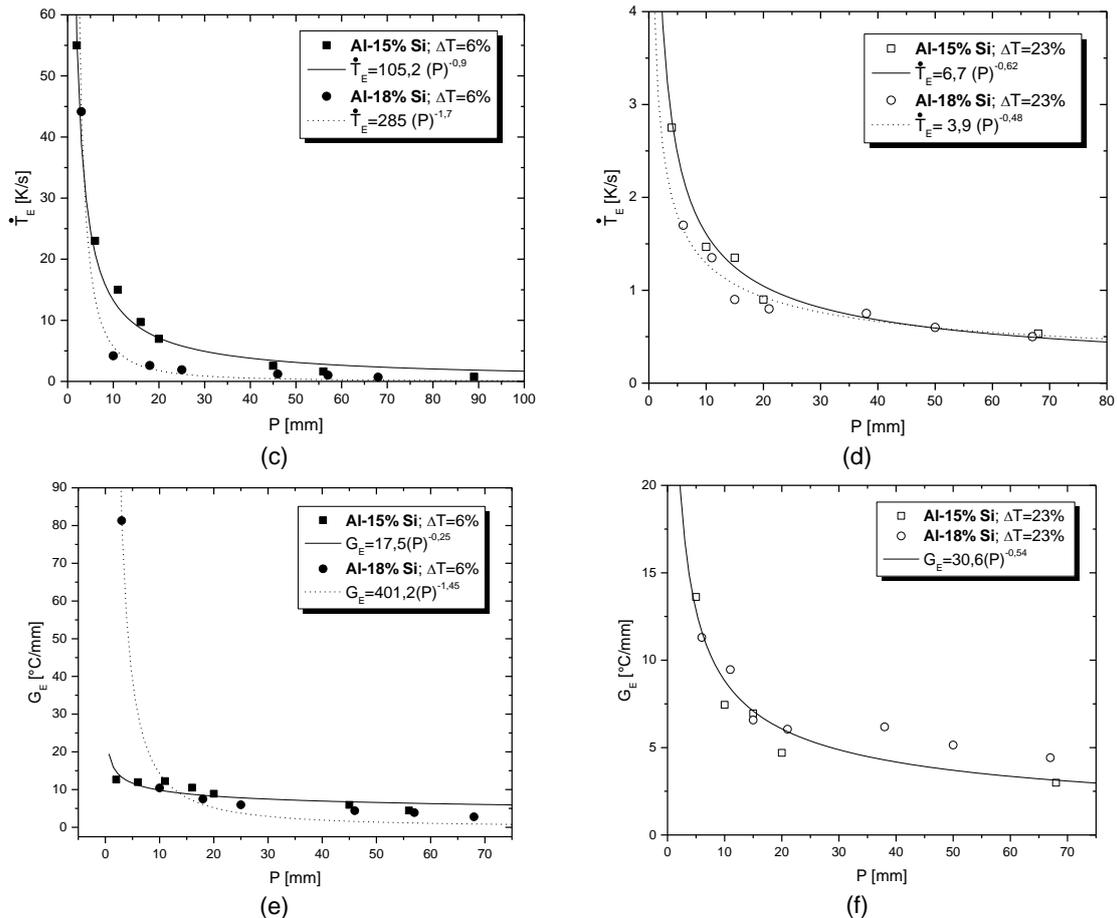


Figura 4 – Evoluções das variáveis térmicas de solidificação obtidas durante a solidificação direcional transiente das ligas Al-15 e 18%Si: (a) V_{EXP} para $\Delta T=6\%$; (b) V_{EXP} para $\Delta T=23\%$; (c) \dot{T}_{EXP} para $\Delta T=6\%$; (d) \dot{T}_{EXP} para $\Delta T=23\%$; (e) G_{EXP} para $\Delta T=6\%$; e (f) G_{EXP} para $\Delta T=23\%$

A Figura 5 apresenta micrografias representativas das 4 condições estudadas, exibindo as microestruturas formadas em 3 diferentes taxas de resfriamento (\dot{T}_E) e o valor de espaçamento eutético (λ_E) correspondente. Nas micrografias é possível observar as microestruturas típicas do Al-Si hipereutético (Si primário, eutético e Al- α). Para todas as ligas nota-se que o espaçamento eutético diminui na medida em que a taxa de resfriamento aumenta.

São apresentados na Figura 6 as relações dos espaçamentos eutéticos (λ_E) em função das velocidades eutéticas (V_E), assim como as respectivas leis de crescimento para as 4 condições analisadas. Nota-se que o expoente $-1/2$ foi obtido nas leis de crescimento de todas as ligas analisadas, o que está de acordo com a lei de crescimento de eutéticos proposta por Jackson e Hunt^{12,13}. Foi observado que uma única lei de crescimento eutético foi suficiente para descrever as ligas Al-15%Si

testadas em ambas as condições ($\Delta T=6\%$ e $\Delta T=23\%$), sugerindo que o crescimento eutético não variou com o superaquecimento para essa composição. Dentre as ligas Al-18%Si foi verificado que a liga solidificada direcionalmente com $\Delta T=6\%$ apresentou um ligeiro refinamento em relação à de maior superaquecimento ($\Delta T=23\%$).

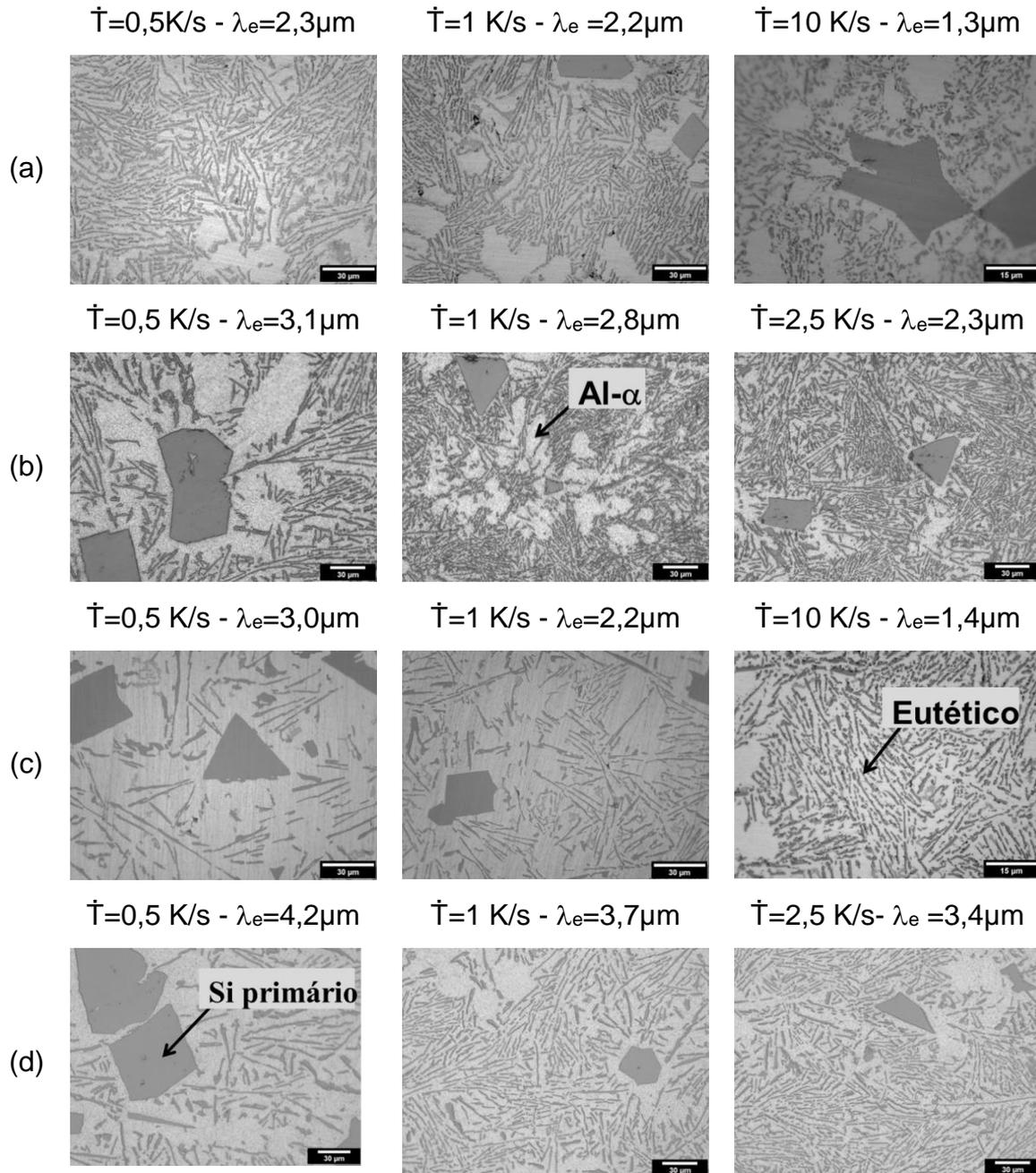


Figura 5 – Microestruturas obtidas durante a solidificação direcional transiente das ligas: (a) Al-15%Si com $\Delta T=6\%$; (b) Al-15%Si com $\Delta T=23\%$; (c) Al-18%Si com $\Delta T=6\%$; (d) Al-18%Si $\Delta T=23\%$.

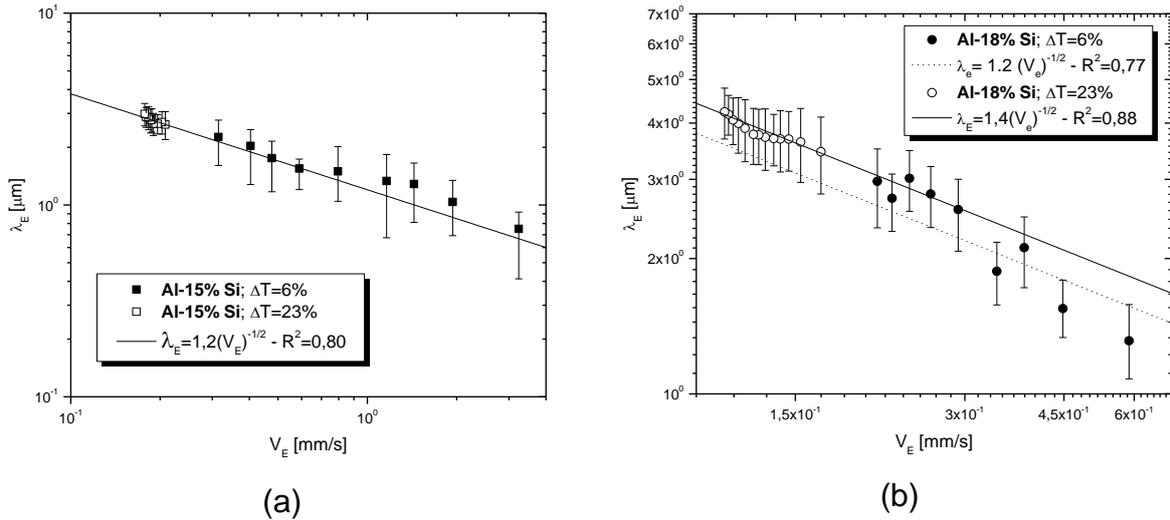


Figura 6 – Espaçamento eutético em função da velocidade eutética ($\lambda_E \propto V_E$) estabelecendo relações de crescimento para as ligas: (a) Al-15%Si com $\Delta T=6$ e 23% e (b) Al-18%Si com $\Delta T=6$ e 23%. R^2 é o coeficiente de correlação.

Na Figura 7 são mostradas as curvas do espaçamento eutético em função da relação $G \times V$. Adotando os expoentes $-1/8$ e $-1/4$ para G e V , respectivamente, foi observado que as leis de crescimento geradas representam relativamente bem as ligas Al-Si hipereutéticas. Nota-se que dentre as ligas testadas, fixando-se a composição, as ligas solidificadas com maior superaquecimento ($\Delta T=23\%$) mostram um aumento do espaçamento para um mesmo valor de $G^{(-1/8)} \times V^{(-1/4)}$.

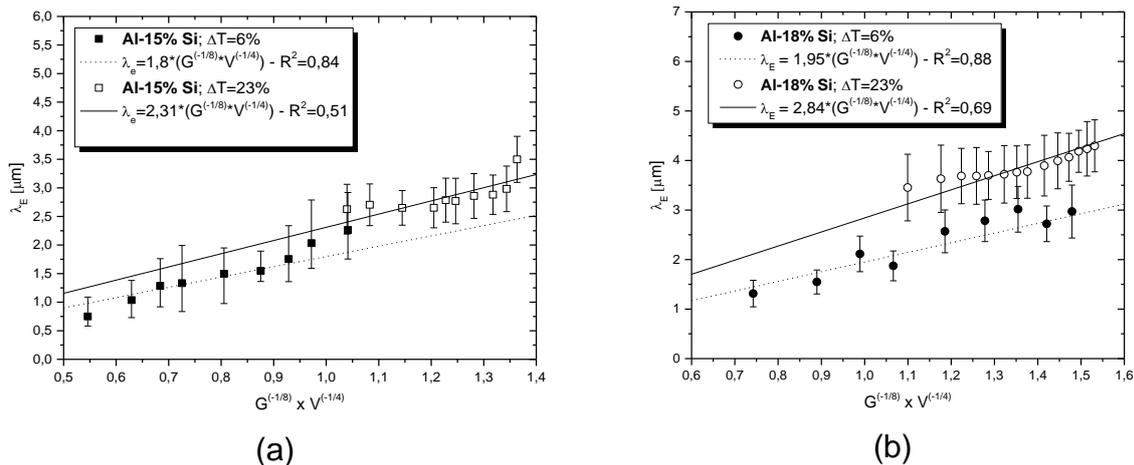


Figura 7 – Espaçamento eutético em função de $G^{(-1/8)} \times V^{(-1/4)}$ com respectivas leis de crescimento para as ligas: (a) Al-15%Si com $\Delta T=6$ e 23% e (b) Al-18%Si com $\Delta T=6$ e 23%.

Conclusões

Com base nos resultados experimentais obtidos para as 4 condições de solidificação transiente das ligas hipereutéticas Al-Si, as seguintes conclusões podem ser inferidas:

1. Com aumento do teor de silício, nota-se que os valores da velocidade eutética (V_E) tendem a diminuir, assim como com o aumento do superaquecimento (ΔT), fixada uma dada composição, as V_E também diminuíram.
2. A microestrutura predominante das ligas hipereutéticas Al-Si estudadas é a eutética tipo agulha ou “flakes” de Si, mas também foi observado o crescimento de Si primário e dendritas de Al- α , sendo que o espaçamento eutético (λ_E) variou entre 0,8 μm e 3,1 μm para as ligas Al-15%Si e entre 1,3 μm e 4,4 μm para as ligas Al-18%Si.
3. Duas formas de lei de crescimento foram propostas sendo que a opção de variação contendo λ_E versus $G \times V$ pode ser considerada mais representativa do processo, uma vez que envolve dois parâmetros cinéticos de solidificação.

Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido com apoio do Grupo de Microestrutura e Propriedades em Processos de Solidificação (M²PS) do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) e, em parceria com o Grupo de Pesquisas em Solidificação (GPS) do DEMa da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

A realização do trabalho se tornou possível pelo financiamento da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP – Proc. IC N° 2015/03116-5), e pela bolsa concedida pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Referências Bibliográficas

1. LASA, L.; RODRIGUEZ-IBABE, J. M. Wear behaviour of eutectic and hypereutectic Al-Si-Cu-Mg casting alloys tested against a composite brake pad. **Materials Science and Engineering A**, v. 363, p. 193-202, 2003.
2. VIJEESH, V.; PRABHU, K. N. Review of microstructure evolution in hypereutectic Al-Si alloys and its effect on wear properties. **Transactions of the Indian Institute of Metals**, v. 67, n. 1, p. 1-18, 2014.
3. KURZ, W.; FISHER D.J. **Fundamentals of Solidification**, 4th edition. Trans Tech Publications Ltd, 1981/1984/1986/1989/1992/2005, 304 p.
4. SCHABERGER-ZIMMERMANN, E.; MATHES, M.; ZIMMERMANN, G. Hypereutectic AlSi Alloy: Gathering of 3D Microstructure Data. **Journal of the Minerals, Metals, and Materials Society**, v. 68, p. 2073-2081, 2016.
5. WANG, K.; WEI, M.; ZHANG, I.; DU, Y. Morphologies of Primary Silicon in Hypereutectic Al-Si Alloys: Phase-Field Simulation Supported by Key Experiments. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 47, p.1510-1516, 2016.
6. DAI, H.; LIU, X. Effects of individual and combined additions of phosphorus, boron and cerium on primary and eutectic silicon in an Al-30Si alloy. **Rare Metals**, v. 28, p. 651-655, 2009.
7. JONES, H. The status of rapid solidification of alloys in research and application. **Journal of Material Science**, v. 19, p. 1043-1076, 1984.
8. HOU, L. G.; CUI, C.; ZHANG, J. S. Optimizing microstructures of hypereutectic Al-Si alloys with high Fe content via spray forming technique. **Materials Science and Engineering A**, v. 527, p. 6400-6412, 2010.
9. KHAN, S.; OURDJINI, A.; HAMED, Q. S.; ALAM NAJAFABADI, M. A.; ELLIOTT, R. Hardness and mechanical property relationships in directionally solidified aluminium-silicon eutectic alloys with different silicon morphologies. **Journal of Materials Science**, v. 28, p. 5957-5962, 1993.
10. ARAUJO, I. J. C.; BISMARCK, L. S.; SPINELLI, J. E.; GARCIA, A. Evolution of Eutectic Spacing During Unidirectional Solidification of Al-Ni Alloys. **Materials Research**, v. 14, p. 268-273, 2011.
11. TREPCZYŃSKA-ŁENT, M. Rod and lamellar growth of eutectic. **Archives of Foundry Engineering**, v. 10, p. 179-184, 2010.

12. JACKSON, K. A.; HUNT, J. D. Lamellar and rod eutectic growth. **Transactions of Metallurgical Society of AIME**, v. 236, p. 1129-1142, 1966.
13. HUNT, J. D.; LU, S. Z. Numerical modeling of cellular array growth: spacing and structure predictions. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 27A, p. 611-623, 1996.

Evolution of eutectic spacing and thermal parameters during the transient directional solidification of the hypereutectic Al-15 and Al-18%wt.Si alloys

Abstract

Hypereutectic Al-Si alloys are characterized by high content of Si in their composition, which is higher than 13wt.%Si. Such alloys are largely used for manufacture of automotive components. The present study searched to better comprehend the microstructural evolution of hypereutectic Al-Si alloys, which have been subjected to a diversity of cooling conditions during liquid-to-solid transformation under vertical upward transient directional solidification. So, broad spectra of cooling rates and growth rates have been evaluated along the length of the produced castings, considering two chemistries, i.e., Al-15 and 18wt.%Si. Further, each composition has been tested with two levels of superheating: 6% and 23% above the liquidus temperatures. The effects not only of the Si content but also of the overheating temperature on the microstructure are examined by means of determining the experimental relationships between interphase spacing (λ) within the eutectic Si and both growth rate (V) and thermal gradient (G).

Keywords: hypereutectic alloys; solidification, microstructure; Al-Si alloys.