

ANÁLISE DA CURVA DE RESFRIAMENTO AUXILIADA POR COMPUTADOR APLICADA PARA DEFINIÇÃO DOS LIMITES DE ALIMENTAÇÃO NA SOLIDIFICAÇÃO DA LIGA AL-SI HIPOEUTÉTICA

C. R. F. Ferreira¹, B. A. Dedavid² e V. K. de Barcellos¹

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

²Pontífice Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS)

Av. Bento Gonçalves, 9500 – Cx. Postal 15.021 – CEP 91501-979-Porto Alegre-RS

frick@ufrgs.br

RESUMO

O processo de fabricação por fundição permite a obtenção de formas metálicas mais econômicas do que em qualquer outro processo. O conhecimento dos mecanismos envolvidos na solidificação dos metais e suas ligas permite o desenvolvimento de programa de computador capaz de simular a obtenção de formas metálicas com características desejáveis. Diferentes técnicas de análise térmica são amplamente utilizadas para estudar a solidificação e controlar o processo de fundição. A técnica de análise da curva de resfriamento com auxílio do computador (CA-CCA, na sigla em inglês) usada com o método dos dois-termopares, fornece mais informações sobre o desenvolvimento da estrutura durante a solidificação, que qualquer outra técnica descrita na literatura. Neste trabalho foram determinadas as temperaturas características da solidificação que limitam as regiões de alimentação da liga de alumínio silício hipoeutética. Os resultados obtidos podem ser aplicados em software de simulação, a fim de melhorar a precisão da simulação.

Palavras-chave: liga Al-Si; Solidificação; Análise térmica; Curva de resfriamento.

INTRODUÇÃO

O processo de fabricação por fundição é capaz de produzir peças metálicas de alto desempenho, em praticamente todos os metais, puros e ligas, com qualquer forma, em uma única etapa. De concepção simples, é utilizado a milênios. Funde-se o material, eleva-se a temperatura até o mínimo necessário à permitir o fluxo de metal líquido durante o vazamento e o enchimento de um molde adequado. Espera-se o metal esfriar e solidificar na forma desejada⁽¹⁾. Para tanto, se faz necessário alguns cuidados fundamentais. O controle do metal líquido, antes do vazamento, e o posterior resfriamento e solidificação no molde se destacam como principais atuadores na formação da estrutura interna e conseqüentemente nas propriedades de peças fundidas. O metal líquido deve estar o mais limpo possível, não ter ou ter baixo nível de inclusões e gás dissolvido, tal que não gere problemas na solidificação. O desenvolvimento de sistemas de canais adequados para o enchimento do molde e alimentação da peça com metal líquido para garantir peças fundidas de alto desempenho, se torna inócua se o metal líquido for inadequado. O ponto de partida para o metal líquido limpo é a qualidade da matéria prima que foi fabricado⁽²⁾.

O modo de solidificação determina o tamanho e a constituição das fases presentes na microestrutura, que influenciam as propriedades finais das peças fundidas⁽³⁾. O principal problema na solidificação é a contração, que geralmente ocorre na transição do estado líquido para o estado sólido, na maioria dos metais e ligas. Nas ligas de alumínio fundido, a transformação do estado líquido para o estado sólido é sempre acompanhada por uma contração que varia entre 4 a 8% em volume, dependendo do tipo de liga. Este prejuízo precisa ser compensado com metal líquido extra para não aparecer como porosidade⁽⁴⁾. Campbell^(4,5) definiu cinco mecanismos de alimentação característicos na solidificação das ligas de alumínio como sendo; alimentação líquida, alimentação pastosa, alimentação interdendrítica, alimentação explosiva e alimentação sólida. Compreender os mecanismos de alimentação durante a solidificação facilita simular a obtenção de peças fundidas com propriedades desejadas^(6,7,8). A precisão da simulação de peças fundidas depende da qualidade das propriedades físicas e termofísicas dos materiais disponíveis e do conhecimento da fração sólida (fs) nas diferentes regiões da solidificação. A fs é um parâmetro crítico para simulação de peças fundidas de alto desempenho, por permitir quantificar o volume de metal que estará sujeito a defeitos

estruturais relacionados a contração dos metais e suas ligas. A literatura apresenta diversas técnicas capazes de quantificar a evolução da fs em função do tempo⁽⁹⁾. A técnica de análise da curva de resfriamento com auxílio do computador (CA-CCA, na sigla em inglês)⁽¹⁰⁾ é uma delas. A CA-CCA está baseada no fato que as reações químicas e muitas das transformações de fase que ocorrem durante a fusão ou solidificação, de um metal ou liga, envolvem a liberação ou consumo de energia que alteram o comportamento da curva de resfriamento. Dependendo da natureza da análise, a metodologia experimental pode fornecer uma infinidade de dados que podem ser usados para quantificar o conhecimento do fenômeno da solidificação⁽¹¹⁾. Os resultados da análise térmica baseiam-se nas curvas de resfriamento obtida normalmente por um termopar colocado no centro térmico da peça ou lingote que registra a evolução da temperatura em função do tempo. Este sinal derivado e integrado, fornece informações que envolvem temperaturas de início e fim de transformações de fase, seu conteúdo energético e mecanismos envolvidos na cinética da solidificação. A princípio a técnica consiste em gravar a curva de resfriamento, gerar sua primeira derivada em função do tempo e simular uma curva zero virtual, sem transformação de fase, correspondente a região da solidificação e então subtrair a área sob a curva zero da área sob a taxa de resfriamento⁽¹²⁾. Existem dois métodos bem conhecidos para simulação da curva zero a partir da curva de resfriamento: a Análise Térmica Newtoniana (ATN)⁽¹⁰⁾, e a Análise Térmica de Fourier (ATF)⁽¹³⁾. Temperaturas de solidificação características como liquidus (T_L), do ponto de coerência dendrítica (T_{PCD}), do ponto de rigidez (T_{PRig}) e solidus (T_S), são reconhecidas como parâmetros importantes na solidificação de ligas de alumínio porque limitam a transição entre os diferentes mecanismos de alimentação. Todas, podem ser determinadas através de técnicas de análise térmica⁽¹⁴⁾. Para determinação do Ponto de Coerência Dendrítica (PCD), que define a T_{PCD} , e do Ponto de Rigidez (PRig), que define a T_{PRig} , é necessário aplicar a técnica dos dois termopares⁽¹⁵⁾. A figura 1 mostra as curvas de resfriamento, da primeira derivada e da diferença entre as temperaturas da parede e do centro do molde de uma liga de alumínio. As temperaturas características da solidificação que limitam os cinco mecanismos de alimentação de peças fundidas estão indicadas na curva de resfriamento. A T_L , e a T_S , foram obtidas com ajuda da primeira derivada e a T_{PCD} e a T_{PRig} foram determinadas pela curva da diferença entre as temperaturas da parede e do centro do molde. Pode também ser visto uma representação esquemática da

estrutura de solidificação, correlacionada com as cinco regiões de alimentação de peças fundidas limitadas pelas temperaturas características da solidificação⁽¹⁴⁾.

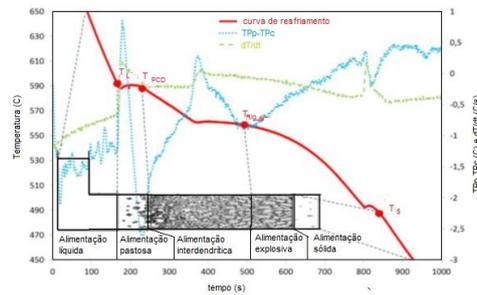


Figura 1. Limites dos cinco mecanismos de alimentação, representados pelas temperaturas características de solidificação, T_L , T_{PCD} , T_{PRig} e T_S , determinadas a partir da curva de resfriamento. Adaptado de Djurdjeric⁽¹⁴⁾.

De acordo com a Figura 1, a solidificação inicia com a nucleação e crescimento dendrítico da reação primária de α -Al na temperatura liquidus (T_L), que limita o fim da alimentação líquida. Segundo o diagrama de equilíbrio Al-Si a temperatura de nucleação ou T_L pode variar de aproximadamente 660° C para o alumínio puro até 577° C para a composição eutética, com aproximadamente 12,6% de silício. A partir da T_L a alimentação passa a ser na forma de uma mistura de dendritas sólidas de α -Al e líquido denominada de alimentação pastosa. Ainda que o volume das dendritas de α -Al aumente até ao final da solidificação, seus braços primários param de aumentar em comprimento quando as dendritas, que se moviam livremente no líquido, começam a se tocar umas às outras, formando um esqueleto sólido de dendritas. Nesse ponto da solidificação, o material passa a comportar-se mais como um sólido do que como um líquido, resultando numa transição de propriedades físicas onde a resistência mecânica e a condutividade térmica aumentam. Este ponto é conhecido como Ponto de Coerência Dendrítica (PCD)⁽¹⁵⁾ e a T_{PCD} correspondente, limita o fim da região de alimentação pastosa e o início da alimentação interdendrítica. É a partir do PCD que inicia o aparecimento dos defeitos de segregação, trincas e porosidade. A alimentação interdendrítica segue até o Ponto de Rigidez (PRig)⁽¹⁵⁾ na T_{PRig} correspondente. O primeiro mínimo, após a nucleação e o segundo mínimo após o início da precipitação do silício eutético, na curva da diferença de temperatura T_{pp} - T_{pc} , correspondem as máximas diferenças de temperatura entre o termopar posicionado próximo da parede e o termopar

posicionado no centro do copo de análise térmica e, determinam o PCD e o PRig, respectivamente. A diferença na condutividade térmica do estado líquido e do estado sólido é a principal razão pela qual nesses pontos a diferença entre as temperaturas do centro e da parede é maior. Ambas as temperaturas são muito dependentes da taxa de resfriamento e da composição química da liga. A partir da T_{PRig} , inicia a alimentação explosiva, causada por pressão externa ou pela contração do material, que rompe o esqueleto dendrítico. A partir de T_S inicia a alimentação sólida, a mais fechada de todas.

Este trabalho se propõe a utilizar a técnica de análise da curva de resfriamento auxiliada por computador, junto a Análise Térmica Newtoniana, para determinar a evolução da fração sólida como função do tempo e correlaciona-la com as temperaturas limites dos cinco mecanismos de alimentação na solidificação de uma liga binária alumínio silício hipoeutética. O método numérico utilizado para o cálculo do calor latente e da evolução da fração sólida é o mesmo que o desenvolvido na literatura^(10,11). A T_L e a T_S foram determinadas através da curva da primeira derivada da CR. O PCD e o PRig foram determinadas de acordo com o método dos dois termopares⁽¹⁵⁾, através da curva da diferença de temperatura entre um termopar posicionado no centro térmico e outro posicionado próximo a parede de um copo cerâmico de análise térmica fabricado pelo processo de fundição de precisão por cera perdida.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

A liga de alumínio-silício usada como o material de análise, foi fundida, em cadinho de grafite, em forno de indução e vazada em copo cerâmico, instrumentado com termopares, fabricado pelo processo de fundição de precisão por cera perdida.

Métodos

A liga Al-Si hipoeutética foi fundida a partir de lingote secundário, sob uma camada de fluxo de proteção química comercial. Não foram utilizados agentes refinadores de grão nem modificadores de silício. Após a fusão de toda a carga, 6,9 kg, a temperatura do banho líquido foi elevada até 800 °C e mantida por 15 minutos. Em seguida, o banho líquido foi escorificado e transferido para um cadinho pré-aquecido a 700 °C, escorificado novamente e vazado em copo de análise térmica

pré-aquecido a 700 °C, instrumentado com 2 termopares, do tipo K, com diâmetro do fio de 0,256 mm, protegido com bainha de aço inoxidável com diâmetro de 1,6 mm. Um termopar foi colocado no centro TPC, a 25 mm da parede, e o outro TPp a 1 mm da parede, ambos a 25 mm da base. Para satisfazer as hipóteses adotadas para resolver a equação Newtoniana de resfriamento, a base e a parte superior do CAT foram isoladas com manta cerâmica. Os dados de temperatura foram adquiridos por um sistema de aquisição de dados da National Instruments, a uma taxa de 10 pontos por segundo, conectado a um computador pessoal. As dimensões do CAT e a posição dos termopares pode ser visto na figura 2 A) e B), respectivamente.

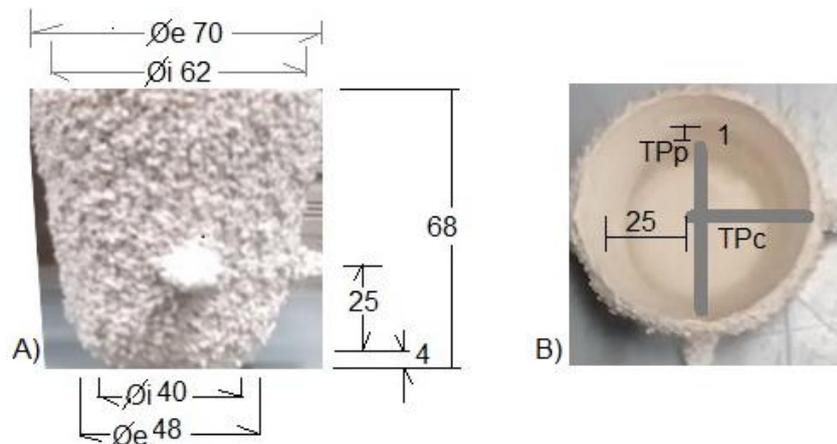


Figura 2. Copo de Análise Térmica, CAT, cerâmico fabricado pelo processo de fundição de precisão por cera perdida, mostrando em A) as dimensões e em B) a posição dos termopares. As medidas estão em mm.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Composição química

A tabela 1, mostra a composição química, obtida por espectrometria de emissão óptica, da liga de Al-Si fundida utilizada para análise da curva de resfriamento. Os valores confirmam uma liga binária Al-Si hipoeutética com baixo nível de impurezas.

Tabela 1. Composição química, obtida por espectrometria de emissão óptica. Os valores são em porcentagem em peso.

Liga	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
Al-Si (% em peso)	6,94	0,173	0,0098	0,00036	0,00048	0,0033	0,0053

Análise térmica

A figura 3 mostra em A) as curvas de resfriamento experimental geradas pelos termopares posicionados no centro, CR_{TPc} , linha sólida em vermelho, e próximo a parede, CR_{TPp} , linha pontilhada em preto, do CAT mostrado na fig. 2. Em B) mostra as mesmas curvas mostradas em A) e a curva da diferença entre elas ($CR_{TPp} - CR_{TPc}$) em azul, usada para identificar o PCD, primeiro mínimo após a reação primária de α -Al e o PRig, segundo mínimo, após a reação eutética, com as respectivas temperaturas T_{PCD} e T_{PRig} e tempos t_{PCD} e t_{PRig} .

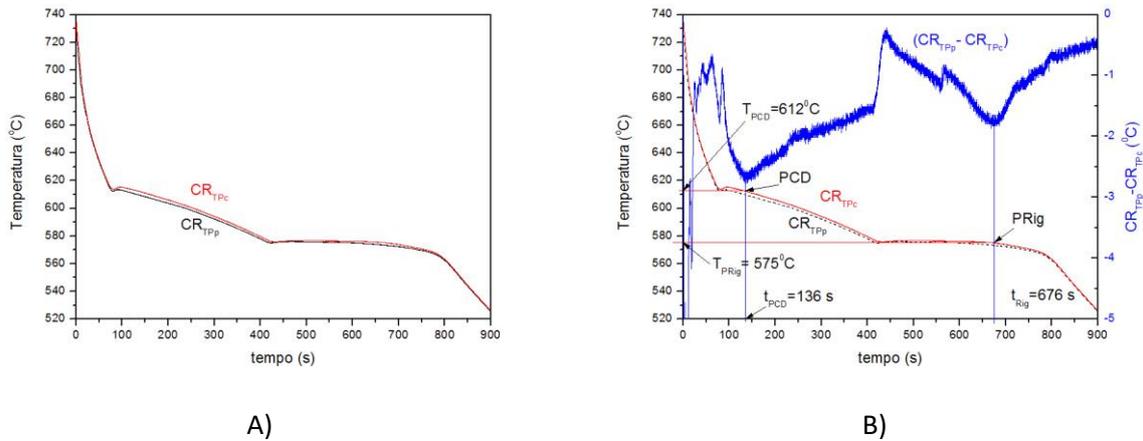


Figura 3. Em A) Curvas de resfriamento experimentais geradas pelos termopares posicionados no centro, CR_{TPc} , linha sólida em vermelho e próximo a parede, CR_{TPp} , linha pontilhada em preto. Em B) Mesmas curvas da figura 3A e a curva da diferença entre elas, $CR_{TPp} - CR_{TPc}$, linha sólida azul, com destaque para a determinação do PCD indicado pelo primeiro mínimo da curva e o PRig indicado pelo segundo mínimo da curva e as respectivas temperaturas e tempos.

A figura 4 A) mostra a CR_{TPc} , e a respectiva curva da primeira derivada $(dT/dt)_{CR}$, utilizada para determinação do tempo t_L , e da temperatura T_L , do início, e do tempo t_s , e da temperatura T_s , do fim da solidificação, respectivamente. Em B) mostra a Curva Zero Newtoniana (CZN) linear, obtida pela união dos pontos de início e fim da solidificação na curva e será tratada como $(dT/dt)_{CZN}$. A diferença entre as curvas $(dT/dt)_{CR}$ e $(dT/dt)_{CZN}$, representa o calor gerado pelas reações metalúrgicas dentro da amostra solidificando em qualquer tempo e, portanto, a fs pode ser calculada para qualquer temperatura entre T_L e T_s ⁽¹⁵⁾.

Para o cálculo do calor latente de solidificação e da fração sólida é necessário o conhecimento do calor específico do material durante a solidificação. O propósito

do cálculo do calor latente, neste trabalho, foi para validar o método utilizado para interpretação das curvas de resfriamento. Se os valores encontrados forem próximos dos valores da literatura, para a mesma liga, considera-se que o método é válido.

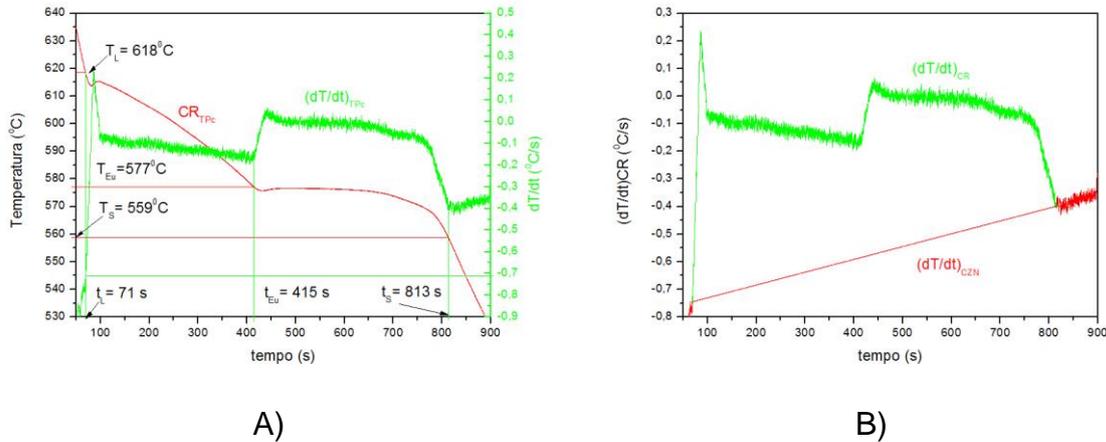


Figura 4. Em A) CR_{TPC} e sua curva da primeira derivada $(dT/dt)_{CR}$, utilizada para determinação do tempo t_L , e da temperatura T_L , do início, e do tempo t_S , e da temperatura T_S , do fim da solidificação, e do tempo de início da reação eutética, t_{Eu} , e da temperatura eutética T_{Eu} . Em B) Curva Zero Newtoniana (CZN) linear $(dT/dt)_{CZN}$, obtida pela união dos pontos de início e fim da solidificação na curva da $(dT/dt)_{CR}$

Na tabela 2 estão tabulados os valores do calor latente, calculados neste trabalho pela técnica de ATN e os encontrados na literatura⁽¹⁵⁾ calculados, com o mesmo valor de calor específico médio de 1,2 J/g.K, pelas técnicas de Fourier, Newtoniana e por Differential Scanning Calorimeter (DSC). Pode-se observar que o valor do calor latente calculado neste trabalho pela técnica Newtoniana está mais próximo dos valores da literatura⁽¹⁶⁾ calculados pelas técnicas de Fourier e por DSC.

Tabela 2. Calor latente calculado neste trabalho pela técnica de ATN e pela literatura⁽¹⁶⁾ por ATN e ATF utilizando calor específico médio de 1,2 J/g.K e DSC.

Liga	Calor Latente, J/g			
	Neste trabalho	Literatura ⁽¹⁶⁾		
Al-7%Si	Newtoniana linear	Newtoniana linear	Fourier	DSC
	439	387	435	432,2

A figura 5 mostra em A) o comportamento da evolução da fs em função do tempo e em B) o comportamento da evolução da fs em função da temperatura, na região da solidificação, calculada de acordo com a metodologia adotada na literatura⁽¹⁵⁾.

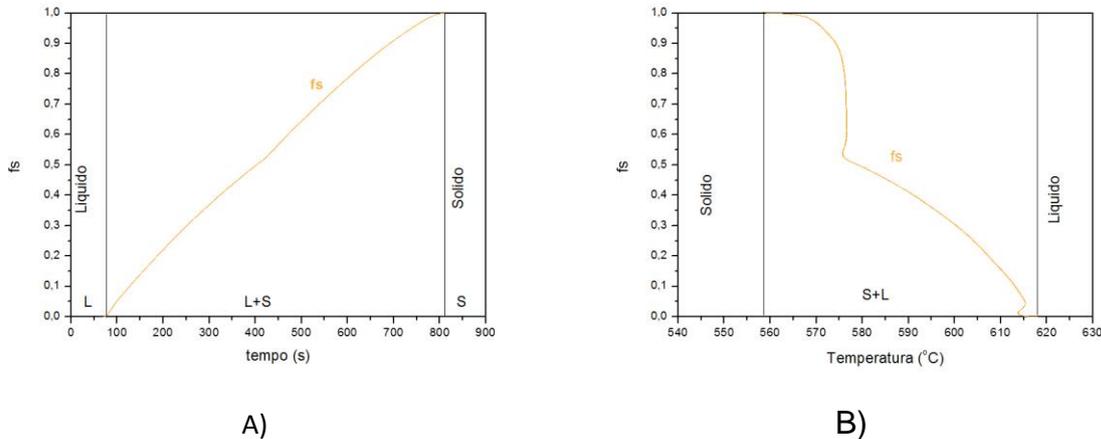


Figura 5. Em A) evolução da fs em função do tempo em B) evolução da fs em função da temperatura, ambas na região da solidificação, calculada de acordo com a metodologia adotada.

A figura 6 apresenta as curvas experimentais em vermelho e preto e todas as curvas obtidas pela técnica de análise da curva de resfriamento com auxílio do computador através da análise térmica Newtoniana, usadas para determinar as temperaturas limites entre os 5 mecanismos de alimentação de Campbell associadas a fração sólida na solidificação da liga Al-6,94%Si.

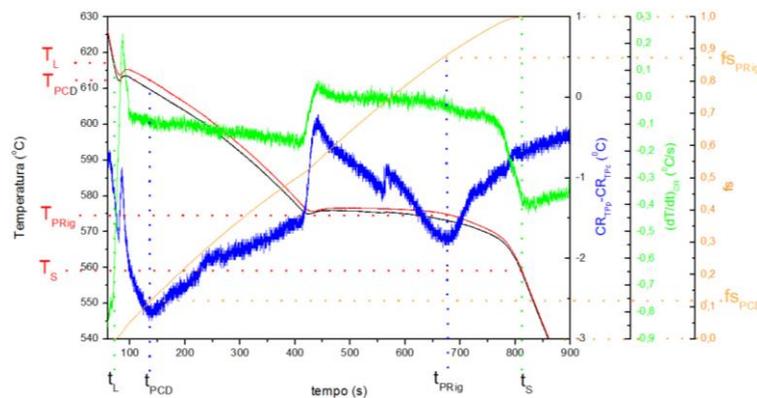


Figura 6. Curvas de resfriamento experimental e todas as curvas obtidas pela técnica de análise da curva de resfriamento com auxílio do computador através da análise térmica newtoniana, usadas para determinar as temperaturas limites entre os 5 mecanismos de alimentação de Campbell na solidificação da liga Al-6,94%Si.

Os valores numéricos dos pontos característicos destacados estão na tabela 3.

Tabela 3. Tempos e temperaturas características da solidificação associadas a fração sólida determinadas neste trabalho.

	Valores experimentais			
	Liquidus	PCD	PRig	Solidus
T (°C)	618	612	575	559
t (s)	71	136	676	813
fs	0	0,12	0,88	1

CONCLUSÕES

A técnica de análise da curva de resfriamento auxiliada por computador, junto com o método de Análise Térmica Newtoniana, foi usada para determinar o calor latente e a evolução da fração sólida como função do tempo e da temperatura e correlaciona-la com as temperaturas limites dos cinco mecanismos de alimentação na solidificação de uma liga Al-6,94%. Comparando o valor do calor latente determinado neste trabalho com os valores da literatura verifica-se que estão bastante próximos e, portanto, validando o método utilizado.

A os dados referentes a fs obtida com a técnica de análise da curva de resfriamento auxiliada por computador podem melhorar a precisão dos modelos de solidificação baseados nas leis de nucleação e crescimento.

A técnica dos dois termopares se mostrou eficiente na determinação do Ponto de Coerência Dendrítica e do Ponto de Rigidez.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPERGS, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul, pelo apoio financeiro, Processo nº 131908-9, e a Fundação Alumiza pela doação da liga Al-Si.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. STEFANESCU, D.M. Casting, Metals Hand-book, v.15, ASM International, Material Park, Hoio,1992.

2. DJURDJEVIC; M. B.; ODANOVIC, Z.; PAVLOVIC-KRSTIC; J. Melt quality control at aluminum casting plants. Association of Metallurgical Engineers of Serbia AMES, v. 16, n. 1, p. 63-76, 2010.
3. FLEMINGS, M. Solidification processing. Metallurgical Transactions, v.5, p. 2121-2134, 1974.
4. CAMPBELL, J. Castings, Butterworth-Heinemann, Oxford, Great Britain, 2003.
5. CAMPBELL, J. Castings practice, the 10 rules of castings, Butterworth-Heinemann, England, UK, 2004.
6. DJURDJEVIC, M. B.; HUBER, G.; ODANOVIC, Z. Synergy between thermal analysis and simulation. J Therm Anal Calorim, n. 111, p. 1365–1373, 2013.
7. FERREIRA, C. R. F.; BARCELOS, V. K. DE; SANTOS, C. A.; SPIM, J. A. Experimental Thermal Analysis in High Speed Mold of Different Steel Casting Billets. IN: CSSCR2013, 2013, Helsinki e Estocolmo. Anais do The 3rd International Symposium on Cutting Edge of Computer Simulation of Solidification, Casting and Refining, v. 1. p. 105-105. 2013.
8. BARCELOS, V. K. DE; FERREIRA, C. R. F.; LOUHENKILPI, S.; SPIM, J. A. InALC++ Simulation Software for Continuous Casting of Steel Billets. IN: CSSCR2013, 2013, Helsinki e Estocolmo. Anais do The 3rd International Symposium on Cutting Edge of Computer Simulation of Solidification, Casting and Refining, v. 1. p. 73-73. 2013.
9. FLEMINGS, M.C. Solidification processing, McGraw-Hill, Inc. 1972.
10. UPADHYA, K.G.; STEFANESCU, D.M.; LIEU, K.; YEAGER, D.P. Computer-aided cooling curve analysis: principles and applications in metal casting, AFS Transactions, v. 97, p. 61-66, 1989.
11. BARLOW, J. O.; STEFANESCU, D. M. Computer-aided cooling curve analysis revisited, AFS Transactions, v.105, p.349-354, 1997.
12. STEFANESCU, D. M. Thermal analysis-theory and applications in metalcasting. International Journal of Metalcasting, v. 9, n.1, p. 6-22, 2015.
13. FRAS, E.; KAPTURKIEWICZ, W.; BURBIELKO, A.; LOPEZ, H. F. A new concept in thermal analysis of castings, AFS Transactions, v. 101, p. 505-511, 1993.
14. DJURDJEVIC, M. B. Present and future application of the thermal analysis in aluminum casting industry. Disponível em: <https://www.researchgate.net/>

[profile/Mile_Djurdjevic/publication/285166532_Review_of_thermal_analysis_applications_in_aluminium_casting_plants/links/566814d008aea62726f059b7?origin=publication_list](https://www.researchgate.net/profile/Mile-Djurdjevic/publication/285166532_Review_of_thermal_analysis_applications_in_aluminium_casting_plants/links/566814d008aea62726f059b7?origin=publication_list). Acesso em 28 de setembro de 2016.

15. ARNBERG, L.; BACKERUD, L.; CHAI, G. Solidification characteristics of aluminum alloys, Volume 3: Dendrite Coherency. American Foundrymen's Society, Inc., Des Plaines, IL, U.S., 1996.
16. EMADI, D.; WHITING, L.; DJURDJEVIC, M.; KIERKUS, W.T.; SOKOLOWSKI, J. Comparison of newtonian and fourier thermal analysis techniques for calculation of latent heat and solid fraction of aluminum alloys. Metalurgija, v. 10, n. 2, p. 91–106, 2004.

COMPUTER AIDED COOLING CURVE ANALYSIS APPLIED TO DEFINING THE FEEDING LIMITS OF SOLIDIFICATION ON HYPOEUTECTIC AL-SI ALLOY

ABSTRACT

The manufacturing process by casting allows obtaining more cost-effective metal shapes than any other process. The knowledge of the mechanisms involved in the solidification of metals and alloys enables the development of a computer program able to simulate obtaining metallic shapes with desirable characteristics. Several thermal analysis techniques are widely used to study the solidification and controlling the casting process. The computer aided cooling curve analysis (CA-CCA) technique used with the two thermocouples method provides more information about the development of the structure during solidification than any other technique described in the literature. In this work, the temperature solidification characteristics that limit the feeding regions of hypoeutectic aluminum-silicon alloys were determined. The results obtained can be applied in simulation software, in order to improve the accuracy of the simulation.

Key-words: alloy Al-Si; Solidification; Thermal analysis; Cooling curve.