

CORRELAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE PROCESSO DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO COM AS CARACTERÍSTICAS MACROESTRUTURAIS DA SOLIDIFICAÇÃO DE AÇOS ESPECIAIS ¹

Viviane Gschwenter²
Bruno Vaz de Souza³
Wilson Fogazzi⁴
Vinicius Karlinski de Barcellos⁵
Carlos Raimundo Frick Ferreira⁶
Jaime Alvares Spim⁷

Resumo

As características macro e microestruturais resultantes da solidificação são influenciadas pelo histórico térmico do sistema metal/molde no lingotamento contínuo (LC). O objetivo do trabalho foi analisar a evolução térmica do sistema baseado no espaçamento dendrítico secundário (EDS) demonstrando como a transformação líquido-sólido é afetada por variáveis como: composição química, potencial ferrítico; velocidade de lingotamento, configuração da máquina de LC. Foram observadas características da microestrutura como o espaçamento dendrítico secundário nas diferentes regiões dos lingotes, utilizando-se técnicas de metalografia. Foi usado um sistema de análise de imagens para analisar a estrutura de solidificação e medir o EDS. A aquisição das amostras ocorreu em planta de LC de aços onde foram retirados blocos de tarugos de seção quadrada obtendo-se amostras adequadas para a análise dos diferentes aços. A evolução térmica dos aços monitorados no sistema físico foi correlacionada com os resultados obtidos utilizando um programa de simulação da solidificação. Foram obtidos os espaçamentos dendríticos secundários e desenvolvidas equações empíricas que forneceram as taxas de resfriamento ao longo da seção obtendo valores coerentes com os resultados obtidos na simulação numérica.

Palavras-chave: Lingotamento contínuo; Microscopia; Estrutura bruta de solidificação.

CORRELATION BETWEEN CONTINUOUS CASTING PROCESS CONDITIONS WITH THE MACROSTRUCTURAL CHARACTERISTICS RESULTING FROM THE STEEL SOLIDIFICATION

Abstract

The macro and microstructural characteristics from the solidification are influenced by the thermal history of the system metal / mold in continuous casting (CC). The objective of the study is to analyze the thermal evolution of the system based on the secondary dendritic arm spacing (SDAS) demonstrating how the liquid-solid transformation is affected by variables such as: chemical composition, ferritic potential; casting speed, configuration of the machine of CC. Samples were cut at different positions of the metal/mold interface, whereas the selected sections were polished and etched with a reagent for the metallographic examination. The image processing system was used to analyze as-cast structure, in addition to SDAS, for every selected position. The thermal evolution of steels was evaluated and correlated with the results obtained using a simulation program of the solidification. The SDAS were obtained which were associated with empirical equations providing the cooling rates along the section getting values consistent with the results obtained by numerical simulation. The use of these tools is useful for understanding and controlling the solidification in continuous casting of steels.

Key words: Continuous casting; Microscopy; As-cast structure.

¹ Contribuição técnica ao XXXIX Seminário de Aciaria – Internacional, 12 a 16 de maio de 2008, Curitiba, PR, Brasil

² Engenheira Civil – Mestranda LAFUN / PPGEM / UFRGS – vivigschwenter@hotmail.com

³ Estudante de Engenharia Metalúrgica LAFUN / UFRGS - azous_81@hotmail.com

⁴ MSc Engenheiro Metalúrgico - Doutorando LAFUN / UFRGS – wilsonfogazzi@hotmail.com

⁵ MSc Engenheiro Metalúrgico - Doutorando LAFUN / PPGEM / UFRGS - vinicius.karlinski@ufrgs.br

⁶ MSc. Pesquisador LAFUN / UFRGS - frick@ufrgs.br

⁷ Prof. Dr. Adjunto LAFUN / PPGEM / UFRGS - spim@ct.ufrgs.br

INTRODUÇÃO

A estrutura decorrente da solidificação dos metais e suas ligas determina as propriedades e características do produto, seja este uma peça de fundição próxima a forma final ou tarugos, lingotes e placas, que passarão por etapas de tratamentos termomecânicos subsequentes. Esta mesma estrutura formada pode ser considerada, de uma maneira geral, um registro da evolução térmica que ocorreu durante a solidificação. Em condições industriais de fundição e lingotamento contínuo, a transformação líquido/sólido ocorre na forma dendrítica e a distância entre os braços formados, ou espaçamentos dendríticos, está diretamente relacionada com a condição de solidificação imposta pelo sistema. Mais precisamente, os parâmetros térmicos como taxa de resfriamento (\dot{T}) [K/s] e tempo local de solidificação (t_{sl}) [s], podem ser relacionados diretamente com o espaçamento dendrítico secundário (EDS ou λ_2). A literatura apresenta equações experimentais do tipo:⁽¹⁻³⁾

$$\lambda_2 = K(t_{sl})^a \dots\dots\dots [1]$$

$$\lambda_2 = KT^{-a} \dots\dots\dots [2]$$

sendo K e λ funções do sistema da liga.

Caram e Garcia⁽³⁾ relatam a possibilidade da determinação do coeficiente de transferência de calor metal/molde (h_i) [W/m²/K] através de medidas do λ_2 a partir da superfície do lingote/tarugo e correlação destas medidas com modelos de crescimento dendrítico teóricos ou experimentais (equações 1 e 2) e a determinação de t_{sl} e h_i em função do tempo. Cabrera et al.⁽²⁾ utiliza um modelo de transferência de calor, que prevê a evolução térmica durante a solidificação do aço no processo de LC. O modelo utilizado determina parâmetros como velocidade de solidificação (V) [cm/s], gradiente na região pastosa (G) [K/mm] e tempo de solidificação local (t_f) [s] em cada ponto do tarugo. Assim, pode-se verificar a dependência da variação dos espaçamentos dendríticos utilizando equações que levam em conta também a composição química, como por exemplo:

$$\lambda_1 = V^{-1/4} G^{-1/2} [1990(\%C)+380(\%Si)-0,221(\%Mn)-9840(\%Al)+20(\%Ni)-40(\%Cr)] \dots\dots [3]$$

$$\lambda_2 = t_f^{1/3} [70(\%C)+50(\%Si)-0,178(\%Mn)-430(\%Al)+0,755(\%Ni)-3,42(\%Cr)] \dots\dots\dots [4]$$

Tais equações indicam que C, Si e Ni tendem a aumentar o valor de λ_1 e λ_2 , enquanto Al, Mn e Cr afetam de maneira contrária o valor da distância entre os espaçamentos dendríticos. A Figura 1 mostra um gráfico comparando resultados experimentais e previstos pelo modelo numérico.⁽²⁾

- 0.64C-27Mn ● 0.63C-10Mn-15Ni
- ▲ 0.68C-1.1Si-28Cr ▼ 0.6C-1.1Mn
- ◆ 1.5C-1.1Mn + 0.18C-1.4Mn-0.35Si
- × 0.62C-0.58Mn-0.1Si * 0.52C-0.56Mn-0.1Si

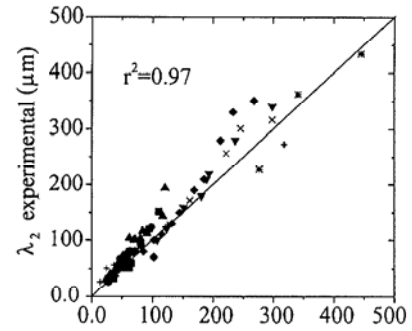


Figura 1. Relação do EDS experimental com o previsto pelo modelo desenvolvido por Cabrera et al. ⁽²⁾

Além da previsão via modelagem matemática, o autor demonstra experimentalmente a influência das variáveis operacionais na evolução dos espaçamentos dendríticos, como velocidade de lingotamento [m/min] e superaquecimento (ΔT) [$^{\circ}C$], como podem ser observados nos gráficos a seguir:

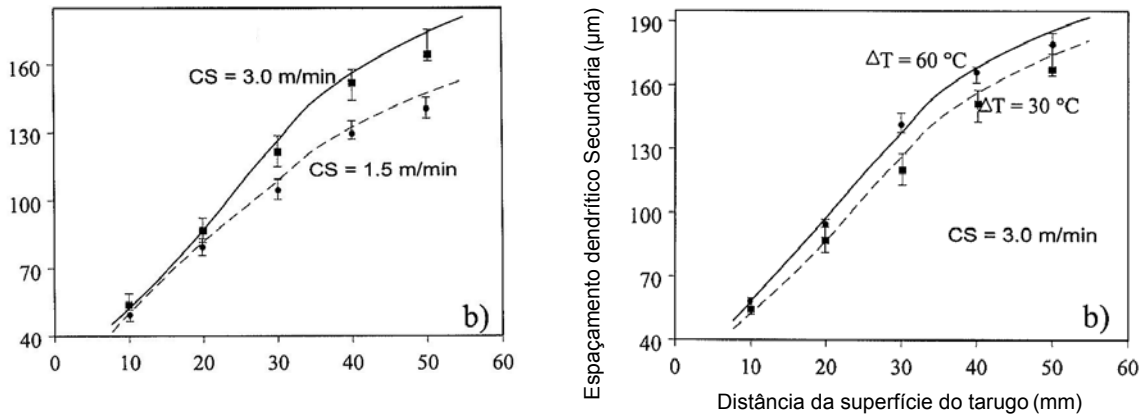


Figura 2. Variação do EDS com as condições operacionais de LC. ⁽²⁾

Cicutti, Bilmes e Boeri⁽⁵⁾ demonstram algumas expressões que descrevem a variação do espaçamento dendrítico primário através da seção transversal de aços lingotados continuamente, em função da taxa de crescimento destas estruturas na interface de solidificação. Todas as expressões apresentadas são do tipo:

$$\lambda_1 = C.G^{-m}.V^{-n} \quad [5]$$

onde λ_1 é o espaçamento dendrítico primário, C, m e n são constantes que dependem, entre outros fatores, do intervalo de solidificação e do coeficiente de partição do soluto k_0 , G é o gradiente da interface sólido/líquido e V é a velocidade de solidificação ou taxa de crescimento destas estruturas na interface de solidificação. O modelo proposto pelo autor prevê a variação do espaçamento dendrítico primário em função da distância da interface metal/molde no lingotamento contínuo, e envolve a variação da espessura da camada solidificada, a taxa de crescimento na frente de solidificação e o gradiente na interface sólido-líquido. A Figura 3 mostra a variação do espaçamento dendrítico primário para diferentes produtos lingotados, e compara com três modelos de literatura. A tabela 1 mostra as condições operacionais e os tipos de produtos lingotados.

Tabela 1. Condições operacionais de diferentes tipos de produtos lingotados.⁽⁵⁾

Caso	Produto	Dimensões (mm)	Composição Química		Velocidade de lingotamento (m/min)
			%C	%Mn	
M1	Tarugo redondo	170 (diâmetro)	0,27	1,29	2,0
M2	Tarugo redondo	205 (diâmetro)	0,15	0,60	1,60
M3	Tarugo redondo	290 (diâmetro)	0,32	1,31	0,70
M4	Placa	165 (espessura)	0,18	1,05	1,1
M5	Placa	250 (espessura)	0,15	1,40	0,6
M6	Seção quadrada	115 (lado)	0,62	-	2,0
M7	Placa	200(espessura)	0,10	1,50	1,0

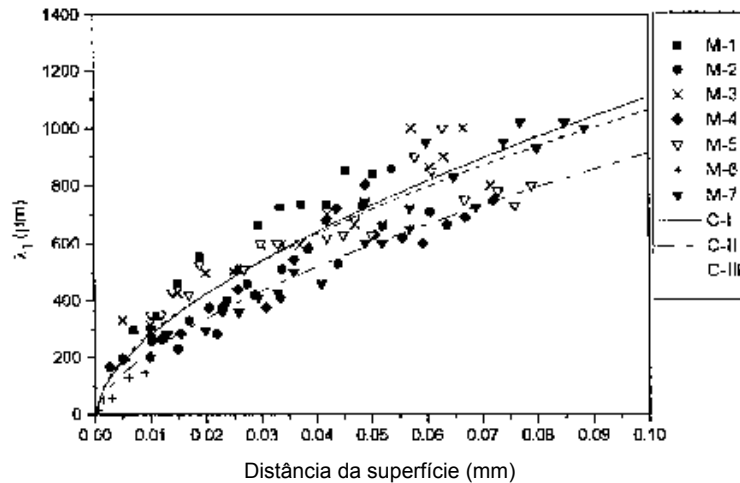


Figura 3. Medidas experimentais do espaçamento dendrítico primário, em relação à superfície, e comparação com os seguintes modelos propostos: C-I: $\lambda_1 = 4413 X^{0,60}$; C-II: $\lambda_1 = 3809 X^{0,62}$ e C-III: $\lambda_1 = 3955 X^{0,57}$ ⁽⁵⁾

Em um trabalho posterior, Cicutti e Boeri⁽⁶⁾ utilizam um modelo que prevê a relação entre o espaçamento dendrítico primário λ_1 e secundário λ_2 em placas, com dados experimentais de literatura. Seu modelo encontra a relação λ_1/λ_2 valendo aproximadamente 2,6 para aços baixo carbono. A Tabela 2 mostra as condições de lingotamento para 7 casos escolhidos em literatura, e a Figura 4 compara os resultados experimentais com o modelo proposto. O autor demonstra uma ótima concordância entre o modelo e os dados experimentais de literatura.

Tabela 2. Condições de lingotamento contínuo de placas.⁽⁶⁾

Corrida	Espessura da placa (m)	Composição química		Velocidade de lingotamento (m/min)
		%C	%Mn	
M1	0,250	0,15	1,40	0,6
M2	0,165	0,18	1,05	1,1
M3	0,200	0,10	1,50	1,0
M4	0,250	0,13	0,85	0,55
M5	0,210	0,18	1,43	-
M6	0,200	0,09	1,38	-
M7	0,200	0,14	1,50	-

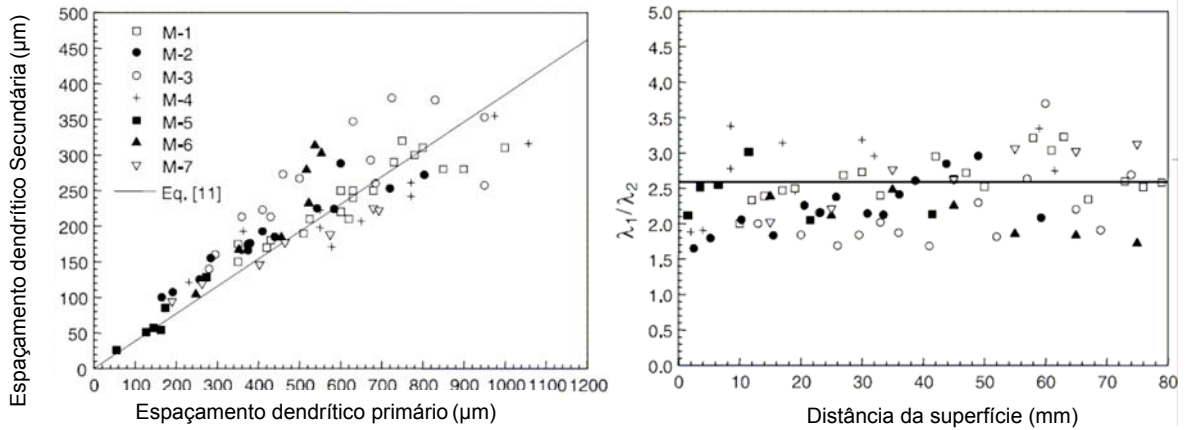


Figura 4. a) Relação λ_1/λ_2 experimental e proposta pelo autor e b) comportamento da relação λ_1/λ_2 em relação à superfície das placas.⁽⁶⁾

Devido a escassez de modelos e resultados experimentais sobre o comportamento térmico e sua relação com a estrutura bruta de solidificação resultante do lingotamento contínuo (LC) de aços, este trabalho tem como objetivo a determinação experimental de fatores microestruturais e a sua relação com parâmetros térmicos envolvidos no LC de aços especiais.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para as análises foram selecionados 2 blocos de lingotes de aço, com composições químicas diferentes, de acordo com a Tabela 3. O efeito dos elementos de liga pode ser expresso em termos de carbono equivalente (C_{eq}), conforme equação proposta por Wolf:⁽⁷⁾

$$C_{eq} = [\%C] + 0,02.[\%Mn] + 0,04.[\%Ni] - 0,1.[\%Si] - 0,04.[\%Cr] - 0,1.[\%Mo] \quad [6]$$

Tabela 3. Identificação das amostras com as respectivas composições químicas.

Amostra	C	Cr	Mn	Mo	Ni	Si	Ceq
01	0,38	0,13	1,54	0,04	0,12	0,15	0,39
02	0,21	0,47	0,77	0,16	0,45	0,23	0,19

Os blocos, Figura 5, passaram por um processo de corte e retífica, como indicado na Figura 6, para adequar o tamanho e a superfície das amostras a serem analisadas. A seção de 5 mm foi reservada para corte e análise macrográfica, e as seções de 10 mm foram objeto de estudo morfológico da estrutura dendrítica.



Figura 5. Fotografia de um dos blocos

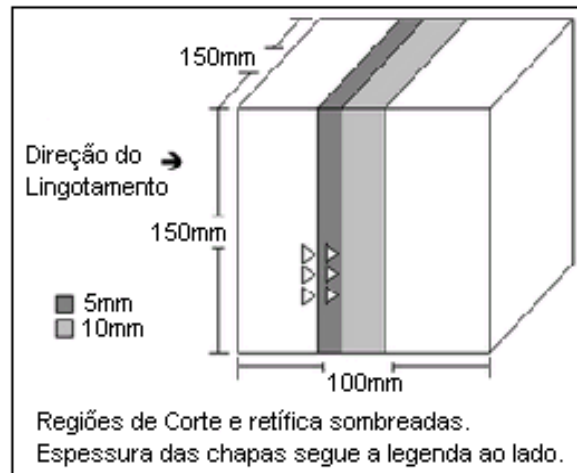


Figura 6. Esquema de corte e Retífica.

Após a retirada das amostras de 10 mm, foi realizado um corte para obtenção de uma amostra como indicado na Figura 7, com o objetivo de avaliar a mudança da morfologia da estrutura dendrítica, com foco nos espaçamentos dendríticos secundários em cerca de 7 regiões, desde a interface metal-molde até o centro do lingote.

A preparação das amostras de cada aço seguiu os procedimentos padrão de metalografia : lixamento, polimento e ataque químico.

O Ataque químico Macrográfico foi realizado por imersão no reagente Oberhoffer (30 g FeCl_3 , 1 g CuCl_2 , 0.5 g SnCl_3 , 50 ml HCl , 500 ml Álcool etílico, 500 ml Água destilada).

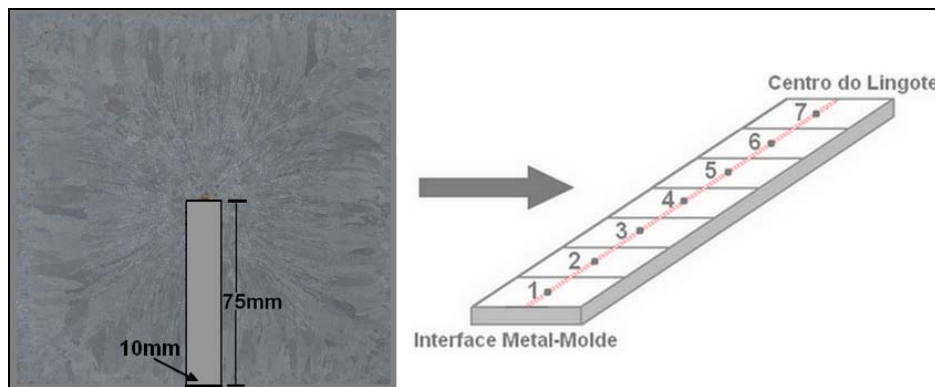


Figura 7. Ilustração da retirada de amostra e regiões de análise da estrutura dendrítica.

A Aquisição das imagens se deu em lupa com 60x de ampliação com o auxílio de uma Câmera CCD. A calibração espacial das imagens e posterior medição dos espaçamentos dendríticos secundários foi realizada pelo software IMAGE TOOLS.

As medidas de EDS (λ_2) foram realizadas nos corpos de prova nas regiões indicadas na Figura 7, da superfície ao centro da seção transversal do tarugo. O respectivo método se baseia em calcular o valor de EDS pela média das distâncias entre os braços adjacentes (ramificações secundárias) formados perpendicularmente à direção de crescimento de uma ramificação primária, como mostrado na Figura 8, onde n é o número de braços secundários e L o comprimento da reta.

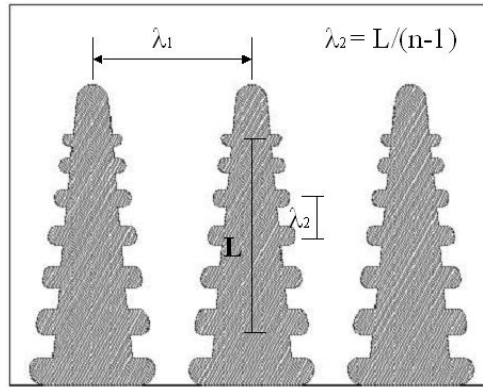


Figura 8. Esquema representativo da técnica utilizada para quantificar os espaçamentos dendríticos secundários.

Com os dados obtidos experimentalmente para o λ_2 e com dados referentes às taxas de resfriamento encontradas em cada região analisada, calculadas através dos dados fornecidos pela simulação numérica realizada com o software InalC+,⁽⁸⁾ foi possível estabelecer uma relação entre distância, desde a interface metal-molde até o centro do lingote, a taxa de resfriamento e os resultados encontrados para λ_2 .

De posse desses dados foi possível encontrar uma relação de λ_2 em função da distância da interface metal-molde, que plotados fornecem uma relação de onde pode se obter uma equação que correlaciona as duas variáveis de interesse.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 9 apresenta a macrografia e micrografias da amostra do aço 02, sendo possível observar a direcionalidade das estruturas resultantes.

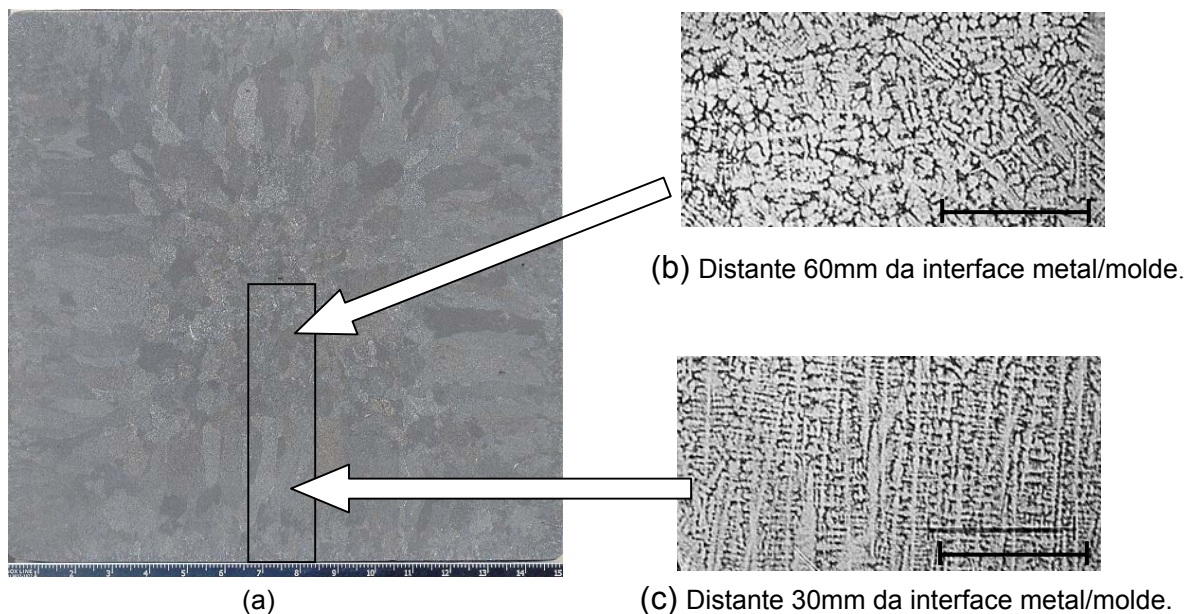


Figura 9. Aço 02 a) Macrografia da seção transversal b,c) Micrografia do cortes longitudinais apresentando a variação dos espaçamentos e das estruturas dendríticas. (b) Distante 60 mm da interface metal/molde.; (c) Distante 30 mm da interface metal/molde.

Foram determinados os valores médios dos espaçamentos dendríticos secundários, máximo e mínimo para cada posição de cada aço analisado conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. EDS experimentais das amostras dos aços analisados.

EDS experimentais - Aço 01					EDS experimentais - Aço 02				
Posição	λ (μm)			Desvio P.		λ (μm)			Desvio P.
	$\lambda_{\text{min.}}$	$\lambda_{\text{max.}}$	$\lambda_{\text{méd.}}$			$\lambda_{\text{min.}}$	$\lambda_{\text{max.}}$	$\lambda_{\text{méd.}}$	
01	67	170	116	± 34	01	125	170	148	± 32
02	125	245	155	± 28	02	155	210	177	± 16
03	100	270	171	± 50	03	150	253	201	± 27
04	170	290	213	± 33	04	153	308	214	± 50
05	153	230	201	± 24	05	190	272	232	± 29
06	187	267	242	± 29	06	163	310	245	± 60
07	195	373	261	± 44	07	205	295	246	± 34

As Figuras 10(a) e 11(a) apresentam as medidas experimentais do espaçamento dendrítico secundário para as duas ligas em estudo em função da distância da superfície. As medidas dos espaçamentos dendríticos secundários foram realizadas em amostras ao longo da seção longitudinal, sendo realizadas na média 20 medidas em cada região (posição no lingote).

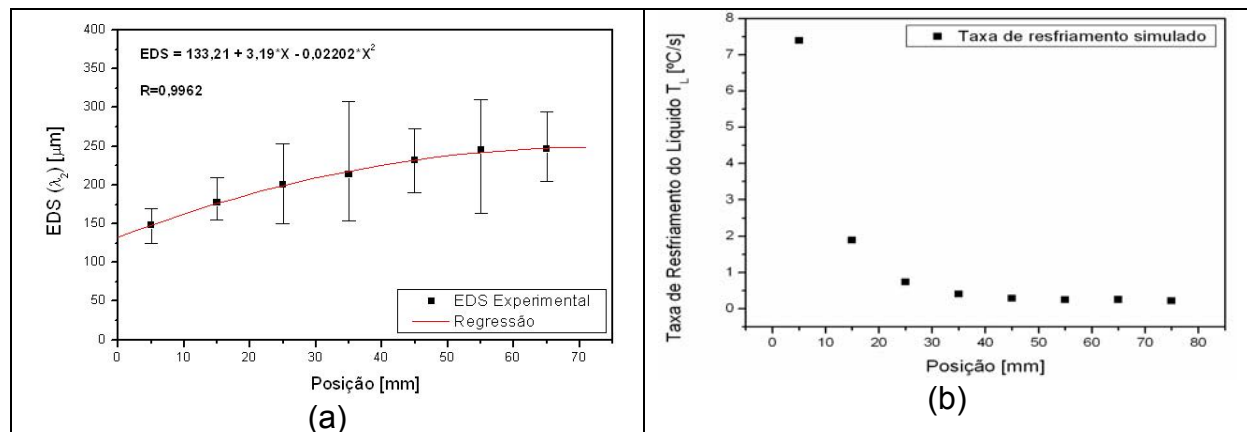


Figura 10. Aço 02. a) Espaçamentos dendríticos secundários em função da distância da interface metal/molde. b) Taxa de resfriamento do líquido simulado.

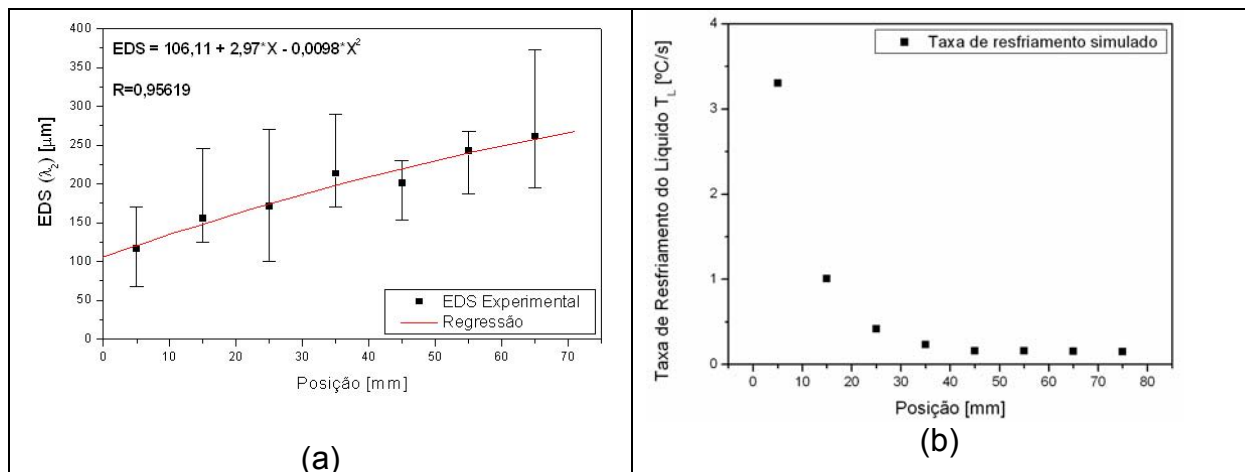


Figura 11. Aço 01 a) Espaçamento dendrítico secundário experimental. b) Taxa de resfriamento do líquido simulado.

Para a simulação da solidificação foi utilizado um modelo numérico, baseado em diferenças finitas.⁽⁹⁾ Este modelo considera que a solidificação é governada principalmente por condução térmica, e permite obter os perfis térmicos, as frações de sólido e as posição das isothermas *solidus* e *liquidus*. Utilizando o programa numérico, determinou-se as taxas de resfriamento da temperatura *liquidus* para diferentes posições das amostras analisadas como mostra os resultados apresentados na Tabela 5 e nas Figuras 10(b) e 11(b).

Tabela 5. Taxas de resfriamento da T_L dos aços analisados.

Região	\dot{T} (°C/s)		
	Distância [mm]	Aço 02	Aço 01
01	5	7,39	3,30
02	15	1,89	1,01
03	25	0,73	0,41
04	35	0,40	0,23
05	45	0,29	0,16
06	55	0,25	0,16
07	65	0,25	0,15

Os gráficos da Figura 12 mostram as correlações entre os EDS experimentais e as taxas de resfriamento simuladas. Em todos os casos analisados observa-se a redução do EDS com o aumento da taxa de resfriamento. Com o objetivo de quantificar este comportamento apresentado, foram realizadas interpolações entre estes valores obtendo como resultados expressões empíricas do tipo $\lambda_2 = A \cdot \dot{T}^{-B}$.

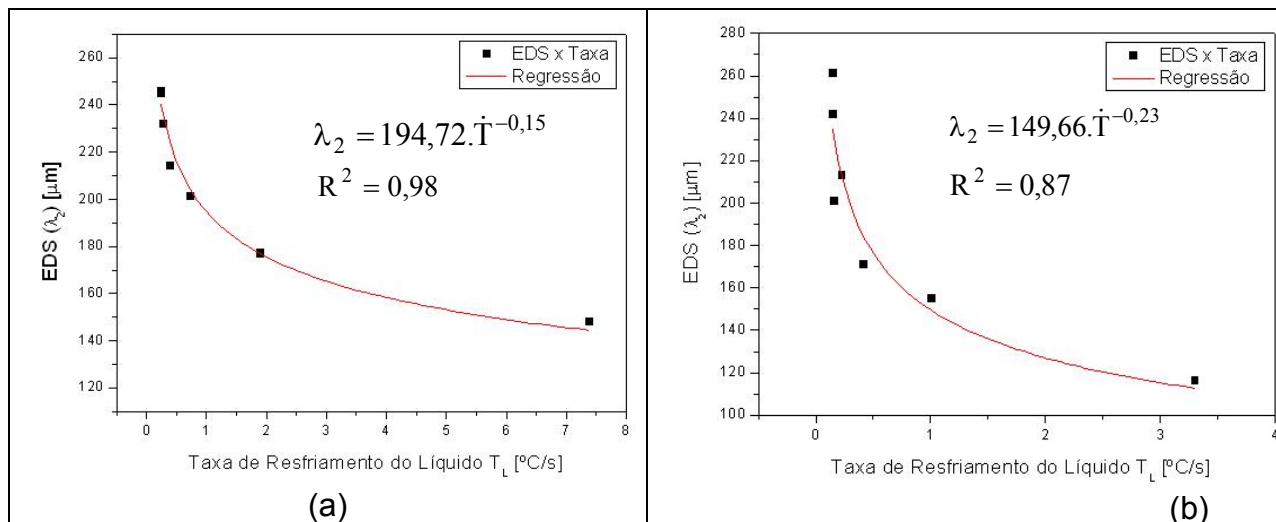


Figura 12. Variação do espaçamento dendrítico secundário com taxa de resfriamento do líquido. a) Aço 02. b) Aço 01.

CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, o método de comparação numérico/experimental permitiu a obtenção de equações empíricas que correlacionam espaçamentos dendríticos secundários em função das taxas de resfriamento do líquido aplicado para os aços analisados, conduzindo ao seguinte resultado:

Aço 01 - $\lambda_2 = 149,66 \cdot \dot{T}_L^{-0,23}$

Aço 02 - $\lambda_2 = 194,72 \cdot \dot{T}_L^{-0,15}$

Alguns modelos teóricos de crescimento dendrítico secundário são apresentados na literatura. Pode-se destacar o Guide to the solidification of steels (citado por Garcia, 2001, p.231) que apresenta a equação $\lambda_2 = 146 \cdot \dot{T}_L^{-0,39}$ para Fe-C (0,14 a 0,88%C). A comparação das equações obtidas como resultado deste trabalho com a equação citada por Garcia⁽¹⁾ mostrou uma maior aproximação com a equação obtida para o Aço 01.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao suporte financeiro provido da CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e a GERDAU Aços Especiais Piratini (AEP) pela parceria estabelecida para estudos sobre o processo de solidificação via lingotamento contínuo.

REFERÊNCIAS

- 1 GARCIA, A. Solidificação: Fundamentos e Aplicações. Campinas (SP): Editora da Unicamp, 2001. p. 222-242.
- 2 SUZUKI, A.; NAGAOKA, Y. Dendrite morphology and arm spacing of steels. J. Japan Inst. Metals, v. 33, n. 6, p. 658-663. 1969.

- 3 CARAM, R., GARCIA, A. The use of dendritic microstructure growth to evaluate the metal-mold heat transfer coefficient in the foundry process. IMechE Conference Transactions, The Institution of Mechanical Engineers, London, v. 2, p. 555-559. 1995.
- 4 CABRERA-MARRERO, J. M.; CARRENO-GALINDO, V.; MORALES, R. D.; CHAVEZ-ALCALA, F. Macro-micro modeling of the dendritic microstructure of steel billets processed by continuous casting. ISIJ International, v.38, n. 8, p. 912-821, march. 1998.
- 5 CICUTTI, C.; BILMES, P.; BOERI, R. Estimation of primary dendrite arm spacings in continuous casting products. Scripta Materialia, v. 37, p. 599 – 604. 1997.
- 6 CICUTTI, C.; BOERI, R. On the relationship between primary and secondary dendrite arm spacing in continuous casting products. Scripta Materialia, v. 45, p. 1455 – 1460. 2001.
- 7 WOLF, M. M. Inicial solidification and strand surface quality of peritectic steels. Continuous Casting V. 9: Iron & Steel Society, 1997. p. 59 -68.
- 8 BARCELLOS, V. K.; FERNANDES, P. C.; FOGAZZI, W.; KLUJSZO, COLEMBERGUE, L. A.; FERREIRA, C. R. F.; COCIAN, L. F. E.; SANTOS, C. A.; SPIM, J. A. Aferição do software InALC+ com dados experimentais de lingotamento contínuo (LC) da Aços Especiais Piratini (AEP - Gerdau). Anais do 37º Seminário de Aciaria - Internacional, p. 338-346 2006. 2006.
- 9 BARCELLOS, V. K.; L. A.; FERREIRA, C. R. F.; SANTOS, C. A.; SPIM, J. A. Influência dos parâmetros operacionais nas condições de transferência de calor ao longo de um molde industrial de lingotamento contínuo. Anais do 62º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia, p. 1266-1277. 2007.