

## AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO EFEITO DA TEMPERATURA SOBRE OS ESPAÇAMENTOS DENDRÍTICOS SECUNDÁRIOS DE UMA PLACA PRODUZIDA VIA LINGOTAMENTO CONTÍNUO\*

Fernando Paulucio Quinelato<sup>1</sup>  
Alexandre Furtado Ferreira<sup>2</sup>

### Resumo

A solidificação tem papel fundamental nas propriedades finais do material, uma vez que parâmetros como temperatura, composição química e cinética influenciam diretamente na micro e macroestrutura resultante. A solidificação dos aços no lingotamento contínuo ocorre através do crescimento dendrítico em direção ao núcleo da placa. A velocidade de crescimento interfere diretamente sobre a formação da micro e macroestrutura, bem como na formação das dendritas. Tais efeitos influenciam o perfil de microsegregação e macrosegregação finais. O objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento dos espaçamentos dendríticos secundários em função da temperatura de lingotamento e da macroestrutura resultante, além de calcular, através do uso de equações empíricas, a taxa de resfriamento local. Os resultados mostraram que para menores superaquecimentos os espaçamentos dendríticos secundários apresentam-se menores. Foi verificada uma elevada correlação entre espaçamento dendrítico secundário e posição ao longo da espessura da placa para o intervalo de superaquecimento de 22°C e 34°C. Com a utilização de uma equação empírica, foram obtidas curvas que mostram o comportamento da taxa de resfriamento local em função dos espaçamentos dendríticos secundários. Os resultados obtidos são importantes para subsidiar estudos futuros e propostas de otimização de processo relacionadas a micro e macrosegregação em placas de aço.

**Palavras-chave:** Solidificação; Lingotamento Contínuo; Espaçamento Dendrítico Secundário.

### EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE TEMPERATURE EFFECT ON THE SECONDARY DENDRITIC SPACING IN A SLAB PRODUCED BY CONTINUOUS CASTING

#### Abstract

The solidification has a fundamental role in the final properties of the material, since parameters such as temperature, chemical composition and kinetics directly influence the final micro and macrostructure. Solidification of steels in continuous casting occurs through dendritic growth toward the slab core. The growth rate directly interferes with the formation of the micro and macrostructure, as well as the formation of the dendrites. Such effects will influence the final microsegregation and macrosegregation profile. The objective of this work is to evaluate the behavior of the secondary dendritic spacings as a function of the casting temperature and the macrostructure as well to calculate the local cooling rate using an empirical equation. The results showed that for minor superheating the secondary dendritic spacings are smaller. A high correlation between secondary dendritic spacing and position along slab thickness was observed for the superheat range of 22C° to 34°C. It was possible to construct curves, using an empirical equation, which show the behavior of the local cooling rate as a function of the secondary dendritic spacings. The obtained results are important to support future studies and process optimization proposals related to micro and macrosegregation in steel slabs.

**Keywords:** Solidification; Continuous Casting; Secondary Dendritic Spacing.

<sup>1</sup> *Bacharel em Engenharia Metalúrgica, Especialista em Engenharia, Processo de Solidificação e Produto, CSN, Volta Redonda, Rio de Janeiro, Brasil.*

<sup>2</sup> *Professor, D. Sc, Depto de Engenharia Metalúrgica, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda - RJ, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

A solidificação ocorre com o crescimento da interface sólido/líquido (S/L). O tipo de interface depende fortemente do valor do super-resfriamento constitucional, que é um efeito da redução da temperatura *liquidus* provocada pelo enriquecimento de soluto na frente de solidificação, resultado da rejeição de soluto. Quanto maior for este parâmetro, maior a tendência a formação de estruturas dendríticas [1].

Uma estrutura dendrítica totalmente desenvolvida possui três níveis de ramificações: a braço primário, correspondente a espinha dorsal da estrutura; os braços secundários, que são ortogonais ao primário e os braços terciários que são paralelos aos primários [2].

As distâncias entre as ramificações são definidas como espaçamentos dendríticos, que são muito utilizados para caracterizar quantitativamente a microestrutura formada, conforme apresentado na Figura 1, onde  $\lambda_1$  é a distância entre os braços primários,  $\lambda_2$  entre os secundários e  $\lambda_3$  entre os terciários.

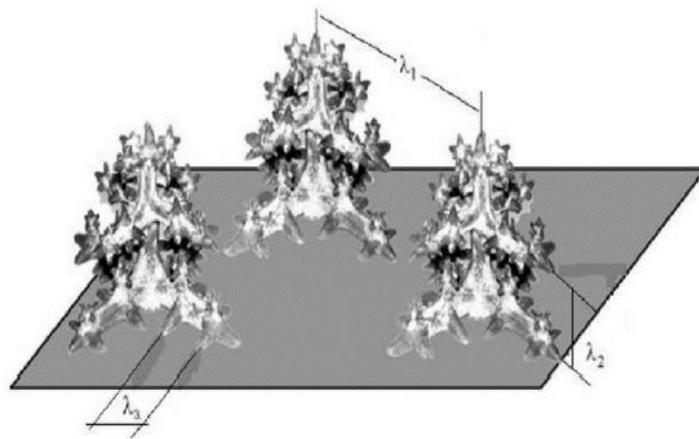


Figura 1. Esquema das ramificações interdendríticas [3].

O espaçamento entre os braços dendríticos é uma medida dos efeitos das condições de solidificação. Em velocidades de crescimento elevadas podem se formar apenas braços primários, mas à medida que a velocidade decresce, desenvolvem-se também ramificações laterais [1].

Os espaçamentos dendríticos exercem uma influência significativa sobre as propriedades mecânicas de ligas em seu estado bruto de solidificação, já que espaçamentos menores permitem que a microestrutura seja caracterizada por uma distribuição mais uniforme da segregação microscópica que existe entre as ramificações celulares ou dendríticas, o que favorece o comportamento mecânico.

A microestrutura e macroestrutura são determinadas pelo tamanho e formato das dendritas durante o processo de solidificação. Nesse sentido é fundamental a determinação precisa dos parâmetros que controlam esses espaçamentos durante a solidificação. A Figura 2 mostra uma representação esquemática de uma microestrutura com os elementos resultantes da solidificação.

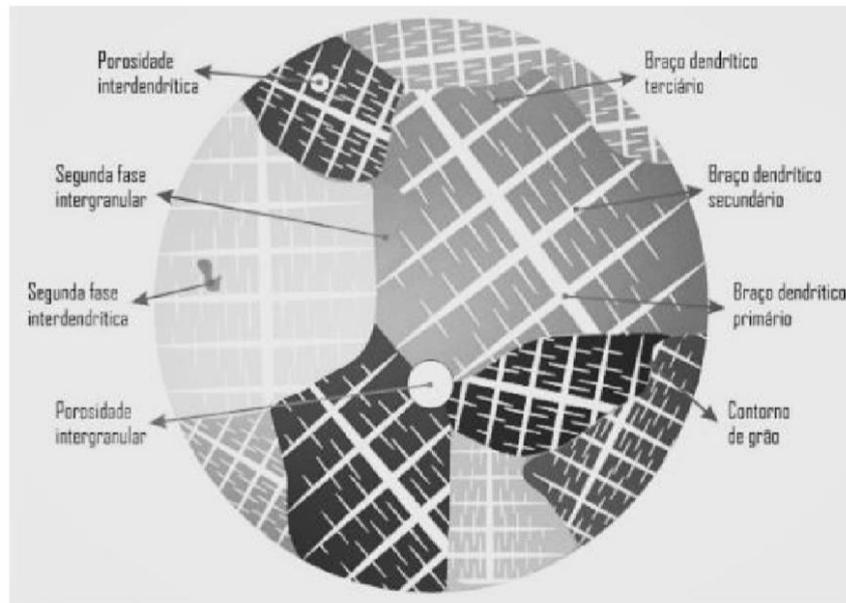


Figura 1. Representação esquemática de microestrutura de fundido [3].

Dependendo do tipo de aço e condições de solidificação é possível observar três estruturas clássicas e distintas ao longo da seção transversal da placa: coquilhada, colunar e equiaxial [4]. Em estudos recentes foi verificada a formação de uma macroestrutura globular para superaquecimentos da ordem de 10°C [5]. O superaquecimento é definido como a diferença entre a temperatura de lingotamento e a temperatura *liquidus*.

A zona coquilhada é composta por diversos grãos dendríticos com formato equiaxial que crescem em direções aleatórias [2]. Região próxima à superfície, é resultado da rápida solidificação que ocorre com o contato do aço líquido com o molde. A nucleação é facilitada devido ao elevado super-resfriamento, que resulta na formação de pequenos grãos equiaxiais.

À medida que a frente de solidificação se afasta das paredes do molde, ocorre uma redução do super-resfriamento e a nucleação é dificultada. Os grãos crescerem a partir da zona coquilhada, perpendicularmente à superfície da placa, no sentido contrário ao fluxo de calor, formando assim, a zona colunar. Os grãos que nucleiam com orientação cristalográfica favorável ao fluxo de calor bloqueiam o crescimento dos grãos de orientação desfavorável e crescem progressivamente em direção ao líquido remanescente [6].

Na região central da placa pode-se formar grãos equiaxiais de orientação cristalográfica aleatória, a partir da precipitação de cristais sólidos no centro da placa. [6]. O aparecimento da zona equiaxial central pode também ocorrer graças à nucleação heterogênea provocada por nucleantes artificiais. Essa estrutura cresce concomitantemente com a zona colunar, bloqueando o crescimento progressivo desta. Tal região de transição é conhecida como CET (*Columnar to Equaxed Transition*). O bloqueio da transição colunar-equiaxial pode advir de duas maneiras: bloqueio mecânico de grãos colunares e bloqueio devido a interação entre os campos de concentração de soluto [7].

Um dos objetivos do presente trabalho é avaliar o comportamento dos espaçamentos dendríticos secundários em função da temperatura de lingotamento e da macroestrutura formada. Destaca-se a importância de tal avaliação, uma vez que os espaçamentos dendríticos exercem influência sobre a formação das micro e macrossegregações, que podem gerar pontos frágeis ou descontinuidades na

microestrutura do material. Um exemplo pode ser visto na indústria do petróleo, onde tubos de aço API (*American Petroleum Institute*) são submetidos a ensaios de ultrassonografia para garantir isenção de descontinuidades internas. Tratando ainda de tubos de aço API, um defeito bastante comum que pode, dentre outros fatores, ser causado por segregações é o chamado *Hook Crack*, que são micro trincas geralmente presentes próximos à região de solda dos tubos [8].

Um outro objetivo do trabalho é a obtenção, através do uso de equações empíricas, da taxa de resfriamento local, parâmetro que define a extração de calor por unidade de tempo num determinado ponto do material. Tal variável foi determinada utilizando como base o espaçamento dendrítico secundário apresentado neste trabalho e é importante para estudos futuros relacionados à aplicação de modelos de previsão de micro e macrossegregação.

## 2 DESENVOLVIMENTO

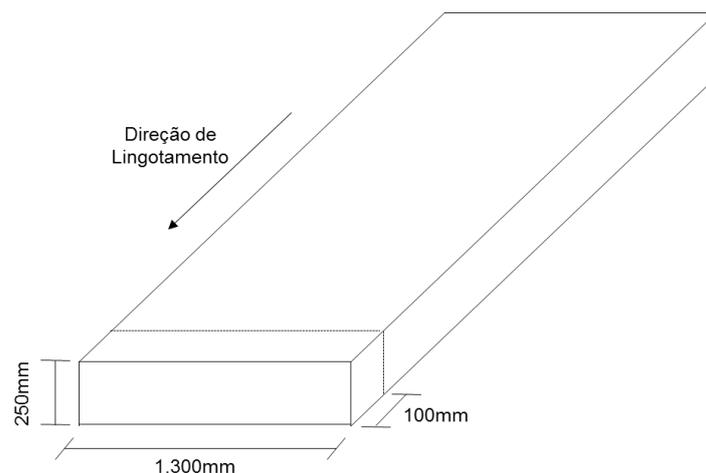
### 2.1 Materiais e Métodos

O aço aplicado ao trabalho possui faixa de composição química conforme apresentado pela Tabela 1.

**Tabela 1.** Faixa de composição química do aço (% em peso).

Elementos	C	Mn	P	S	Al	Si
Mínimo	0,180	1,400	-	-	0,020	0,200
Máximo	0,220	1,600	0,020	0,008	0,060	0,350

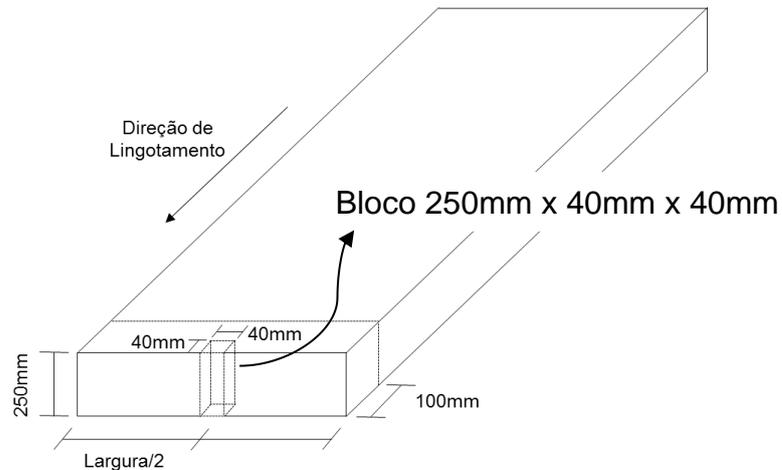
A amostragem foi realizada em placas com condições de processamento controladas, de forma a variar-se apenas a temperatura de lingotamento. Foram objetivadas 5 amostras com variações de superaquecimento entre 5°C e 40°C, sendo selecionadas placas com 8°C, 22°C, 25°C, 28°C e 34°C, cortadas na direção transversal ao lingotamento, ao longo de toda a espessura e largura da placa e com comprimento de 100mm, conforme apresentado na Figura 3.



**Figura 3.** Esquema de amostragem da placa.

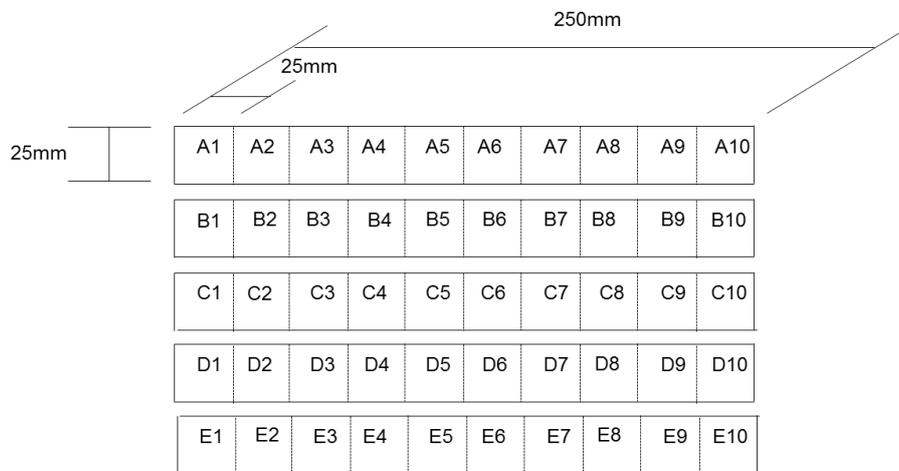
A partir da amostra inicial de 1300mm x 250mm x 100mm, foi cortado um bloco ao longo da espessura, no centro da largura, conforme apresentado na Figura 4. O

o corte ocorrerá por serra, não podendo ser realizado através de chama devido ao comprometimento da estrutura ocasionado pelo aporte térmico.



**Figura 4.** Detalhamento do corte do bloco de 250mm x 40mm x 40mm.

Cada uma das 5 amostras de 250mm x 40mm x 40mm serão subdivididas em 10 partes. Esta divisão tem por objetivo facilitar a preparação metalográfica. As amostras serão identificadas como A1, A2, A3, A4..., B1, B2 ..., E8, E9 e E10, totalizando, ao final, 50 amostras de 25mm x 25mm x 20mm. A Figura 5 ilustra o processo de divisão e identificação e a Figura 6 apresenta as amostras cortadas.



**Figura 5.** Esquema de subdivisão e identificação das amostras a partir dos blocos.



**Figura 6.** Amostras cortadas prontas para embutimento.

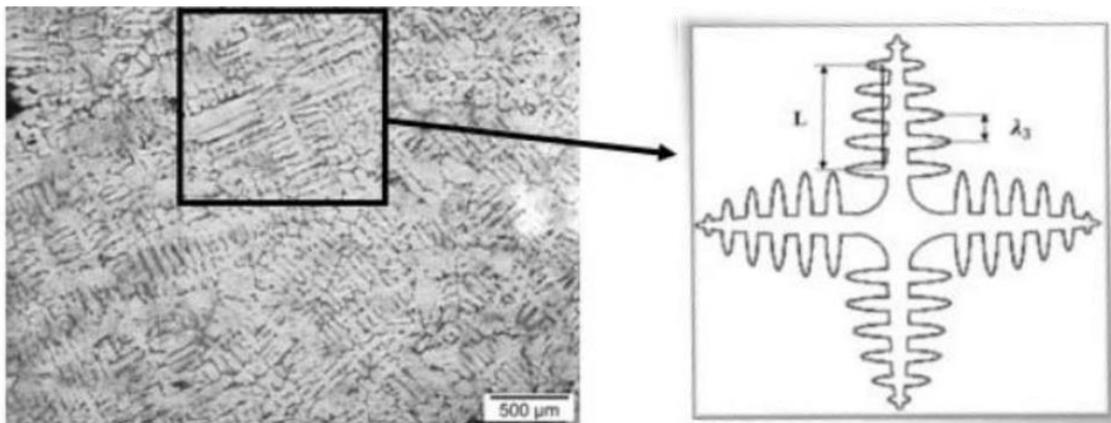
As amostras com dimensão 25mm x 25mm x 20mm serão embutidas em baquelite. Após esta etapa, serão lixadas e polidas seguindo-se as técnicas de preparação metalográfica.

O reagente Oberhoffer foi utilizado para revelação da macroestrutura e medição do espaçamento dendrítico secundário. O ataque ocorreu por imersão de 10 segundos após as amostras 25mm x 25mm x 20mm estarem polidas. Tal reagente possui formulação conforme Tabela 2.

**Tabela 2.** Formulação do reagente Oberhoffer [9].

Composto	Quantidade
Cloreto férrico	30,0g
Cloreto de cobre	1,0g
Cloreto de estanho	0,5g
Ácido clorídrico	50ml
Álcool Etilico	500ml
Água destilada	500ml

Os espaçamentos dendríticos secundários foram determinados com auxílio do microscópio, onde foram obtidas as imagens, e do software ImageJ®, onde foi feita a contagem dos braços das dendritas (n) ao longo de um comprimento “L”, que terá início e fim no centro do braço das dendritas, conforme esquema da Figura 7.



**Figura 7.** Desenho esquemático com o método de medição dos espaçamentos dendríticos secundários.

A medida do espaçamento secundário,  $\lambda_2$ , foi obtida com a Equação 1.

$$\lambda_2 = \frac{L}{1-n} \quad (1)$$

Para a determinação da taxa de resfriamento local,  $\dot{T}$ , foi utilizada a relação empírica apresentada pelas Equações 2 e 3, as quais foram determinadas a partir de resultados de vários pesquisadores, com diferentes taxas de resfriamento e percentuais de carbono (C) [10].

$$\lambda_2 (\mu\text{m}) = (169,1 - 720,9 \times C) \times \dot{T}^{-0,4935} \quad (2)$$

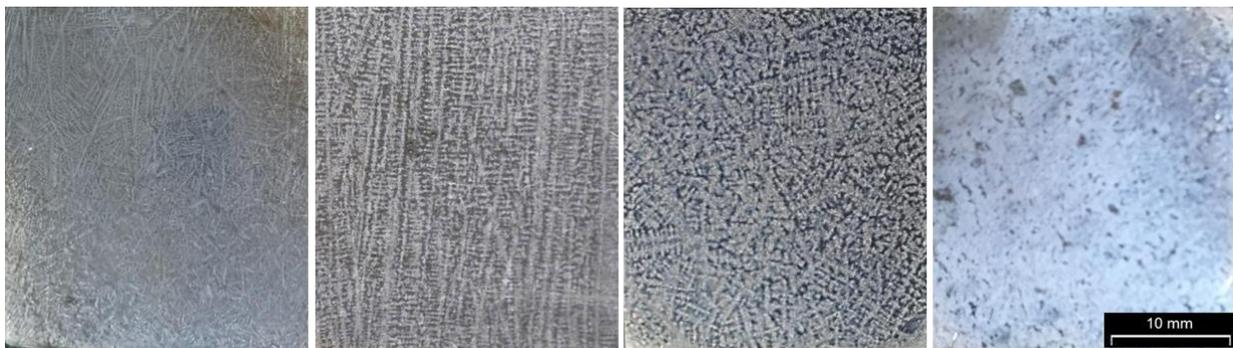
Para  $0 \leq C \leq 0,15\%$  em peso e:

$$\lambda_2 (\mu\text{m}) = 143,9 \times \dot{T}^{-0,3616} \times C^{(0,5501 - 1,996 \times C)} \quad (3)$$

Para  $C > 0,15\%$  em peso.

## 2.2 Resultados e Discussão

Foram reveladas as macroestruturas coquilhada, colunar e equiaxial. Para o superaquecimento de 8°C foi observado, além das 3 macroestruturas citadas, uma macroestrutura de formato globular. Tal macroestrutura é resultado do baixo superaquecimento, o qual deu origem a uma macroestrutura na qual não foi possível observar estruturas dendríticas bem definidas ao microscópio. As macroestruturas são apresentadas na Figura 8.



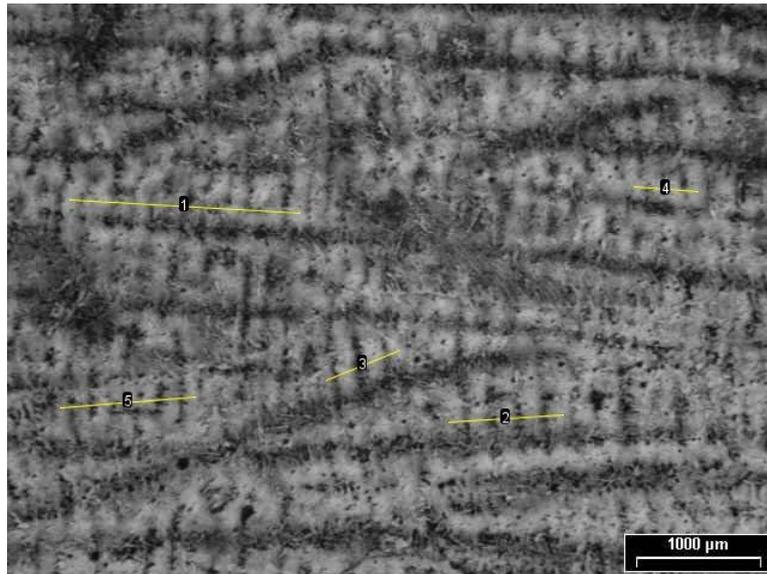
**Figura 8.** Macroestruturas coquilhada, colunar, equiaxial e globular (esquerda para a direita).

A amostra com superaquecimento 8°C apresentou a macroestrutura equiaxial a partir da posição 51mm de distância da superfície da placa em direção ao centro, e macroestrutura globular a partir de 76mm. As demais amostras apresentaram macroestrutura colunar na posição de 51mm a 75mm e equiaxial a partir de 76mm, sem a ocorrência de macroestrutura globular. Sendo assim, para melhor orientação em relação à correlação das macroestruturas com os espaçamentos dendríticos secundários, foi realizada uma separação entre regiões e distância em relação à superfície da placa, conforme Tabela 3.

**Tabela 3.** Regiões da placa associadas à distância em relação à superfície.

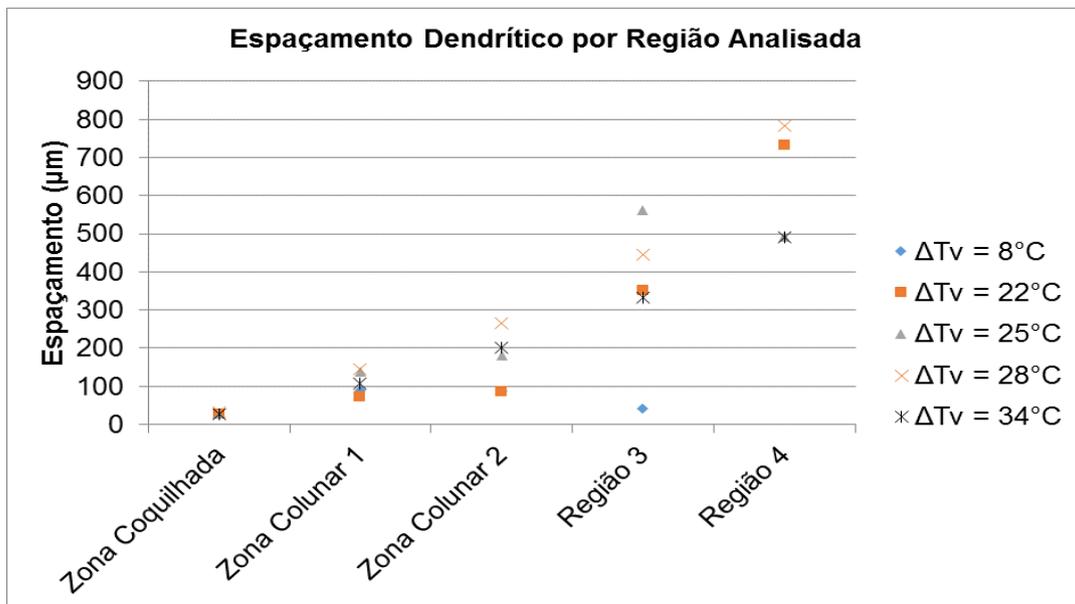
<b>Região</b>	<b>Distância da superfície (mm)</b>
<b>Coquilhada</b>	0 a 5
<b>Colunar 1</b>	6 a 25
<b>Colunar 2</b>	26 a 50
<b>Região 3</b>	51 a 75
<b>Região 4</b>	76 a 100

Em relação aos espaçamentos dendríticos, foram avaliados, ao total, 908 braços dendríticos secundários. A Figura 9 apresenta uma imagem de região colunar mostrando as linhas posicionadas entre os centros dos braços secundários das dendritas, as quais foram medidas e aplicadas à Equação 1 para obtenção das distâncias entre os braços secundários.



**Figura 9.** Imagem da amostra com superaquecimento de 34°C, região colunar, com medições realizadas no ImageJ®. Ampliação de 12,5x.

Nota-se um comportamento definido para os espaçamentos dendríticos secundários em relação as regiões para todas as amostras, com exceção para a de superaquecimento ( $\Delta T_v$ ) de 8°C, conforme apresentado na Figura 10. Esta exceção está relacionada às diferentes macroestruturas resultantes em função da posição quando comparada aos demais superaquecimentos. Devido ao baixo superaquecimento, a macroestrutura apresenta-se mais refinada uma vez que baixas temperaturas favorecem o aparecimento de novos cristais durante a solidificação. Em virtude da formação de macroestrutura globular, não foi possível identificar e medir os espaçamentos dendríticos secundários na Região 4 para a amostra com superaquecimento de 8°C.

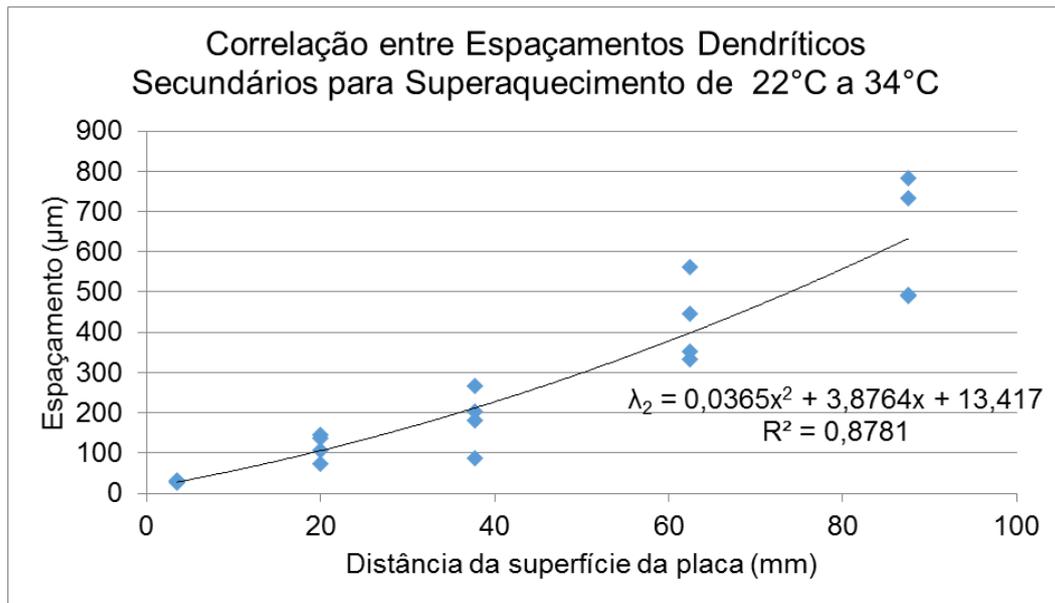


**Figura 10.** Espaçamentos dendríticos secundários para as regiões das 5 amostras.

Observa-se que o espaçamento dendrítico secundário na zona coquilhada é o menor em relação às demais regiões. Este resultado está associado a elevada taxa de nucleação e de extração de calor no molde, que dá início a solidificação. Com o

avanço da frente de solidificação e o aumento da espessura solidificada, a extração de calor vai sendo reduzida, proporcionando assim, condições para o crescimento preferencial das dendritas e aumento dos espaçamentos, conforme pode ser visto para as regiões adjacentes.

De forma a verificar a tendência identificada na Figura 10, os dados para a amostra com superaquecimento de 8°C foram retirados do gráfico, uma vez que apresentou comportamento contrário às demais. Cada região foi traduzida em uma posição na placa, de 0 a 100mm. Fazendo-se ajuste dos dados a uma equação que represente o fenômeno, o resultado foi uma correlação alta, com  $R^2$  de 0,88, conforme apresentado na Figura 11.



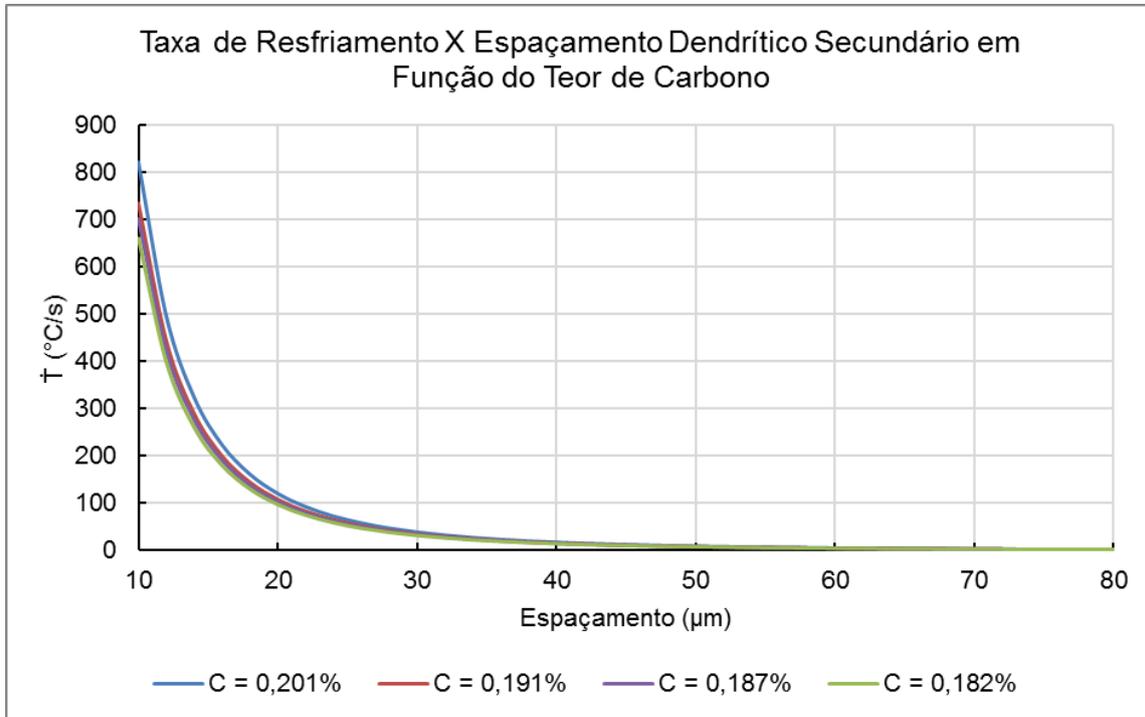
**Figura 11.** Correlação entre os espaçamentos dendríticos secundários para  $\Delta T_v$  de 22°C a 34°C e a distância da superfície da placa.

Tal comportamento permite concluir que, para superaquecimentos entre 22 e 34°C, a curva construída de espaçamento dendrítico secundário em função da distância da superfície da placa pode ser utilizada para estimativa deste espaçamento para qualquer ponto no intervalo de 0 a 100 mm de espessura da placa. Também pode-se afirmar que nesta faixa o superaquecimento não exerce influência significativa no resultado dos espaçamentos secundários.

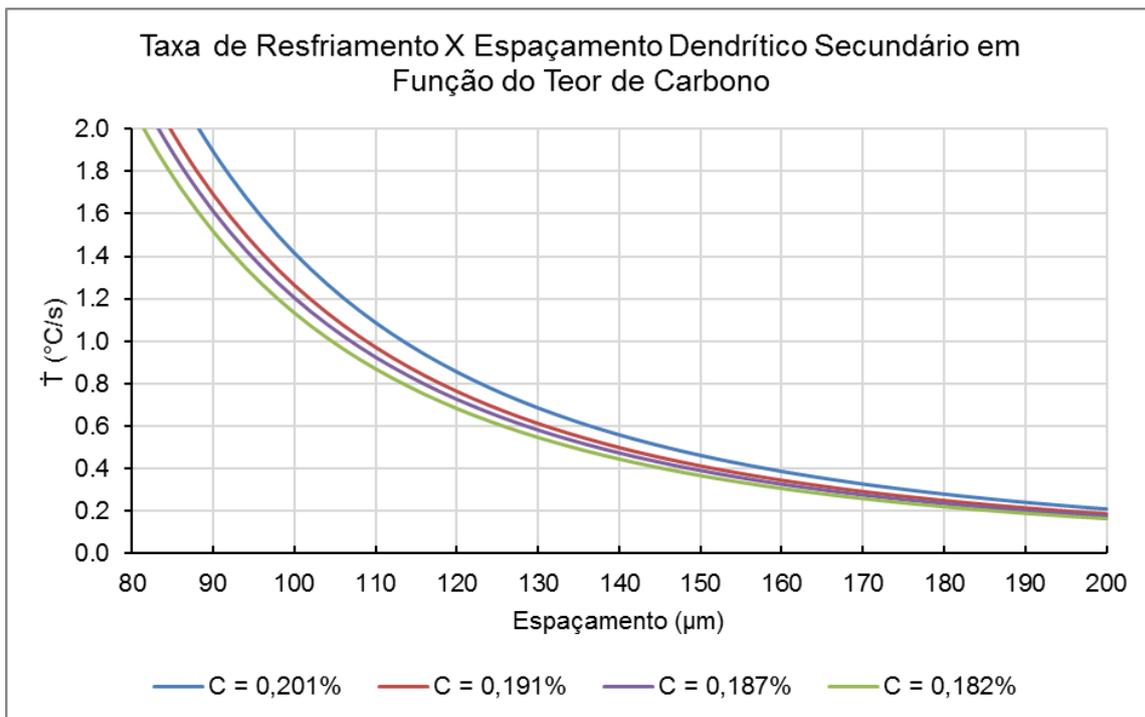
Foi possível determinar as taxas de resfriamento conforme definido na Equação 3, isolando-se o termo  $\dot{T}$  e deixando-o em função do espaçamento dendrítico secundário.

As amostras utilizadas neste trabalho possuem 4 composições de carbono distintas, que foram utilizadas para a obtenção das curvas apresentadas nas Figuras 12 e 13, onde pode-se observar que no intervalo de espaçamento de 10µm a 30µm ocorre uma queda abrupta na taxa de resfriamento, que, posteriormente, é suavizada. Foi apresentado que os menores espaçamentos secundários foram medidos para a zona coquilhada, que é a região submetida a elevada extração de calor, logo, o resultado maior apresentado no gráfico para menores espaçamentos está associado à elevada taxa de extração de calor ao qual a placa está submetida no molde. Foi verificado, ainda, que o espaçamento dendrítico aumenta conforme se avança em direção ao centro da placa. Isto ocorre porque a taxa de resfriamento é reduzida, o que oferece condições para o crescimento das dendritas em direção ao centro da

placa, portanto, a queda da taxa de resfriamento apresentada nos gráficos das Figuras 12 e 13 estão em concordância com os resultados obtidos neste trabalho. Nota-se, também, similaridade entre os 4 teores de carbono das amostras, os quais foram utilizados para obtenção das 4 curvas de taxa de resfriamento versus espaçamento dendrítico secundário. Tal efeito ocorre porque, apesar de diferentes, os teores de C são muito próximos, o que remetem a resultados similares.



**Figura 12.** Taxa de resfriamento em função do espaçamento dendrítico secundário no intervalo de 10 a 80µm para os teores de carbono de cada amostra.



**Figura 13.** Taxa de resfriamento em função do espaçamento dendrítico secundário no intervalo de 80 a 200µm para os teores de carbono de cada amostra e para valores abaixo de 2 °C/s.

### 3 CONCLUSÃO

Com a metodologia proposta foi possível medir os espaçamentos dendríticos secundários, que mostraram um resultado destoante a partir de 50mm de distância da superfície da placa para o superaquecimento de 8°C. A estrutura apresentou-se mais refinada quando comparada aos superaquecimentos acima de 22°C e com a formação de uma macroestrutura, globular, não visualizada nas demais amostras. Para os superaquecimentos entre 22°C e 34°C foi obtida uma equação empírica, através das medições ao longo da espessura da placa, que fornece o espaçamento dendrítico secundário para qualquer ponto no intervalo de 0 a 100mm de espessura. Tal equação apresentou um elevado coeficiente de correlação e mostrou que a temperatura de lingotamento não exerceu influência sobre os espaçamentos dendríticos secundários para esta faixa de superaquecimento.

Com os dados de espaçamento dendrítico secundário, foi possível determinar, através de uma equação empírica, as taxas de resfriamento local. Tais resultados são relevantes pois podem ser associados à posição da placa, desde que seja conhecido o espaçamento dendrítico secundário da posição estudada.

### REFERÊNCIAS

- 1 Garcia, Amauri. Solidificação: Fundamentos e Aplicações. 2ª ed. Campinas-SP, 2007.
- 2 Ferreira, A. F. Modelamento do Processo de Solidificação e Formação de Microestrutura pelo Método de Campo de Fase. Tese de doutorado em Engenharia Metalúrgica. EEIMVR, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 2005.
- 3 Rosa, D. M., Spinelli, J. E., Ferreira, I. L., Cellular/Dendritic Transition and Microstructure Evolution During Transient Directional Solidification of Pb-Sb Alloys, Metallurgical and Materials Transactions, v.39, pp. 161-2174, Sep. 2008.
- 4 Garcia, Amauri; Spim, Jaime A.; Santos, Carlos Alexandre; Cheung, Noé. Lingotamento Contínuo de Aços. Associação Brasileira de Metalurgia, São Paulo, 2006.
- 5 Pikkarainen T.; Vuorenmaa V.; Rentola I; Leinonen M.; Porter D. Effect Of Superheat On Macrostructure And Macrosegregation In Continuous Cast Low-Alloy Steel Slabs. 4th International Conference on Advances in Solidification Processes (ICASP-4). Centre for Advanced Steels Research, University of Oulu, Oulu, Finland, 2016.
- 6 Valadares, C. A. G. Lingotamento Contínuo de Placas. ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais e Mineração, 2007.
- 7 Tomaszewski, I. M. S. Simulação e Modelagem do Processo de Solidificação de Ligas Al-Cu via Modelo de Campo de Fase Acoplado a Técnica de Transição Colunar-Equiaxial. Tese de Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, RJ, 2015.
- 8 Joo, Min Sung; Noh, Kyung-Min; Kim, Wan-Keun Kim; Bae, Jin-Ho; Lee Chang-Sun. A Study of Metallurgical Factors for Defect Formation in Electric Resistance Welded API Steel Pipes, Metallurgical and Materials Transactions E, June 2015.
- 9 Steward, J. W.; Charles, J. A.; Wallach, E. R. Iron – Phosphorus System Part 2 – Metallographic Behavior of Oberhoffer's Reagent. Department of Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge, UK, 1999.
- 10 Thomas, B. G.; Won, Y. Simple Model of Microsegregation during Solidification of Steels. Metallurgical and Materials Transactions, Volume 32A, 2001.