

# CAPÍTULO 1

## ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MICROESTRUTURAL DO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO AISI 304 SOLIDIFICADO EM MOLDES DE DIFERENTES MATERIAIS



<https://doi.org/10.22533/at.ed.152152503021>

*Data de aceite: 06/02/2025*

**Sebastião Raimundo de Jesus Belém  
Leitão Filho**

Universidade Estadual do Maranhão -  
UEMA

**Jean Robert Pereira Rodrigues**

Universidade Estadual do Maranhão -  
UEMA

Universidade Federal do Maranhão -  
UFMA

**Alisson Augusto Azevedo Figueiredo**

Universidade Estadual do Maranhão -  
UEMA

**Wellinton de Assunção**

Universidade Estadual do Maranhão -  
UEMA

**Marcio Sousa Santos**

Universidade Estadual do Maranhão -  
UEMA

**Fernando Lima de Oliveira**

Universidade Estadual do Maranhão -  
UEMA

**Bruno Duarte**

Serviço Nacional de Aprendizagem  
Industrial - SENAI

**Ricardo Silva Borges**

Serviço Nacional de Aprendizagem  
Industrial - SENAI

**Jhonatan Peres de Sousa**

Instituto Estadual de Educação, Ciência e  
Tecnologia do Maranhão - IEMA

**RESUMO:** Em operações industriais de fundição e lingotamento, a escolha do material do molde e as condições de solidificação desempenham um papel crucial na definição da microestrutura e, consequentemente, nas propriedades mecânicas e na qualidade do produto final. Este trabalho teve como objetivo investigar a influência do material do molde (areia e aço) nos parâmetros estruturais durante a solidificação do aço inoxidável austenítico AISI 304. Para tanto, placas de aço inoxidável foram solidificadas em moldes de areia e de aço refrigerado, com monitoramento contínuo da variação de temperatura no metal e no molde por meio de termopares acoplados a um sistema de aquisição de dados. As curvas de resfriamento obtidas permitiram analisar as taxas de resfriamento em cada condição. A análise metalográfica revelou que o material do molde influencia significativamente a formação da macro e microestrutura durante o processo de solidificação, com

destaque para a redução do espaçamento dendrítico secundário em moldes de aço, devido à maior taxa de extração de calor. Os resultados demonstraram que placas solidificadas em moldes de aço apresentaram maior unidirecionalidade dos grãos colunares e uma linha central mais definida, em comparação com as obtidas em moldes de areia. Este estudo contribui para a compreensão dos efeitos do material do molde na microestrutura de aços inoxidáveis austeníticos, fornecendo insights valiosos para a otimização de processos de fundição industrial.

**PALAVRAS-CHAVE:** Aço inoxidável, Parâmetros estruturais; Moldes, Solidificação.

**ABSTRACT:** In industrial casting and ingot operations, the choice of mold material and solidification conditions play a crucial role in defining the microstructure and, consequently, the mechanical properties and quality of the final product. This study aimed to investigate the influence of mold material (sand and steel) on structural parameters during the solidification of austenitic stainless steel AISI 304. To this end, stainless steel plates were solidified in sand molds and water-cooled steel molds, with continuous monitoring of temperature variations in the metal and mold using thermocouples connected to a data acquisition system. The obtained cooling curves allowed for the analysis of cooling rates under each condition. Metallographic analysis revealed that the mold material significantly influences the formation of macro and microstructures during the solidification process, particularly the reduction in secondary dendritic arm spacing in steel molds due to higher heat extraction rates. The results demonstrated that plates solidified in steel molds exhibited greater unidirectionality of columnar grains and a more defined centerline compared to those obtained in sand molds. This study contributes to the understanding of the effects of mold material on the microstructure of austenitic stainless steels, providing valuable insights for optimizing industrial casting processes.

**KEYWORDS:** Stainless steel, Structural parameters, Molds, Solidification.

## INTRODUÇÃO

Em 1912 foi introduzido, na Alemanha, um aço contendo 7% de níquel e 20% de cromo e 0,25% de carbono para fabricação de produtos que exigiam alta resistência a corrosão. Assim nasciam os aços inoxidáveis austeníticos, sendo uma nova classe de materiais que se distingue dos outros aços, pela quantidade de cromo presente, normalmente acima de 11%, amplamente usado em meios aquosos e adequado para as indústrias químicas, farmacêuticas, petroquímicas, do álcool, aeronáutica, naval, de arquitetura, alimentícia, de transporte, e também utilizado em talheres, baixelas, pias, revestimentos de elevadores (Davis, 1991; Padilha e Guedes, 1994). Embora, um alto grau de empirismo tenha predominado, principalmente na indústria de fundição, até o fim da primeira metade do século XX, inúmeras pesquisas relacionadas aos fenômenos que ocorrem durante a solidificação de metais, passaram a ser desenvolvidas (Gandin, 2001; Silva et al., 2013; Castanho et al., 2013).

Foi realizado no presente trabalho, por meio de uma sequência de experimentos, uma análise da influência do material do molde nos parâmetros estruturais durante a

solidificação do aço inoxidável austenítico AISI 304. Para tanto placas de aço inoxidável foram solidificadas em moldes de areia e de aço.

Sobre os Avanços Recentes em Aços Inoxidáveis Austeníticos, nos últimos anos, houve avanços significativos na compreensão da microestrutura dos aços inoxidáveis austeníticos, especialmente em relação à influência de elementos de liga como níquel, cromo e molibdênio na resistência à corrosão e nas propriedades mecânicas. Por exemplo, estudos recentes têm explorado o efeito de microelementos como o nitrogênio na estabilização da fase austenítica (Zhang et al., 2020).

A respeito das Tecnologias de Solidificação, há de mencionar o uso de técnicas avançadas de solidificação, como a solidificação direcional e a fundição sob pressão, que têm sido amplamente estudadas para melhorar a homogeneidade microestrutural e as propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis (Kermanpur et al., 2018).

## METODOLOGIA

Para se obter diferentes taxas de resfriamento durante a solidificação das placas finas, foram utilizadas duas técnicas de fundição, ou seja, fundição de placas em molde de areia e fundição de placa em molde metálico refrigerado. Em ambos os casos, foram produzidas placas de aço com as dimensões de 150 mm de largura por 150 mm de altura com uma espessura de 60 mm. O acompanhamento das temperaturas durante a solidificação foi realizado através de termopares convenientemente posicionados nas paredes do molde e no metal líquido acoplados ao sistema de aquisição. Após a obtenção de cada placa, foi realizada sua caracterização. Esta caracterização teve como objetivo verificar a constituição da estrutura final, assim como, a medição dos espaçamentos interdendríticos (Gündüz, 2002).

O sistema de aquisição de dados utilizado foi calibrado com termopares tipo K, com uma precisão de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ , e uma taxa de amostragem de 1 Hz. A validação dos dados foi realizada através de medições repetidas em condições controladas, garantindo a confiabilidade dos resultados.

Ao que diz respeito as técnicas de preparação das amostras para a Análise Metalográfica, as amostras foram preparadas utilizando-se lixamento progressivo até 1200 mesh e polimento com pasta de diamante de 1  $\mu\text{m}$ . Para revelar a microestrutura, foi utilizado o reagente de Marble (10 g de  $\text{CuSO}_4$ , 50 mL de HCl e 50 mL de  $\text{H}_2\text{O}$ ), que é particularmente eficaz para aços inoxidáveis austeníticos.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta o comportamento do espaçamento dendrítico secundário para as placas de aço inoxidável em diferentes condições de solidificação. No primeiro caso para a placa de aço inoxidável obtida em molde de areia (Figura 1(a)) de maneira geral os valores do espaçamento foram altos em decorrência da velocidade de solidificação ser bem lenta.

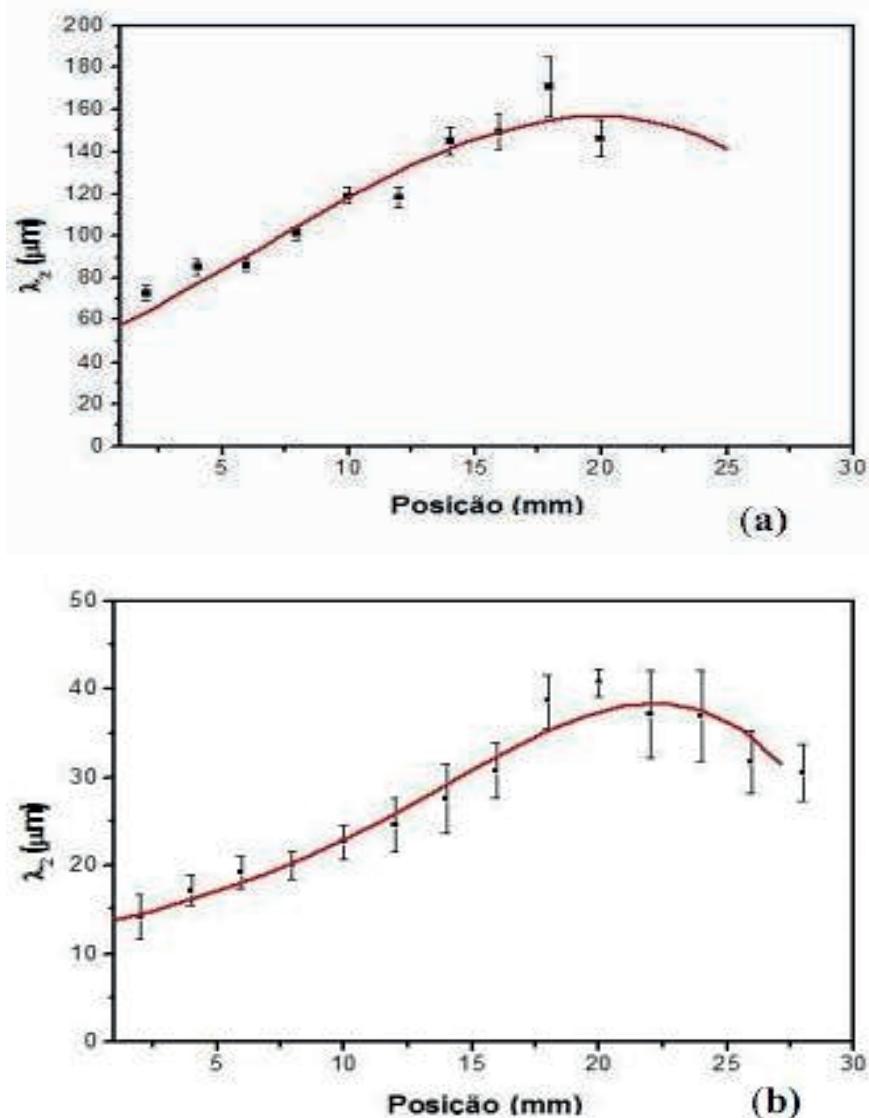


Figura 1. Espaçamentos dendríticos secundários em relação à distância da interface metal/molde das placas de aço inoxidável obtidas: (a) em molde de areia, (b) em molde refrigerado.

Fonte: Próprio autor (2025).

Quando a placa foi obtida em molde refrigerado (Figura 1(b)), notou-se claramente uma redução acentuada desses valores. Próximo a interface metal/molde o valor fica em torno de  $15 \mu\text{m}$ , alcançando valor máximo, em torno de  $40 \mu\text{m}$ , em aproximadamente 20 mm da mesma. Diante disso, constatou-se que o espaçamento dendrítico secundário foi influenciado pelo material do molde, mostrando que para moldes de aço o espaçamento dendrítico secundário foi bem menor quando comparado com moldes de areia.

Com relação a Influência do Material do Molde na Microestrutura, deve-se elencar a discussão sobre como a condutividade térmica do molde influencia a taxa de resfriamento na Microestrutura e, consequentemente, a formação de dendritas.

A condutividade térmica do molde de aço, significativamente maior que a do molde de areia, resultou em uma taxa de resfriamento mais rápida, o que favoreceu a formação de dendritas mais finas e espaçamentos interdendríticos menores. Isso está em concordância com estudos anteriores que demonstram a relação direta entre a taxa de resfriamento e a refinação microestrutural (Kurz & Fisher, 1989).

De forma a evidenciar validade nos resultados e revisão da literatura comparando a outros estudos, os resultados obtidos estão em concordância com os estudos de Gündüz e Cadirli (2002), que também observaram uma redução significativa no espaçamento dendrítico secundário em moldes metálicos em comparação com moldes de areia. No entanto, os valores absolutos dos espaçamentos observados neste estudo foram ligeiramente menores, possivelmente devido às diferenças nas condições experimentais, como a temperatura inicial do metal líquido. Uma análise mais aprofundada sugere uma melhoria nas propriedades mecânicas, como resistência à tração e ductilidade, conforme observado por Gündüz e Çadirli (2002).

Dando sequência na análise dos gráficos de Espaçamento Dendrítico Secundário, a formação de grãos colunares e a linha central observadas nas placas solidificadas em moldes de aço estão associadas a uma maior homogeneidade microestrutural, o que pode melhorar a resistência a falhas, conforme discutido por Rappaz e Boettinger (1999).

Observando comparação com outros estudos sobre aços inoxidáveis, os resultados obtidos estão em concordância com estudos recentes, como o de Zhang et al. (2020), que também observaram uma refinação microestrutural em aços inoxidáveis austeníticos submetidos a taxas de resfriamento mais rápidas.

Correlacionando os resultados e as análises levantadas, podem gerar indicadores práticos para a indústria como a escolha do material do molde para otimizar a microestrutura e as propriedades mecânicas do produto final. A escolha do material do molde, como demonstrado neste estudo, tem implicações significativas para a indústria de fundição, onde moldes de aço podem ser preferidos para obter microestruturas mais refinadas e propriedades mecânicas superiores, conforme discutido por Kermanpur et al. (2018).

## CONCLUSÃO

As placas de aço refrigeradas apresentaram melhor unidirecionalidade dos grãos colunares, além da formação de uma linha central devido ao aumento na taxa de extração de calor em comparação com as obtidas em moldes de areia. O espaçamento dendrítico secundário é influenciado pelo material do molde, mostrando que para moldes de aço o espaçamento dendrítico secundário é bem menor quando comparado com moldes de areia.

Os resultados deste estudo têm implicações significativas para a indústria de fundição, sugerindo que a escolha do material do molde pode ser um fator crítico para controlar a microestrutura e, consequentemente, as propriedades mecânicas do aço inoxidável austenítico. Moldes de aço, com sua maior condutividade térmica, são preferíveis quando se busca uma microestrutura mais refinada e propriedades mecânicas superiores.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, sugere-se a investigação de outros tipos de moldes, como moldes cerâmicos ou revestidos, que podem oferecer diferentes taxas de resfriamento e, consequentemente, influenciar a formação de fases secundárias e a microestrutura final. Além disso, seria interessante explorar o efeito de diferentes taxas de resfriamento na formação de fases como a ferrita delta e a austenita.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecemos a Deus que nos guia em conhecimento e prazer de viver. Os autores agradecem a UEMA pelo apoio financeiro para desenvolvimento e apresentação deste trabalho. Agradecemos também o envolvimento de outros profissionais de outras instituições para que esse trabalho viesse a se concretizar e gerar os resultados obtidos.

## REFERÊNCIAS

- CASTANHO, Manuel Antonio Pires et al. Unsteady-State Directional Solidification of a Hypoperitectic Pb-9.5 wt% Bi Alloy. In: Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, p. 889-894. 2013.
- Zhang, Y., Li, X., & Wang, H. Influence of Nitrogen on the Microstructure and Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steels. Materials Science and Engineering: A, 789, 139-147. 2020.
- Kermanpur, A., Eskin, D. G., & Katgerman, L. Advanced Solidification Techniques for Improved Microstructure Control in Stainless Steels. Journal of Materials Processing Technology, 255, 1-15. 2018.
- Davis, J. R. – ed. Properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys. Metals Handbook. v. 1, 10<sup>a</sup> ed, p. 908,. pp.303-306. 1991.
- GANDIN, Ch-A. Stochastic modeling of dendritic grain structures. Advanced engineering materials, v. 3, n. 5, p. 303-306, 2001.
- GÜNDÜZ, M.; ÇADIRLI, E. Directional solidification of aluminium–copper alloys. Materials Science and Engineering: A, v. 327, n. 2, p. 167-185, 2002.
- Padilha, A. F.; Guedes, L. C. Aços inoxidáveis austeníticos: microestrutura e propriedades. São Paulo, Hemus, , 170 p. 1994.

SILVA, Bismarck Luiz et al. Thermal parameters, microstructure, and mechanical properties of directionally solidified Sn-0.7 wt.% Cu solder alloys containing 0 ppm to 1000 ppm Ni. *Journal of electronic materials*, v. 42, p. 179-191, 2013.

Kurz, W.; Fisher, D. J. *Fundamentals of Solidification*. 3rd ed. Switzerland: Trans Tech Publications, 1989.

Rappaz, M.; Boettinger, W. J. . On the formation of misoriented grains in multicomponent alloys. *Acta Materialia*,. 47(11), 3205-3219. 1999.

Kermanpur, A.; Eskin, D. G.; Katgerman, L. . Advanced Solidification Techniques for Improved Microstructure Control in Stainless Steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 255, 1-15. 2018.