

Influência do Cu, Si e Ni e parâmetros térmicos de solidificação sobre as propriedades mecânicas e microestrutura em ligas hipoeutéticas à base de Al

Influence of Cu, Si, and Ni and thermal parameters of solidification on the mechanical properties and microstructure in Al-based hypoeutectic alloys

Influencia de Cu, Si y Ni y los parámetros de solidificación térmica sobre las propiedades mecánicas y la microestructura de aleaciones hipoeutéticas basadas en Al

Recebido: 31/05/2024 | Revisado: 12/06/2024 | Aceitado: 13/06/2024 | Publicado: 16/06/2024

Paulo Felipe Júnior

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3620-9669>
Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil
E-mail: paulo.felipe@fat.uerj.br

Alexandre Furtado Ferreira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7397-7344>
Universidade Federal Fluminense, Brasil
E-mail: alexandrefurtado@id.uff.br

Roberto Carlos Sales

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4739-2251>
Fundação de Apoio a Escola Técnica, Brasil
E-mail: rcsalesvr@gmail.com

Wysllan Jefferson Lima Garção

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4867-674X>
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro, Brasil
E-mail: wysllan.lima@ifrj.edu.br

Luís Antônio de Souza Baptista

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4735-8694>
Universidade Federal Fluminense, Brasil
E-mail: lbaptista@id.uff.br

Dener Martins dos Santos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4454-1779>
Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil
E-mail: dener.santos@uerj.br

Resumo

O objetivo do trabalho é realizar uma investigação experimental dos efeitos dos solutos na microestrutura e propriedades mecânicas na solidificação unidirecional ascendente de ligas binárias hipoeutéticas de alumínio em condições transientes de extração de calor. Bem como, gerar modelos matemáticos empíricos para contribuir com o desenvolvimento dos processos de solidificação e de seus produtos. Utilizando-se uma metodologia quantitativa, experimental e laboratorial, foram plotadas as curvas de resfriamento, as quais permitiram extrair os parâmetros térmicos como taxa de resfriamento, velocidade de solidificação, gradiente térmico e tempo de solidificação local. A liga Al-Cu possui maior condutividade térmica, logo apresentou resultados experimentais superiores de parâmetros térmicos quando comparada com as ligas Al-Si e Al-Ni. Foram determinadas, também, leis experimentais de desenvolvimento microestrutural associando os espaçamentos dendríticos com as posições dos termopares, microdureza e módulo de elasticidade. Inferindo-se, assim, a dependência da microdureza com os espaçamentos dendríticos primários e solutos. Em contrapartida, os espaçamentos entre os braços primários parecem não afetar os módulos de elasticidade. Por outro lado, houve um aumento considerável nos valores do módulo de elasticidade com a liga Al-5% em peso de Ni, cerca de 120% em relação à liga Al-5% em peso de Cu e 18% sobre a liga Al-5% em peso de Si.

Palavras-chave: Solidificação unidirecional; Espaçamentos dendríticos; Ligas de alumínio; Módulo de elasticidade; Microdureza.

Abstract

The objective of the work is to carry out an experimental investigation of the effects of solutes on the microstructure and mechanical properties in the upward unidirectional solidification of hypoeutectic binary aluminum alloys under

transient heat extraction conditions. As well as generating empirical mathematical models to contribute to the development of solidification processes and their products. Using a quantitative, experimental, and laboratory methodology, cooling curves were plotted, which allowed for the determination of thermal parameters such as cooling rate, solidification speed, thermal gradient, and local solidification time. The Al-Cu alloy has higher thermal conductivity; therefore, it presented superior experimental results of thermal parameters when compared to the Al-Si and Al-Ni alloys. Experimental laws of microstructural development were also determined, associating dendritic spacing with the positions of thermocouples, microhardness and modulus of elasticity. Thus, the dependence of microhardness on primary dendritic spacings and on solutes is inferred. On the other hand, the spacing between the primary arms apparently does not affect the modulus of elasticity. Nevertheless, there was a considerable increase in the modulus of elasticity values with the Al-5 wt.% Ni alloy, around 120% over the Al-5 wt.% Cu alloy and 18% over the Al-5 wt.% Si.

Keywords: Unidirectional solidification; Dendritic spacings; Aluminum alloys; Modulus of elasticity; Microhardness.

Resumen

El objetivo del trabajo es efectuar una investigación experimental de los efectos de los solutos sobre la microestructura y propiedades mecánicas en la solidificación unidireccional ascendente de aleaciones binarias hipoeutécticas de aluminio bajo condiciones transitorias de extracción de calor. Así como generar modelos matemáticos empíricos para contribuir al desarrollo de procesos de solidificación y sus productos. Utilizando una metodología cuantitativa, experimental y de laboratorio, se trazaron curvas de enfriamiento, que permitieron extraer parámetros térmicos como tasa de enfriamiento, velocidad de solidificación, gradiente térmico y tiempo de solidificación local. La aleación Al-Cu tiene mayor conductividad térmica, por lo que presentó resultados experimentales superiores de parámetros térmicos en comparación con las aleaciones Al-Si y Al-Ni. También se determinaron leyes experimentales de desarrollo microestructural, asociando el espaciado dendrítico con las posiciones de los termopares, la microdureza y el módulo de elasticidad. Por lo tanto, se infiere la dependencia de la microdureza con los espacios dendríticos primarios y solutos. En contrapartida, el espaciado entre los brazos primarios no parece afectar los módulos de elasticidad. Por otro lado, hubo un aumento considerable en los valores del módulo de elasticidad con la aleación Al-5 % en peso de Ni, alrededor del 120 % con respecto a la aleación Al-5 % en peso de Cu y el 18 % con respecto a la aleación Al-5 % en peso de Si.

Palabras clave: Solidificación unidireccional; Espaciamientos dendríticos; Aleaciones de aluminio; Módulo de elasticidad; Microdureza.

1. Introdução

O alumínio é produzido comercialmente há cerca de 150 anos e neste curto espaço de tempo, sua indústria se expandiu e está presente nos principais polos do mundo. É o mais importante dos metais não ferrosos e está entre os mais consumidos atualmente. O rápido e notável crescimento da sua utilização deve-se à sua versatilidade e propriedades físicas, especialmente sua baixa densidade em comparação com outros metais de grande consumo, resistência à corrosão, baixo ponto de fusão e alta condutividade elétrica (Baptista et al., 2020). Devido a essas propriedades, as ligas de alumínio são frequentemente uma escolha preferida nas indústrias aeronáutica e aeroespacial, bem como para diversas aplicações de engenharia (Rodrigues et al., 2023; Xiao et al., 2023; Yong-fei et al., 2023; Garchani et al., 2023; Garção et al., 2023). As ligas de alumínio há muito são consideradas peças estruturais ideais para uso em gerenciamento térmico devido à resistência específica ao som, alta condutividade térmica e boa conformabilidade (Zhang et al., 2024). Essas características encontradas neste material motivaram pesquisadores a desenvolver ligas de alumínio em vários sistemas e dezenas de composições.

Entre os inúmeros fatores que afetam a estrutura final de grãos, podem se destacar: taxa de resfriamento, superaquecimento do metal, composição da liga e presença de inoculantes (Garcia, 2007). O entendimento do efeito desses fatores sobre a estrutura bruta de solidificação é de extrema importância, pois a microestrutura possui uma forte relação com as propriedades do material (Ferreira et al., 2006; Tourret & Rappaz, 2015; Xavier et al., 2016; Felipe et al., 2022). A análise da influência de cada um desses fatores no crescimento das dendritas é complexa, pois os efeitos estão interligados e, para avaliá-los de forma simultânea, é necessário usar modelos empíricos.

Os solutos têm um impacto significativo nas ligas de alumínio, uma vez que variações na composição podem afetar a viscosidade, tensão superficial, tempo de solidificação local e o modo de solidificação das ligas. Com a diminuição da pureza do metal, a fluidez do alumínio tende a diminuir rapidamente. O motivo de se utilizar os solutos de cobre, silício e níquel é porque eles possuem densidades bem diferentes em relação ao alumínio. O cobre e o níquel apresentam densidades em torno de 320% superiores ao alumínio, enquanto o silício apresenta uma densidade 30% inferior ao alumínio. A meta deste estudo consistiu em examinar o efeito dos solutos (Cu, Si e Ni), da taxa de resfriamento, das composições das ligas de alumínio (Al-5% em peso de Cu, Al-5% em peso de Si e Al-5% em peso de Ni) sobre a estrutura e propriedades mecânicas resultantes ao final da solidificação, além de criar modelos matemáticos empíricos para auxiliar no aprimoramento dos processos de fabricação e de seus produtos. Com este objetivo, foram conduzidos experimentos de solidificação unidirecional ascendente de ligas binárias de alumínio sob condições transitórias de extração de calor.

2. Metodologia

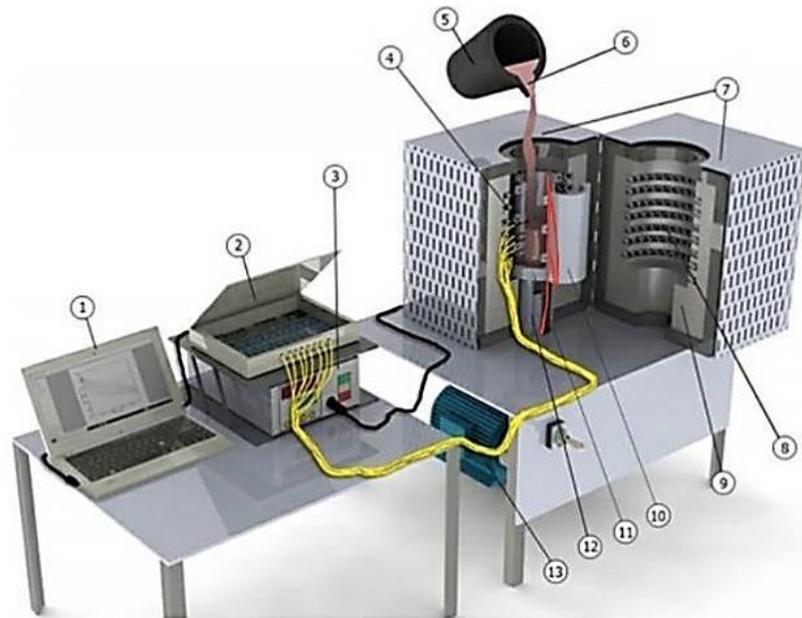
O método utilizado para o estudo da Influência do Cu, Si e Ni e parâmetros térmicos de solidificação sobre as propriedades mecânicas e microestrutura em ligas hipoeutéticas à base de Al foi o quantitativo, que se caracteriza pela coleta de dados quantitativos ou numéricos por meio do uso de medições de grandezas e obtém-se por meio da metrologia, números com suas respectivas unidades (Pereira et al. 2018). Foram conduzidos experimentos num laboratório de solidificação controlada como descrito a seguir.

Inicialmente, as ligas Al-5% em peso de Cu (Al-5% Cu), Al-5% em peso de Si (Al-5% Si) e Al-5% em peso de Ni (Al-5% Ni) foram preparadas num forno tipo câmara de resistência elétrica, a partir de metais comercialmente puros, ou seja, 99,9%Al, 99,9%Cu, 99,7%Si e 99,9%Ni. Em seguida determinaram-se as curvas de resfriamento, para esses experimentos as ligas foram solidificadas no cadinho com resfriamento lento, sob baixa taxa de resfriamento, ou seja, não foi utilizado sistema de resfriamento. Trabalhos anteriores detalham os mesmos procedimentos adotados, os quais permitem determinar as temperaturas *liquidus* e *solidus* pela referida metodologia (Sales et al., 2018; Felipe et al., 2022).

Após a solidificação com resfriamento lento, a solidificação direcional de ligas binárias foi realizada para investigar a microestrutura, microdureza e módulo de elasticidade sob condições transitórias de fluxo de calor. A capacidade de produzir estruturas complexas no aparelho de solidificação direcional nos permite correlacionar quantitativamente a formação da estrutura e suas características em escalas de comprimento com parâmetros de processamento e propriedades mecânicas. O aparelho de solidificação direcional é baseado no forno de resistência vertical e sistema de refrigeração a água, favorecendo alta velocidade de solidificação em regiões próximas ao fundo do molde de aço.

O molde de aço tem diâmetro interno de 50 mm e altura de 140 mm, ele é fechado com uma fina chapa de aço no fundo, com espessura de 3 mm. A superfície de resfriamento do molde de aço foi polida para permitir um bom contato com o metal líquido e, portanto, uma maior transferência de calor no processo de solidificação. O sistema de solidificação foi projetado de tal forma que o fluxo de calor é extraído através do fundo resfriado a água, promovendo a solidificação direcional ascendente, minimizando a convecção natural. Os detalhes experimentais do processo de solidificação controlada podem ser encontrados na literatura (Kakitani et al., 2018) e observados na Figura 1.

Figura 1 - Representação esquemática dos equipamentos: (1) *software* de aquisição de dados e computador; (2) equipamento de aquisição de dados; (3) controlador de temperatura; (4) termopares; (5) cadinho; (6) metal líquido; (7) forno de solidificação unidirecional; (8) aquecedores elétricos; (9) blindagem cerâmica isolante; (10) molde de aço; (11) chapa de aço fina; (12) conduto de refrigeração para a água (13) motor e bomba de água.

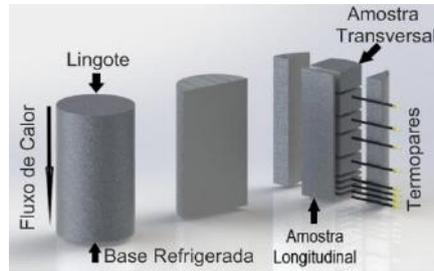


Fonte: Felipe et al. (2022).

A Figura 1 mostra a interligação do conjunto de equipamentos de solidificação direcional controlada adotado no presente trabalho, que possibilita melhor compreender a relação entre eles. Foi utilizada uma cobertura de material refratário no topo do molde, para minimizar as perdas de calor da interface metal/ar. O aparelho de solidificação direcional possui aquecedores elétricos laterais, então um superaquecimento desejado pode ser alcançado antes do início dos experimentos de solidificação. Para iniciar a solidificação, as resistências elétricas são desligadas e, ao mesmo tempo, o sistema de refrigeração à água é ligado.

As temperaturas de fusão (T_p) foram ajustadas para aproximadamente 10% acima da temperatura *liquidus* (T_L) das ligas Al-Cu ($T_L = 647$ °C), Al-Ni ($T_L = 646$ °C) e Al-Si ($T_L = 629$ °C). Durante o processo de solidificação, as temperaturas foram monitoradas por oito termopares (tipo K), posicionados ao longo da lingoteira a 5, 10, 15, 20, 35, 45, 60 e 85 mm da base resfriada a água. A taxa de resfriamento (\dot{T}) foi calculada considerando os dados de temperatura e tempo imediatamente após a passagem da *isoterma liquidus* para as diferentes posições dos termopares no lingote, conforme mostrado na literatura por Sales et al. (2018) e Paradela et al. (2019). Após o processo de solidificação, o lingote foi seccionado no sentido longitudinal, polido mecanicamente com lixas abrasivas e atacado quimicamente com solução ácida composta por 25 ml H₂O, 2,5 ml HF, 25 ml HNO₃ e 60 ml de HCl para revelar a macroestrutura. Amostras foram cortadas no sentido transversal do material na posição de cada termopar (de 5 a 85 mm da base da lingoteira), foram então polidas e atacadas com solução de HF 0,5% para revelar a microestrutura. O esquema de amostragem citado para análises macro e microestruturais pode ser esquematizado como ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Esquema de obtenção das amostras para análises macro e microestruturais.



Fonte: Autores.

Observam-se na Figura 2, o sentido e a direção do fluxo de extração de calor em relação à base refrigerada à água e as posições relativas dos oito termopares com cada amostra retirada do lingote fundido para realização das medições e ensaios. As fotografias foram tiradas para produzir imagens digitais por meio de um microscópio óptico da *Olympus* (*Olympus Corporation*, Japão) e em seguida as medidas dos espaçamentos dos braços dendríticos primários (λ_1) foram realizadas usando o processador de imagem Goitaca (<https://sourceforge.net/projects/goitacaeq>).

O método utilizado para medição do espaçamento dos braços dendríticos primários (λ_1) foi o método do triângulo. Este método utiliza o critério de vizinhança, que considera o valor do espaçamento primário igual à distância média entre o centro geométrico dos braços dendríticos primários, o qual foi descrito com mais detalhes por Baptista et al. (2020). É importante ressaltar que as microestruturas dendríticas prevaleceram ao longo de todas as peças fundidas para qualquer liga examinada. Foram realizadas medições de espaçamento secundário e terciário para a liga Al-5,0%Cu, mas elas não se desenvolveram na liga Al-5,0% Si, nas condições experimentais do presente trabalho. Os testes de microdureza e módulo de elasticidade foram realizados à temperatura ambiente utilizando um equipamento de ensaio dinâmico de dureza, Figura 3. A microdureza e o módulo de elasticidade foram medidos em pelo menos 10–12 regiões diferentes da seção transversal, utilizando um penetrador piramidal Bercovich com carga e tempo de retenção, iguais a 50 g e 10 s, respectivamente.

Figura 3 – Medição de microdureza e módulo de elasticidade de uma amostra de liga Al-5,0%Cu.



$P = 45 \text{ mm}$

$H = 50,99 \text{ GPa}$

$E = 33,12 \text{ GPa}$

Fonte: Autores.

Na Figura 3 nota-se a microestrutura sob o ensaio de microdureza e módulo de elasticidade, em todas as amostras as impressões do penetrador foram realizadas sobre o espaçamento dendrítico primário, aumentando a precisão da avaliação das propriedades mecânicas, além disso, o equipamento de ensaio dinâmico utilizado estabiliza a deformação induzida durante a carga o que também favorece resultados mais precisos.

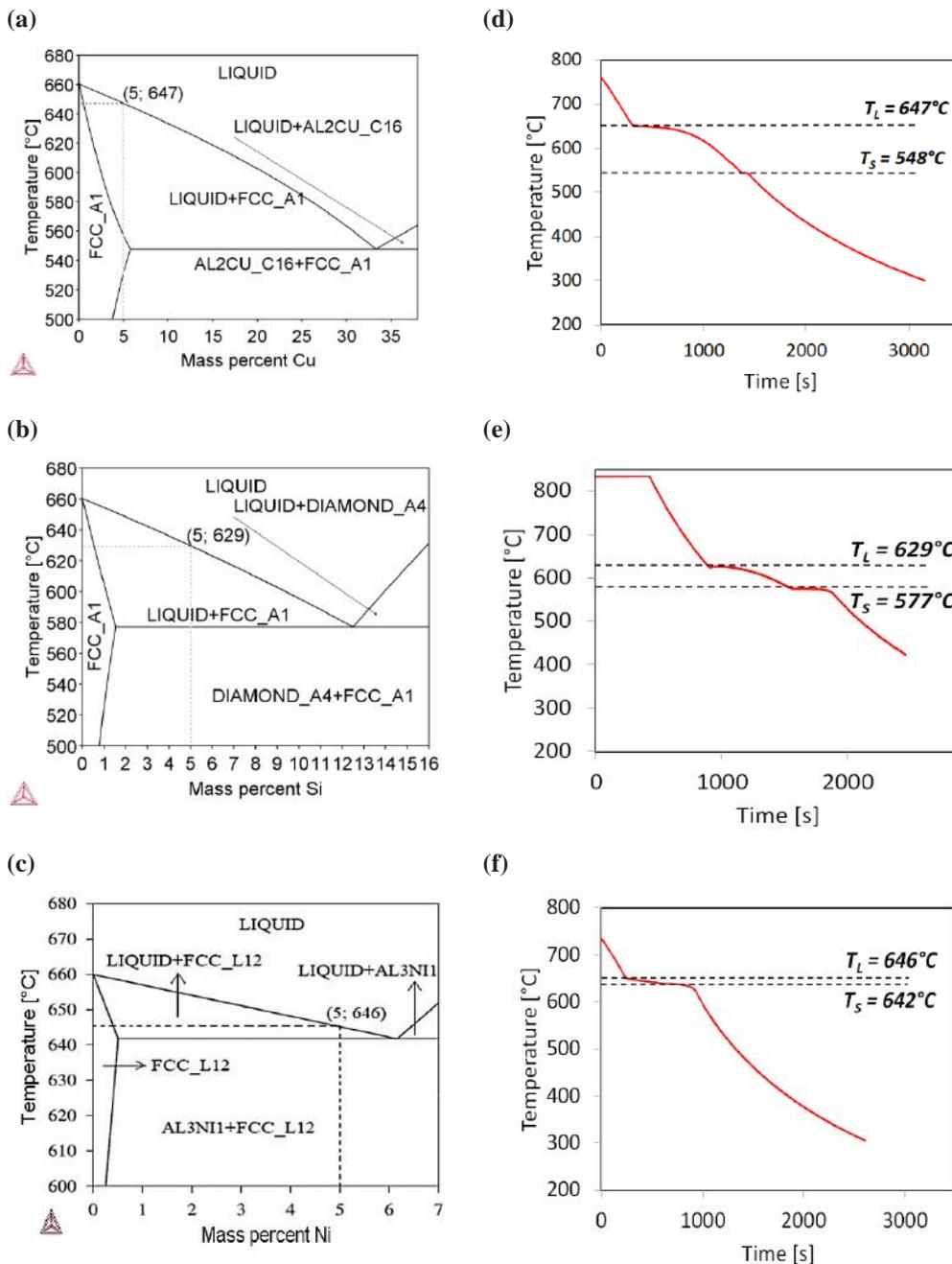
3. Resultados e Discussão

3.1 Análises das Curvas Térmicas

As Figuras 4a, 4b e 4c apresentam os diagramas de fases das ligas hipoeutéticas dos sistemas Al-Cu, Al-Si e Al-Ni calculados com o *software Thermo-Calc* utilizando o banco de dados de alumínio v.4.0, enfatizando a transformação

líquido-sólido, bem como a região hipoeutética. Para as ligas Al-5% Cu, Al-5%Si e Al-5%Ni, durante o resfriamento de solidificação as temperaturas *liquidus* começam em 647, 629 e 646 °C, respectivamente, e terminam quando atingem a temperatura *solidus* em 548, 577 e 642 °C, também respectivamente.

Figura 4 – Trajetória de solidificação: (a) diagrama de fases parcial Al-Cu calculado pelo *software Thermo-Calc*; (b) diagrama de fases parcial Al-Si calculado pelo *software Thermo-Calc*; (c) diagrama de fases parcial Al-Ni calculado pelo *software Thermo-Calc*; (d) curva de resfriamento experimental obtida para liga Al-5,0% Cu sob condições de solidificação lenta; (e) curva de resfriamento experimental obtida para liga Al-5,0% Si sob condições de solidificação lenta; (f) curva de resfriamento experimental obtida para liga Al-5,0% Ni sob condições de solidificação lenta.

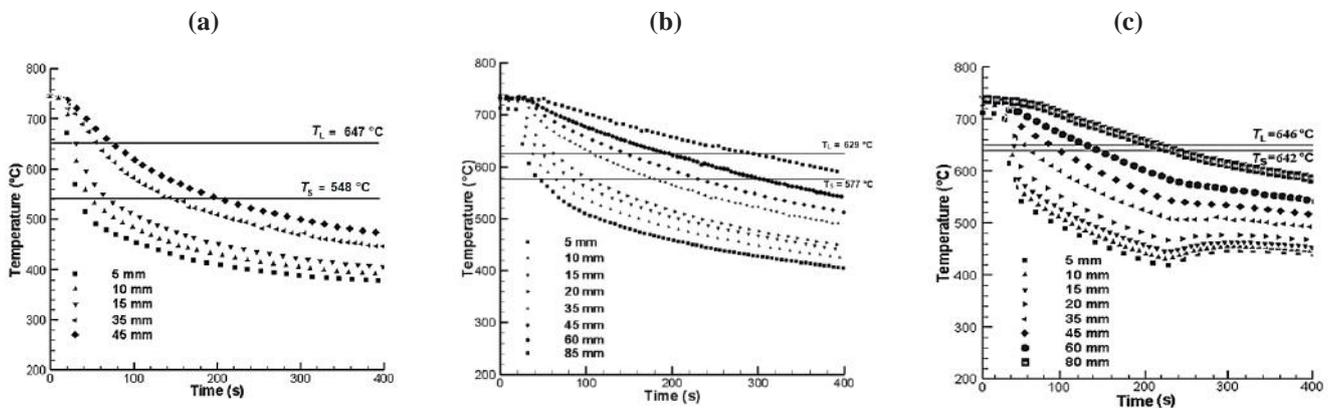


Fonte: Autores.

O tempo local de solidificação (t_{SL}) é determinado pelas temperaturas *liquidus* e *solidus* ($t_{SL} = T_L - T_S$). Ligas fundidas com amplo intervalo de solidificação tendem a ser suscetíveis à segregação durante o processo de solidificação. As Figuras 4d, 4e e 4f mostram a correspondente validação experimental dos diagramas de fases para as ligas examinadas, pela mudança nas curvas de resfriamento causadas pela liberação de calor latente. Apresenta-se as curvas de resfriamento para Al-5,0%Cu, Al-5,0%Si e ligas Al-5,0%Ni, sob uma condição de solidificação lenta, ou seja, nenhum sistema de solidificação resfriado a água foi usado durante os experimentos. Infere-se que no caso da liga Al-5,0%Cu, a solidificação ocorre em uma faixa de temperaturas mais ampla quando comparados com aqueles determinados experimentalmente para a liga Al-5,0%Si e Al-5,0%Ni. Em outras palavras, para a liga Al-5,0%Cu o intervalo de solidificação é igual a 99 °C, enquanto para a liga Al-5,0%Si o intervalo é de 52 °C e na liga Al-5,0%Ni, esse intervalo é de 4 °C. É importante notar que intervalos de solidificação reduzidos resultam em melhores propriedades de fundição, diminui a tendência de defeitos de formação (porosidade e micro encolhimento) e reduz a largura da zona mole (Sales et al., 2018).

As curvas de resfriamento obtidas experimentalmente para as ligas Al-5,0%Cu, Al-5,0%Si e Al-5,0%Ni pelos termopares, que foram inseridos em diferentes posições da base do lingote resfriado a água são mostradas nas Figuras 5a, 5b e 5c. Como padronização para os três experimentos, a temperatura de vazamento foi fixada em cerca de 750 °C. A Figura 5 demonstra que os perfis de temperatura tendem a diminuir com o tempo. Nos primeiros termopares (5, 10 e 15 mm da base refrigerada), a inclinação da curva é mais acentuada devido aos termopares estarem mais próximos da região de extração de calor.

Figura 5 – Temperatura em relação ao tempo de solidificação: (a) liga Al-5,0% Cu; (b) liga Al-5,0% Si e (c) liga Al-5,0% Ni.



Fonte: Autores.

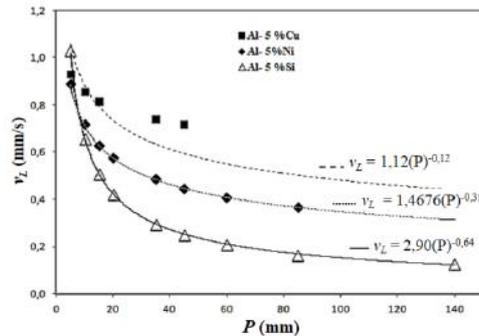
À medida que se afasta da base do lingote, percebe-se pela Figura 5 que a inclinação da curva se torna mais amena por haver um afastamento do sistema de refrigeração do equipamento de solidificação. A redução do fluxo de calor na região sólida é responsável por esta atenuação da curva. Os parâmetros térmicos, como taxa de resfriamento (\dot{T}), velocidade de solidificação (v_L), tempo de solidificação local (t_{SL}) e gradiente de temperatura (G_L) foram determinados experimentalmente a partir das curvas de resfriamento (Figuras 5a, 5b e 5c), como aprofundado por Spinelli et al. (2004).

3.2 Correlação entre parâmetros térmicos

A Figura 6 apresenta uma comparação dos resultados para a velocidade de solidificação (v_L) em relação à posição (P), entre as ligas Al-5%Cu, Al-5%Si e Al-5%Ni. O sistema de resfriamento à água do molde contribui para a alta velocidade

de solidificação nas regiões próximas à base resfriada. Comportamento convergente com resultados de trabalhos anteriores (Sales et al., 2018; Baptista et al., 2020; Barros et al., 2024a).

Figura 6 – Velocidade de solidificação (v_L) em relação à posição (P).

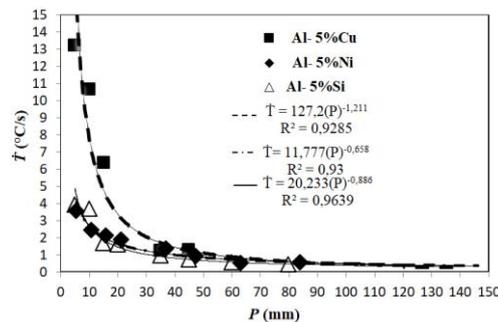


Fonte: Autores.

Um desvio apreciável entre os perfis de velocidade podem ser observados na Figura 6, o que indica que a adição de Cu no alumínio comercialmente puro causou um maior aumento na velocidade de solidificação quando comparado com aqueles determinados experimentalmente para Al-5,0%Si e Al-5,0%Ni. No presente trabalho, a velocidade da *isoterma liquidus* obtido nos experimentos de solidificação foi fortemente favorecido por metais de alta condutividade, como alumínio e cobre, Figura 6.

Os resultados para as taxas de resfriamento (\dot{T}) em relação à posição (P) são apresentados na Figura 7. A taxa de resfriamento diminui significativamente ao longo do comprimento da peça fundida. Os valores mais elevados de algumas variáveis térmicas (taxa de resfriamento e gradientes térmicos) são observados na base do molde de aço, devido à proximidade do sistema de refrigeração.

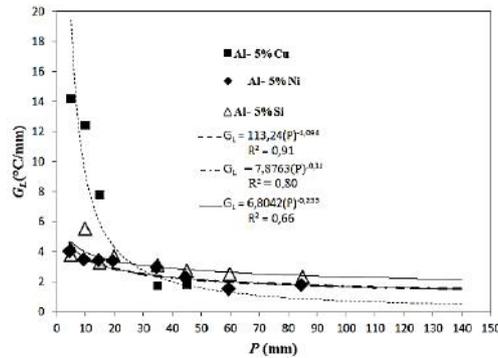
Figura 7 – Taxas de resfriamento (\dot{T}) em relação à posição (P).



Fonte: Autores.

A Figura 7 revela que os dados experimentais para as ligas Al-5%Si e Al-5%Ni são subestimados quando comparados com a liga Al-5%Cu. Como consequência da melhor condutividade térmica devido à adição de Cu no alumínio comercialmente puro. Posteriormente, os três perfis apresentados na Figura 8 representam o gradiente térmico em relação à posição para as ligas Al-5%Cu, Al-5%Ni e Al-5%Si. Esta figura apresenta comportamentos semelhantes aos encontrados na Figura 7, ou seja, valores mais elevados próximos ao sistema de resfriamento à água, posicionado na base do molde de aço. O gradiente térmico diminui mais rapidamente a partir da base do molde e seu valor diminui gradualmente até o topo do molde.

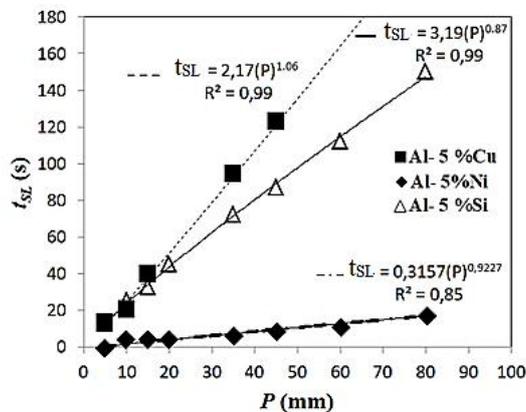
Figura 8 – Comparação dos gradientes térmicos (G_L) em relação à posição (P) ao longo do comprimento das peças fundidas.



Fonte: Autores.

A determinação experimental do tempo necessário para uma posição no lingote solidificar foi apresentada na Figura 9. É notório que o tempo de solidificação local (t_{SL}) aumenta com a posição ao longo da fundição. Contudo, a inclinação da curva do t_{SL} para a liga de Al-5%Ni é bem mais suave do que das ligas Al-5%Cu e Al-5%Si, isso se deve a baixa condutividade térmica do Níquel (90,7 W/m K) comparado a do Cobre (372 W/m K) e Silício (148 W/m K). Essa variação na condutividade térmica pode favorecer os desvios mostrados nas Figuras 6, 7 e 8.

Figura 9 – Tempo de solidificação local (t_{SL}) em relação à posição (P).



Fonte: Autores.

Em todas as correlações entre os parâmetros térmicos foram gerados modelos matemáticos empíricos, os quais podem ser observados no interior de cada gráfico. Essas equações apresentaram boa confiabilidade das linhas de tendências ajustadas, pois em todos os casos os valores de R-quadrado foram próximos a um. Extrai-se da Figura 9 as equações bem ajustadas do tempo de solidificação local em função da posição para as ligas Al-5%Cu ($t_{SL} = 2,17P^{1,06}$ e $R^2 = 0,99$), Al-5%Si ($t_{SL} = 3,19P^{0,87}$ e $R^2 = 0,99$) e Al-5%Ni ($t_{SL} = 0,3157P^{0,9227}$ e $R^2 = 0,85$).

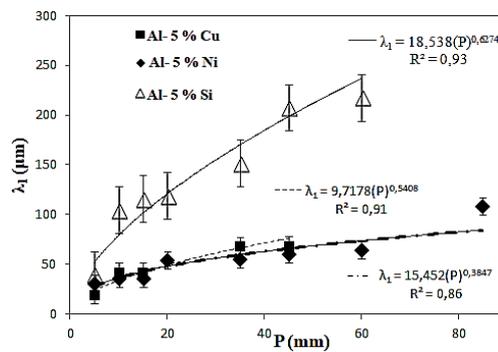
3.3 Relação entre espaçamentos dendríticos primários e propriedades mecânicas

É notório que a resistência mecânica melhora geralmente com o refinamento da microestrutura (Barros et al., 2024b), expressões que relacionem propriedades mecânicas com parâmetros da estrutura são úteis na busca de uma forma de programação estrutural, por meio da fixação prévia das condições de solidificação em função de um determinado nível de resistência mecânica que se pretenda alcançar. Reconhece-se que os espaçamentos das ramificações dendríticas têm uma

correlação muito mais imediata com as propriedades mecânicas do que o próprio tamanho de grão cristalino (Garcia, 2007), muitos modelos experimentais e teóricos foram propostos, com foco no estudo do espaçamento dos braços dendríticos primário e secundário (Hunt & Lu, 1996; Bouchard & Kirkald, 1997; Kurz et al., 2001; Sales et al., 2018; Felipe et al., 2022).

Espaçamentos dendríticos primários (λ_1) foram medidos e relacionados à posição ao longo das peças fundidas, Figura 10. Os resultados experimentais são comparados, sendo notado que Al-5%Si tem maiores espaçamentos de braços dendríticos em comparação com os medidos para Al-5%Cu e Al-5%Ni. Isso se deve ao fato de a liga Al-5%Si apresentar uma menor velocidade de solidificação durante o processo de solidificação, prejudicando o refinamento microestrutural.

Figura 10 – Espaçamentos dendríticos primários (λ_1) em relação à posição (P).

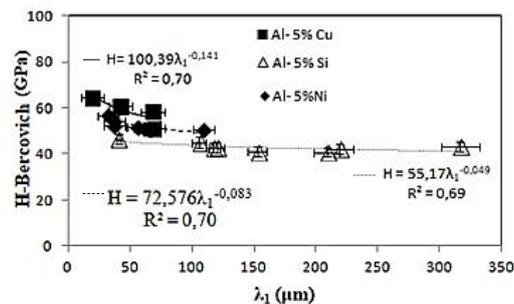


Fonte: Autores.

Os resultados da Figura 10 também fornecem as equações empíricas entre λ_1 em relação à posição (P) para as ligas Al-5%Cu ($\lambda_1 = 9,7178P^{0,5408}$ e $R^2=0,91$), Al-5%Si ($\lambda_1 = 18,538P^{0,6274}$ e $R^2=0,93$) e Al-5%Ni ($\lambda_1 = 15,452P^{0,3847}$ e $R^2=0,86$). Observa-se um bom ajuste das curvas pelos excelentes valores dos coeficientes de correlação.

A Figura 11 apresenta os perfis de microdureza (H) medidos por um testador dinâmico de ultra-microdureza em relação ao espaçamento entre braços primários para as três ligas analisadas. Os perfis de microdureza em função dos espaçamentos dendríticos primários são curvas praticamente paralelas, demonstrando uma clara ligação entre as duas variáveis. Os modelos apresentados no gráfico mostram as relações entre os parâmetros da estrutura dendrítica e as propriedades mecânicas (H).

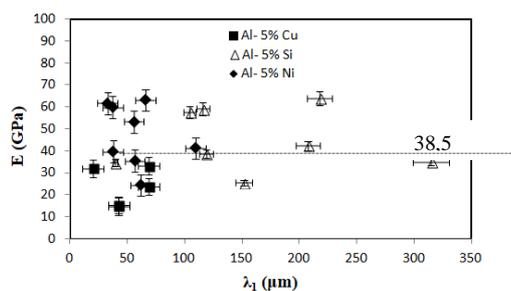
Figura 11 – Microdurezas (H) em relação aos espaçamentos dendríticos primários (λ_1).



Fonte: Autores.

Observa-se pela Figura 11, leis empíricas para contribuir com o desenvolvimento dos processos de solidificação e de seus produtos nos limites abordados no presente trabalho. A Figura 12 apresenta a influência dos espaçamentos dendríticos primários das ligas Al-5%Cu, Al-5%Si e Al-5%Ni sobre os módulos de elasticidade. A dispersão dos pontos motiva apresentar o resultado por um valor médio da propriedade mecânica em questão para as ligas estudadas (38,5 GPa).

Figura 12 – Relação entre módulo de elasticidade (E) e espaçamentos dendríticos primários (λ_1).



Fonte: Autores.

Destaca-se na Figura 12 valores mais elevados para a liga Al-5%Ni (E máximo = 63 GPa, afastado 60 mm da base refrigerada e E médio= 52,3 GPa) seguido por valores ligeiramente inferiores da liga Al-5%Si (E máximo = 63 GPa, afastado 60 mm da base refrigerada e E médio= 44,3 GPa) e por valores mais baixos da liga Al-5%Cu (E máximo = 33 GPa, afastado 45 mm da base refrigerada e E médio= 23,8 GPa).

4. Conclusão

O Objetivo do trabalho foi realizar uma investigação experimental dos efeitos dos solutos na microestrutura, parâmetros térmicos e propriedades mecânicas na solidificação unidirecional ascendente de ligas binárias hipoeutéticas de alumínio em condições transientes de extração de calor. A adição de cobre à liga causou um aumento significativo nos parâmetros térmicos (v_L , \bar{T} e G_L), enquanto os valores de t_{SL} diminuíram para a liga de composição Al-5% em peso de Ni. A adição de cobre teve como efeito o aumento da velocidade de solidificação (v_L), reduzindo, dessa forma, os espaçamentos dos braços dendríticos. Essas características aprimoradas também resultaram em um aumento da microdureza (H) na liga Al-5% em peso de Cu. Entretanto, as ligas não apresentaram um comportamento claro em relação ao módulo de elasticidade (E) associado aos espaçamentos dendríticos primários (λ_1). Porém, os resultados mostram que o módulo de elasticidade aumenta com a adição de soluto de níquel em aproximadamente 18% em relação à liga Al-5% em peso de Si e 120% em relação à liga Al-5% em peso de Cu.

Foram desenvolvidos modelos empíricos para prever as propriedades mecânicas, microestruturas e parâmetros térmicos que foram compatíveis com os resultados experimentais. Dentre as variáveis térmicas, a velocidade de solidificação teve um impacto mais significativo na microdureza e nos espaçamentos dendríticos primários. Contudo, este estudo pode contribuir para o entendimento de como gerenciar parâmetros operacionais de solidificação, a fim de projetar as microestruturas e propriedades mecânicas das principais ligas comerciais de alumínio.

Para trabalhos futuros, sugere-se alimentar os modelos semi-empíricos de crescimento dendrítico com os dados experimentais obtidos neste estudo, a fim de criar modelos com abordagens teóricas ainda não exploradas na literatura. Além disso, é recomendado realizar ensaios mecânicos em ligas de alumínio ternárias e multicomponentes, solidificadas sob as

mesmas condições experimentais, para avaliar a influência em propriedades como microdureza, módulo de elasticidade e limite de ruptura.

Referências

- Baptista, L. A. de S., Paradela, K. G., Felipe Junior, P., Sales, R. C., Dantas, B. S., & Ferreira, A. F. (2020). Analysis of Microsegregation in Al-Si-Cu Ternary Alloys: Interdependence of Solute Composition at the Solubility Limit during Non-Equilibrium Solidification. *Materials Research*, 23(6), e20200180. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2020-0180>.
- Barros, A., Konno, C., Paula, A., Silva, C., Garcia, A., & Cheung, N. (2024a). The Role of Microstructural Length Scale in Hydrogen Generation Features of an Al-Sn-Fe Alloy. *Metals*, 14(2), 187. <https://doi.org/10.3390/met14020187>.
- Barros, A., Cruz, C., Konno, C., Conde, A., Henein, H., Garcia, A., & Cheung, N. (2024b). Tailoring the hydrogen production behavior of Al-Zn-Sn alloys through their as-solidified microstructures. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.01.198>.
- Bouchard, D. & Kirkaldy, J.S. (1997). Prediction of dendrite arm spacings in unsteady-and steady-state heat flow of unidirectionally solidified binary alloys. *Metallurgical and Materials Transactions*. 28 B, 651–63 (1997). <https://doi.org/10.1007/s11663-997-0039-x>.
- Ferreira, A. F., Silva, A. J. da ., & Castro, J. A. de .. (2006). Simulation of the solidification of pure nickel via the phase-field method. *Materials Research*, 9(4), 349–356. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392006000400002>.
- Garção, W. J., Araújo, O., Camerini, C. G., Sales, R. C., & Ferreira, A. F. (2023). An experimental investigation of the effects of radiation and thermal parameters on the aluminum 1050 obtained from upward directional solidification. *Journal of Materials Research and Technology*, 27, 789-803. <https://doaj.org/article/424d2182df0146b4b863c8decba59935>.
- Garchani, F. E., Lgaz, H., Kaya, S., Lee, H., Ibrahim, S. M., Chafiq, M., Ko, Y. G., & Kabiri, M. R. (2023). Effects of heat treatment on the corrosion behavior and mechanical properties of aluminum alloy 2024. *Journal of Materials Research and Technology*, 1355-1363. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.278>
- Garcia, A. (2007). Solidificação: fundamentos e aplicações. Editora da Unicamp.
- Hunt, J. D., & Lu, S. Z. (1996). Numerical modeling of cellular/dendritic array growth: spacing and structure predictions. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 27, 611-623.
- Júnior, P. F., de Olivé Ferreira, L., Garção, W. J. L., de Paula Almeida, R., Melo, C. M., & Ferreira, A. F. (2022). Heat-flow parameters affecting microstructure and mechanical properties of Al–Cu and Al–Ni alloys in directional solidification: an experimental comparative study. *International Journal of Materials Research*, 113(3), 181-193. <https://doi.org/10.1515/ijmr-2020-8146>.
- Kakitani, R., Reyes, R. V., Garcia, A., Cheung, N., & Spinelli, J. E. (2019). Effects of melt superheating on the microstructure and tensile properties of a ternary Al-15 Wt Pct Si-1.5 wt pct Mg alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 50, 1308-1322. <https://doi.org/10.1007/s11661-018-5058-5>.
- Kurz, W., Bezençon, C., & Gäumann, M. (2001). Columnar to equiaxed transition in solidification processing. *Science and technology of advanced materials*, 2(1), 185-191. [https://doi.org/10.1016/S1468-6996\(01\)00047-X](https://doi.org/10.1016/S1468-6996(01)00047-X).
- Paradela, K. G., Baptista, L. A. D. S., Sales, R. C., Felipe, P., & Ferreira, A. F. (2019). Investigation of thermal parameters effects on the microstructure, microhardness and microsegregation of Cu-Sn alloy directionally solidified under transient heat flow conditions. *Materials Research*, 22(4), e20190259. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2019-0259>.
- Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., & Shitsuka, R. (2018). Metodologia da pesquisa científica. UFSM.
- Rodrigues, A. V., Kakitani, R., Silva, C., Giovanetti, L., Dias, M., Henein, H., ... & Cheung, N. (2023). Influence of minor additions of Be on the eutectic modification of an Al-33wt.% Cu alloy solidified under transient conditions. *Metals*, 13(1), 94. <https://doi.org/10.3390/met13010094>.
- Sales, R. C., Felipe Junior, P., Paradela, K. G., Garção, W. J. L., & Ferreira, A. F. (2018). Effect of solidification processing parameters and silicon content on the dendritic spacing and hardness in hypoeutectic Al-Si alloys. *Materials Research*, 21, e20180333.
- Spinelli, J. E., Ferreira, I. L., & Garcia, A. (2004). Influence of melt convection on the columnar to equiaxed transition and microstructure of downward unsteady-state directionally solidified Sn–Pb alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 384(1-2), 217-226. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.04.098>.
- Tourret, D., & Karma, A. (2015). Growth competition of columnar dendritic grains: A phase-field study. *Acta Materialia*, 82, 64-83. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.08.049>. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.08.049>
- Xavier, C. R., Delgado Junior, H. G., Castro, J. A. D., & Ferreira, A. F. (2016). Numerical predictions for the thermal history, microstructure and hardness distributions at the HAZ during welding of low alloy steels. *Materials Research*, 19, 520-533. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2015-0068>.
- Xiao, A., Lin, Y., Huang, C., Cui, X., Yan, Z., & Du, Z. (2023). Effect of electromagnetic forming–heat treatment process on mechanical and corrosion properties of 2024 aluminum alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 1027-1038. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.036>.
- Yong-fei, J., Guo-shuai, N., Yang, Y., Yong-bing, D., Jiao, Z., Yan-feng, H., & Bao-de, S. (2023). Knowledge-aware design of high-strength aviation aluminum alloys via machine learning. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 346-361. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.041>.
- Zhang, W., Hu, S., Wang, K., Huang, Y., Zhong, Y., & Li, W. (2024). Effect of Silicon Micro-Alloying on the Thermal Conductivity, Mechanical Properties and Rheological Properties of the Al–5Ni Cast Alloy. *International Journal of Metalcasting*, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s40962-023-01255-8>