



Investigação da Correlação entre Taxa de Resfriamento, Macroestrutura e Dureza da Liga 6201 Solidificada Direcionalmente

Investigation of the Correlation Between Cooling Rate, Macrostructure, and Hardness of Directionally Solidified 6201 Alloy

Luane Luiza Pereira Marques

<https://orcid.org/0009-0000-5960-6777>. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Campus Belém.

Hérciles Ruiliman Oliveira de Souza

<https://orcid.org/0009-0005-0947-6384>. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Campus Belém.

Lailson Souza Meireles

<https://orcid.org/0009-0008-9544-0151>. Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Campus Ananindeua.

Alexandre Augusto Baldez Gatinho

<https://orcid.org/0009-0000-7047-2271>. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Campus Belém.

Leonardo Carvalho de Oliveira

<https://orcid.org/0009-0008-5502-4508>. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Campus Belém.

Otávio Fernandes Lima da Rocha

<https://orcid.org/0000-0002-6037-6662>. Faculdade de Engenharia de Materiais, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, Campus Belém.

Maria Adrina Paixão de Souza da Silva

<https://orcid.org/0000-0002-7202-4541>. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Campus Belém.

Resumo: A liga de alumínio 6201 é amplamente utilizada em condutores elétricos, nos quais o controle da microestrutura é essencial para garantir desempenho mecânico e confiabilidade. Neste trabalho, investigou-se a influência da taxa de resfriamento na macroestrutura e na dureza da liga Al-6201 solidificada direcionalmente. A liga foi produzida por fusão convencional e submetida à solidificação direcional horizontal com extração de calor unidirecional. O monitoramento térmico, realizado por termopares distribuídos ao longo do lingote, revelou taxas de resfriamento variando de aproximadamente 29,4 °C/s nas regiões próximas à base refrigerada até cerca de 0,2 °C/s nas posições mais afastadas, seguindo uma lei de potência com elevado coeficiente de determinação ($R^2 \approx 0,97$). A análise macroestrutural evidenciou a formação de uma região colunar até cerca de 60 mm, uma zona de transição colunar-equiaxial (TCE) entre 60 e 90 mm e uma região equiaxial a partir de 90 mm do ponto de extração de calor. Os ensaios de dureza Rockwell F mostraram valores decrescentes ao longo do lingote, variando de aproximadamente 65,2 HRF nas regiões colunares para 44,1 HRF nas regiões equiaxiais, correspondendo a uma variação de cerca de 46,6%. A correlação entre dureza e taxa de resfriamento apresentou tendência positiva, descrita por uma relação empírica do tipo potência ($R^2 \approx 0,77$). Notavelmente, a CET pouco influenciou no comportamento da dureza,

prevalecendo a influência da taxa de resfriamento como o fator dominante nas propriedades mecânicas. Conclui-se que a taxa de resfriamento é um parâmetro determinante no controle macroestrutural e mecânico da liga Al-6201 solidificada direcionalmente.

Palavras-chave: solidificação direcional; taxa de resfriamento; macroestrutura; dureza.

Abstract: The aluminum alloy 6201 is widely used in electrical conductors, where microstructural control is essential to ensure mechanical performance and reliability. In this study, the influence of the cooling rate on the macrostructure and hardness of a directionally solidified Al-6201 alloy was investigated. The alloy was produced by conventional melting and subjected to horizontal directional solidification under unidirectional heat extraction. Thermal monitoring was carried out using thermocouples distributed along the ingot, revealing cooling rates ranging from approximately 29.4 °C/s near the heat extraction surface to about 0.2 °C/s at positions farther from the chilled base, following a power-law relationship with a high coefficient of determination ($R^2 \approx 0.97$). Macrostructural analysis showed the formation of a columnar region up to about 60 mm, a columnar-to-equiaxed transition zone (CET) between 60 and 90 mm, and a fully equiaxed region beyond 90 mm from the heat extraction surface. Rockwell F hardness measurements exhibited a gradual decrease along the ingot length, with values ranging from approximately 65.2 HRF in the columnar region to 44.1 HRF in the equiaxed region, corresponding to a variation of about 46.6%. The correlation between hardness and cooling rate showed a positive trend, described by a power-law relationship with moderate dispersion ($R^2 \approx 0.77$). Notably, the CET has little influence on the hardness behavior, with the cooling rate prevailing as the dominant factor affecting the mechanical properties. It is concluded that the cooling rate is a key parameter for controlling the macrostructural evolution and mechanical response of directionally solidified Al-6201 alloys.

Keywords: directional solidification; cooling rate; macrostructure; hardness.

INTRODUÇÃO

A liga alumínio-magnésio-silício 6201 é amplamente utilizada como condutor elétrico em linhas aéreas de transmissão e distribuição de energia, constituindo os cabos AAAC (*All Aluminum Alloy Conductor*) (Allamki *et al.*, 2023). Essa liga combina baixa densidade, elevada relação resistência-peso e boa resistência à corrosão, apresentando resistências à tração típicas de 255-330 MPa e condutividade elétrica na faixa de 52-57% IACS (Allamki *et al.*, 2023). Em termos de “condutividade em massa”, o desempenho é cerca de duas vezes superior ao do cobre devido à baixa densidade do alumínio (Allamki *et al.*, 2023). Do ponto de vista de projeto, o desafio central é conciliar alta condutividade elétrica com elevada resistência mecânica, o que envolve controlar composição, rota termomecânica e condições de solidificação (Allamki *et al.*, 2023; Zhao *et al.*, 2023).

A taxa de resfriamento (T_R) durante a solidificação é um parâmetro térmico chave que impulsiona o desenvolvimento de grãos, espaçamentos dendríticos e transições de morfologia macroestrutural em ligas de alumínio (Sousa *et al.*, 2022; Rahman; Isanaka; Liou, 2025). Em um estudo específico com a liga 6201 refinada com NbB, verificou-se que a solidificação rápida gera tamanhos de grão cerca de sete vezes menores em comparação com a solidificação lenta, evidenciando forte

refinamento microestrutural com o aumento de T_R (Sousa *et al.*, 2022). Revisões abrangentes mostram que, em distintas ligas à base de Al, o aumento de T_R reduz o espaçamento entre braços dendríticos, altera a fração e morfologia de fases intermetálicas e pode inclusive promover fases metaestáveis (Rahman; Isanaka; Liou, 2025; Shen *et al.*, 2022; Carrara *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2025). Em condições de solidificação direcional ou unidirecional, variações locais de T_R ao longo do lingote podem induzir transições colunares-equiaxiais e zonas macroestruturais distintas, com impacto direto na homogeneidade do material (Zhang *et al.*, 2024; Carrara *et al.*, 2021).

A literatura aponta uma relação sistemática entre T_R , escalas micro/macroestruturais e propriedades mecânicas em ligas de alumínio. A redução do espaçamento dendrítico secundário com o aumento da T_R está frequentemente associada ao aumento de resistência mecânica e dureza, devido ao refinamento estrutural e ao melhor controle de segregações (Yang *et al.*, 2023; Shen *et al.*, 2022; Carrara *et al.*, 2021). Em ligas Al-Cu-Li e Al-Ni, por exemplo, leis empíricas vinculam diretamente o espaçamento dendrítico e eutético à T_R , e mostram que menores espaçamentos resultam em maiores tensões de escoamento ou microdureza (Yang *et al.*, 2023; Carrara *et al.*, 2021). Em sistemas ricos em Fe, o aumento da T_R transforma fases alongadas e deletérias (como β -AlFeSi) em partículas mais finas e benignas, melhorando significativamente as propriedades de tração (Shen *et al.*, 2022). Para a liga 6201, estudos com adições de partículas de reforço (TiB_2) mostram que o refinamento e a distribuição de fases e partículas são cruciais para alcançar simultaneamente elevada resistência e condutividade aceitável (Sousa *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2023).

Apesar da importância industrial da Al-6201, os estudos sobre solidificação focam, em grande parte, em outros sistemas Al-base (Al-Cu, Al-Si, Al-Mg, ligas multicomponentes) ou em tratamentos térmicos e envelhecimento da 6201, e não em sua solidificação direcional propriamente dita (Allamki *et al.*, 2023; Rahman; Isanaka; Liou, 2025; Nunes; Gouveia; Spinelli, 2023; Carrara *et al.*, 2021). Trabalhos recentes com a liga 6201 abordam a interação entre refinadores de grão (como NbB) e TR sobre tamanho de grão e espaçamento dendrítico, porém em condições de solidificação lenta e rápida genéricas, sem detalhar leis de escala ou transições macroestruturais colunares-equiaxiais sob gradientes térmicos controlados (Sousa *et al.*, 2022). Estudos de solidificação direcional em outras ligas demonstram claramente o papel da T_R e do gradiente térmico em fenômenos como transições colunares-equiaxiais, formação de células versus dendritas e evolução de intermetálicos, mas esses resultados ainda não foram sistematicamente estendidos à 6201 (Albuquerque *et al.*, 2025; Ngomessse *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2025; Nunes; Gouveia; Spinelli, 2023). Além disso, há escassez de correlações quantitativas entre parâmetros térmicos locais, morfologia macroestrutural (colunar, transitória, equiaxial) e propriedades mecânicas especificamente para a 6201, o que cria uma lacuna relevante para a otimização microestrutural de cabos elétricos dessa liga (Sousa *et al.*, 2022; Allamki *et al.*, 2023; Rahman; Isanaka; Liou, 2025).

Diante desse cenário, o trabalho propõe investigar sistematicamente a solidificação direcional da liga Al-6201 sob diferentes taxas de resfriamento,

visando estabelecer relações quantitativas entre parâmetros térmicos, morfologia macroestrutural e propriedades mecânicas. Parte-se da hipótese de que o aumento controlado da T_R durante a solidificação direcional promove o refinamento de grãos e espaçamentos dendríticos até faixas que otimizam simultaneamente resistência mecânica e homogeneidade, sem comprometer de forma crítica a condutividade elétrica (Sousa *et al.*, 2022; Allamki *et al.*, 2023; Rahman; Isanaka; Liou, 2025; Zhao *et al.*, 2023). Adicionalmente, assume-se que transições macroestruturais (por exemplo, colunar-transicional-equiaxial) podem ser induzidas e mapeadas em função da TR local, permitindo correlacionar essas zonas com respostas mecânicas distintas, como limite de escoamento e tenacidade (Yang *et al.*, 2023; Ngomessse *et al.*, 2021; Nunes; Gouveia; Spinelli, 2023; Carrara *et al.*, 2021). Por fim, o estudo busca preencher as lacunas identificadas na literatura ao propor leis de escala específicas para a liga 6201, integrar análises térmicas, macro/microestruturais e mecânicas, e fornecer subsídios para o projeto de processos industriais capazes de explorar, de forma controlada, o efeito da T_R na performance dos condutores AAAC (Sousa *et al.*, 2022; Allamki *et al.*, 2023; Rahman; Isanaka; Liou, 2025; Zhao *et al.*, 2023).

METODOLOGIA

Material e Composição Química

A liga investigada neste estudo corresponde à composição nominal Al-0,6%Mg-0,8%Si (liga 6201). Para sua fabricação, foi adotado um peso total de 1800 g, quantidade suficiente para garantir a homogeneização química no interior do cadinho, o vazamento completo do metal líquido na lingoteira horizontal e a repetibilidade do experimento de solidificação.

Os elementos constituintes da liga foram obtidos a partir de alumínio com pureza de 99,58%, silício com pureza de 99,5% e uma liga base Mg-7%Al, pertencentes ao laboratório de fundição do IFPA. Inicialmente, os materiais foram cortados utilizando uma serra de fita e, em seguida, pesados em uma balança eletrônica de precisão, de acordo com os cálculos estequiométricos necessários para atingir a composição nominal desejada. As massas correspondentes de cada elemento são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Massa dos componentes utilizados para produção da liga.

Componentes	Massa (g)	(% em peso)
Liga 6201	1800,0	100,0%
Si	14,4	0,8%
Mg	10,8	0,6%
Al	1774,8	98,6%

Fonte: Marques, 2025.

A fusão dos elementos foi realizada em um cadinho de carbetto de silício, inserido em forno apropriado, garantindo a completa fusão e homogeneização da liga. Durante o processo, a temperatura do metal líquido foi monitorada por termopares do tipo K (Chromel-Alumel), posicionados em diferentes regiões do banho metálico e conectados a um registrador de temperatura Fieldlogger Novus, permitindo o acompanhamento contínuo da evolução térmica.

A composição química da liga produzida foi verificada por meio de análise térmica, baseada na obtenção da curva de resfriamento do metal líquido no interior do cadinho, durante o resfriamento natural até a temperatura ambiente. A partir dessa curva, foram identificadas as temperaturas *liquidus* (T_L) e *solidus* (T_S) experimentais, as quais foram comparadas com aquelas obtidas teoricamente por simulação termodinâmica utilizando o software Thermo-Calc, com o banco de dados TCAL8. As composições químicas dos metais Al, Si e da liga base Mg-Al utilizados na preparação da liga são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Composições químicas dos metais utilizado na preparação da liga.

Metais	Al	Ti	Ca	Fe	Ni	Cu	Mg	Si	Cr	Zn
Al	Eq.	-	0.009	0.175	0.0148	0.024	0.0011	0.103	-	-
Si	0.1094	0.0455	0.0214	0.3164	0.0102	-	-	Eq.	0.27	-
Mg-Al	6.981	-	-	0.001	0.001	0.115	Eq.	0.246	-	0.631

Fonte: Marques (2025).

Esse procedimento de validação composicional, fundamentado na correlação entre T_L experimentais e diagramas de fases teóricos, segue metodologias consolidadas na literatura, sendo amplamente empregado em estudos envolvendo ligas de alumínio e sistemas metálicos similares (Paixão *et al.*, 2024; Rodrigues *et al.*, 2021). Além disso, o trabalho de Rodrigues *et al.* (2021) demonstra que essa abordagem permite a confirmação indireta do teor de soluto presente na liga, a partir da coerência entre os dados térmicos experimentais e os resultados previstos pelo equilíbrio de fases.

Após a determinação da T_L experimental, adotou-se um superaquecimento de aproximadamente 10% acima da T_L , resultando em uma temperatura inicial de vazamento em torno de 715 °C. Em seguida, o metal fundido foi conduzido novamente ao forno tipo mufla para completa estabilização térmica e posteriormente vazado no dispositivo de solidificação horizontal, onde foi realizado o processo de extração de calor unidirecional, conforme metodologia descrita em estudos prévios.

Procedimento de Solidificação Direcional

O processo de solidificação direcional da liga Al-0,6%Mg-0,8%Si foi conduzido em um dispositivo experimental de solidificação horizontal, projetado para impor um gradiente térmico unidirecional e permitir o monitoramento detalhado da cinética de solidificação (Marques *et al.*, 2025). Após a determinação da composição química e da T_L da liga, o metal foi novamente fundido em forno tipo mufla até completa homogeneização e, em seguida, transferido para o dispositivo de solidificação.

O dispositivo consiste em uma lingoteira metálica equipada com resistências elétricas laterais, cuja função é estabilizar o nível de superaquecimento do metal líquido e minimizar perdas térmicas pelas faces laterais e pela base do molde. Esse arranjo assegura que a extração de calor ocorra predominantemente por uma única face lateral, promovendo um fluxo térmico unidirecional no sentido longitudinal (horizontal) do lingote. Após atingir o nível de superaquecimento previamente estabelecido, as resistências elétricas foram desligadas e o sistema de resfriamento foi imediatamente acionado, iniciando o processo de solidificação direcional, conforme metodologia consolidada em trabalhos anteriores da literatura (Marques *et al.*, 2025; Jesus *et al.*, 2024).

As condições térmicas impostas ao sistema foram definidas a partir da T_L determinada experimentalmente por análise térmica. Adotou-se um superaquecimento correspondente a aproximadamente 10% acima da T_L , resultando em uma temperatura inicial de solidificação em torno de 715 °C. O resfriamento foi promovido por um fluxo contínuo de água à temperatura ambiente, direcionado exclusivamente a uma das faces laterais da lingoteira, enquanto as demais superfícies permaneceram termicamente isoladas. O processo de resfriamento foi mantido até que o lingote atingisse a temperatura de aproximadamente 230 °C, garantindo a completa solidificação da liga, sem a ocorrência de transformações de fase adicionais.

Para o monitoramento térmico durante a solidificação, foram utilizados oito termopares do tipo K (Chromel-Alumel), posicionados em locais predefinidos ao longo do comprimento da lingoteira, a distâncias nominais de 5, 10, 20, 27, 40, 55, 75 e 100 mm a partir da superfície de extração de calor. Os termopares foram conectados a um sistema de aquisição de dados, permitindo o registro contínuo das temperaturas em função do tempo durante todo o processo de solidificação. Após a conclusão do experimento, as posições exatas dos termopares foram novamente medidas para assegurar a precisão na análise dos dados térmicos.

Os registros experimentais de temperatura em função do tempo ($T \times t$) obtidos para cada termopar foram processados utilizando o programa Origin®. As taxas de resfriamento foram determinadas a partir das derivadas das curvas $T = f(t)$, avaliadas no ponto correspondente à T_L da liga. Esse procedimento permitiu quantificar a variação da TR ao longo do comprimento do lingote, caracterizando um regime de solidificação predominantemente transiente, típico de processos de solidificação direcional em escala laboratorial.

Preparação Metalográfica e Caracterização Macroestrutural

Após o desmolde, o lingote solidificado foi seccionado longitudinalmente, de modo a preservar a direção preferencial de extração de calor imposta durante o processo de solidificação direcional. O corte foi realizado com o auxílio de uma serra de fita, garantindo a integridade da superfície e a adequada orientação das amostras para a posterior análise metalográfica. Apenas uma das metades do lingote foi destinada à preparação metalográfica.

A superfície selecionada foi submetida a lixamento sequencial com lixas de granulometrias variando de 80 a 1200 mesh, visando à remoção de irregularidades superficiais e à obtenção de um acabamento adequado para a revelação da macroestrutura de solidificação. Os procedimentos de preparação seguiram práticas consagradas de metalografia para ligas de alumínio, em consonância com recomendações normativas aplicáveis, quando pertinente.

A revelação macrográfica foi realizada por meio de ataque químico por imersão, utilizando o reagente POUNTO, composto por 60 mL de HCl, 30 mL de HNO_3 , 5 mL de HF e 5 mL de H_2O , conforme descrito por Rocha (2024). O ataque foi conduzido até a completa visualização da macroestrutura do lingote, permitindo a identificação das morfologias típicas associadas ao processo de solidificação direcional.

Ensaio de Dureza

Os ensaios de dureza foram realizados utilizando um durômetro digital de bancada da marca TIME, empregando o método Rockwell na escala F (HRF). Esse método foi selecionado por sua adequação à caracterização mecânica de ligas de alumínio solidificadas direcionalmente.

As medições de dureza foram conduzidas aplicando-se uma carga de 60 kgf, mantida por um tempo de indentação de 4s. Em cada posição analisada, foram realizadas três impressões, sendo o valor final de dureza determinado pela média aritmética das medições.

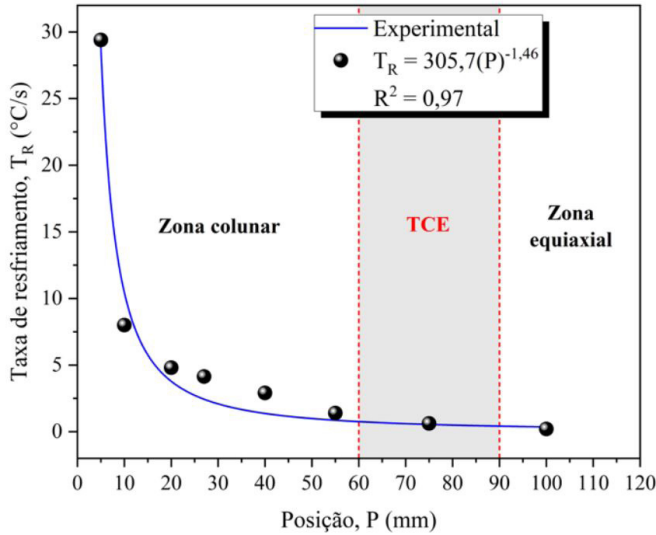
Para evitar a interferência entre impressões consecutivas, as indentações foram realizadas respeitando uma distância mínima de aproximadamente três vezes o diâmetro da impressão anterior, conforme recomendado pela norma ASTM E18-15 (2015). As medições foram efetuadas nas posições 5, 10, 15, 30, 50, 70, 90 e 110 mm, medidas a partir da base refrigerada do lingote.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Taxa de Resfriamento e Evolução da Macroestrutura

Com base no processo de solidificação direcional, a Figura 1 apresenta a distribuição de T_R em função da posição ao longo do lingote solidificado direcionalmente.

Figura 1 - Taxa de resfriamento vs. Posição ao longo do lingote solidificado direcionalmente.



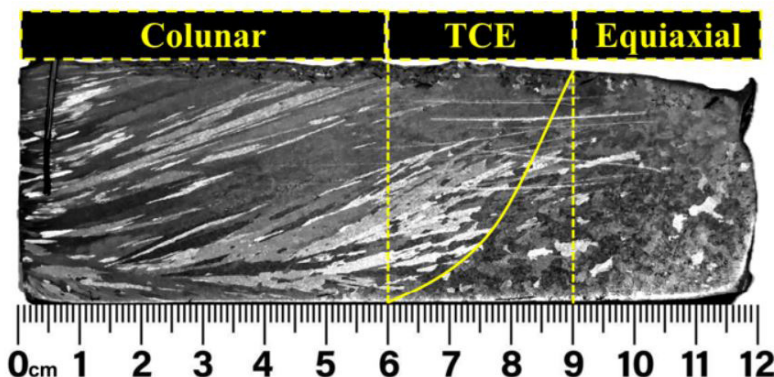
Fonte: autoria própria, 2026.

Observa-se que a T_R apresenta valores elevados nas regiões próximas à superfície de extração de calor, atingindo aproximadamente 30 °C/s nas menores distâncias em relação à base refrigerada, correspondentes à zona colunar do lingote. À medida que a posição ao longo do lingote aumenta, verifica-se um decréscimo acentuado da T_R , associado à redução do gradiente térmico e da eficiência da extração de calor, estabilizando-se em valores inferiores a 1 °C/s nas regiões mais afastadas da base, onde predomina a zona equiaxial.

Os dados experimentais ajustaram-se adequadamente a uma lei de potência do tipo $T_R = 305,7(P)^{-1,46}$, apresentando um elevado coeficiente de determinação ($R^2 = 0,97$). Esse ajuste evidencia uma forte dependência da taxa de resfriamento com a posição ao longo do lingote, refletindo a natureza não linear do processo de transferência de calor durante a solidificação direcional. O elevado valor de R^2 indica, ainda, a consistência dos dados experimentais e a adequação do modelo empírico proposto para descrever a variação da T_R ao longo do comprimento solidificado.

Essa variação da taxa de resfriamento exerce influência direta sobre a evolução macroestrutural, uma vez que elevadas TRs favorecem o crescimento colunar orientado, enquanto a redução progressiva da T_R cria condições termodinâmicas e cinéticas propícias à ocorrência da transição colunar-equiaxial (TCE) e, posteriormente, ao desenvolvimento de uma macroestrutura predominantemente equiaxial. Após a preparação metalográfica, a macroestrutura do lingote analisado é apresentada na Figura 2, permitindo a correlação direta entre os parâmetros térmicos de solidificação e as regiões macroestruturais observadas.

Figura 2 - Regiões e transição da macroestrutura da liga solidificada horizontalmente.



Fonte: autoria própria, 2025.

Evidencia-se, ao longo do comprimento do lingote, a presença de duas regiões macroestruturais bem definidas, conforme ilustrado na Figura 2. A primeira corresponde a uma região de grãos colunares, que se inicia na interface de extração de calor e se estende até aproximadamente 60 mm, caracterizada pelo crescimento preferencialmente orientado na direção do fluxo térmico. A segunda corresponde a uma região de grãos equiaxiais, claramente observada a partir de 90 mm até o final do lingote, resultante das menores taxas de resfriamento e da redução do gradiente térmico. Entre essas regiões, identifica-se uma zona de transição difusa, localizada aproximadamente entre 60 mm e 90 mm, a qual caracteriza a ocorrência da TCE, típica de processos de solidificação horizontal.

A natureza difusa da TCE observada na Figura 2 está associada à complexa interação entre os mecanismos de transferência de calor e de transporte de soluto no líquido, sendo fortemente influenciada pela convecção natural. Segundo Barros *et al.* (2019) e Lima *et al.* (2018), em sistemas de solidificação horizontal, as correntes convectivas no metal líquido promovem variações locais no campo térmico e no sub-resfriamento constitucional, favorecendo a nucleação de grãos equiaxiais à frente da interface sólida. Esses mecanismos estão em plena concordância com a morfologia macroestrutural observada no presente estudo.

Os valores de taxa de resfriamento (T_R) obtidos ao longo do lingote, apresentados na Figura 1, exercem influência determinante sobre a evolução da macroestrutura mostrada na Figura 2. Regiões submetidas a elevadas T_{Rs} , próximas à base refrigerada, favorecem o crescimento colunar estável, enquanto a redução progressiva da T_R em posições mais afastadas promove condições termodinâmicas e cinéticas favoráveis à formação de grãos equiaxiais, culminando na ocorrência da TCE.

Gomes *et al.* (2015) também observaram comportamento análogo em ligas de alumínio solidificadas horizontalmente, com a TCE ocorrendo em intervalos específicos de T_R , compatíveis com os resultados obtidos neste trabalho.

A elevada T_R observada nas regiões próximas à base refrigerada decorre do alto fluxo de calor imposto pelo sistema de resfriamento, resultando em grandes gradientes térmicos e rápida extração de calor do metal líquido. À medida que a frente de solidificação avança ao longo do lingote, ocorre uma redução progressiva da eficiência da extração térmica, associada tanto ao aumento da distância em relação à fonte de resfriamento quanto ao crescimento da camada sólida interposta, que atua como uma resistência térmica adicional. Esse comportamento caracteriza um regime de solidificação transiente, típico de processos de solidificação direcional em escala laboratorial (Marques *et al.*, 2025; Jesus *et al.*, 2024).

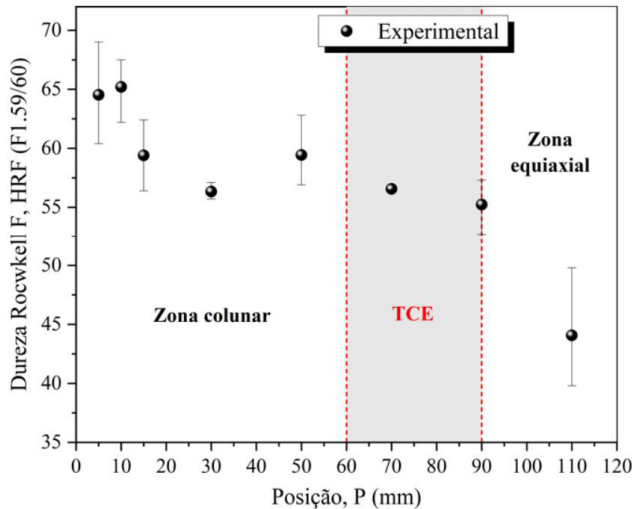
A diminuição sistemática da T_R favorece a instabilidade morfológica da interface sólido-líquido e o aumento do sub-resfriamento constitucional no líquido à frente da interface, criando condições propícias à nucleação heterogênea e ao crescimento de grãos equiaxiais, conforme evidenciado pela macroestrutura apresentada. Do ponto de vista tecnológico, a forte variação da T_R ao longo do lingote indica que a macroestrutura da liga Al-6201 é altamente sensível às condições térmicas impostas durante a solidificação.

Regiões solidificadas sob altas taxas de resfriamento tendem a apresentar estruturas colunares mais refinadas, geralmente associadas a melhores propriedades mecânicas locais, enquanto regiões submetidas a baixas TRs favorecem a formação de grãos equiaxiais mais grosseiros, impactando a homogeneidade estrutural e, consequentemente, o desempenho mecânico global do material (Marques *et al.*, 2025; Jesus *et al.*, 2024). Em aplicações industriais, esses resultados ressaltam a importância do controle rigoroso das condições de extração de calor em processos de fundição e solidificação direcional, visando minimizar gradientes macroestruturais e obter produtos com propriedades mais uniformes e previsíveis (Farias *et al.*, 2025).

Comportamento da Dureza

A Figura 3 apresenta os resultados de dureza Rockwell F (HRF) em função da posição ao longo do lingote.

Figura 3 - Dureza Rockwell F vs. Posição ao longo do lingote solidificado horizontalmente.



Fonte: Adaptada de Marques, 2025.

Observa-se uma tendência clara de redução da dureza à medida que a posição se afasta da superfície de extração de calor. Os maiores valores de dureza são registrados nas regiões iniciais do lingote, próximas à base refrigerada, enquanto valores progressivamente menores são observados em posições mais distantes.

O valor máximo de dureza obtido foi de aproximadamente 65,2 HRF, registrado nas posições mais próximas à interface de transferência de calor. Em contrapartida, nas regiões finais do lingote, a dureza diminui para valores da ordem de 44,07 HRF, indicando uma redução significativa da resistência mecânica ao longo do comprimento solidificado.

Essa variação da dureza ao longo da posição está ligada às diferenças microestruturais desenvolvidas durante a solidificação direcional. Regiões próximas à base refrigerada tendem a apresentar estruturas mais refinadas, com maior densidade de contornos e interfaces, que atuam como obstáculos ao movimento de discordâncias, elevando a resistência à deformação plástica. Por outro lado, nas posições mais afastadas, estruturas mais grosseiras favorecem a mobilidade das discordâncias, resultando em menores valores de dureza.

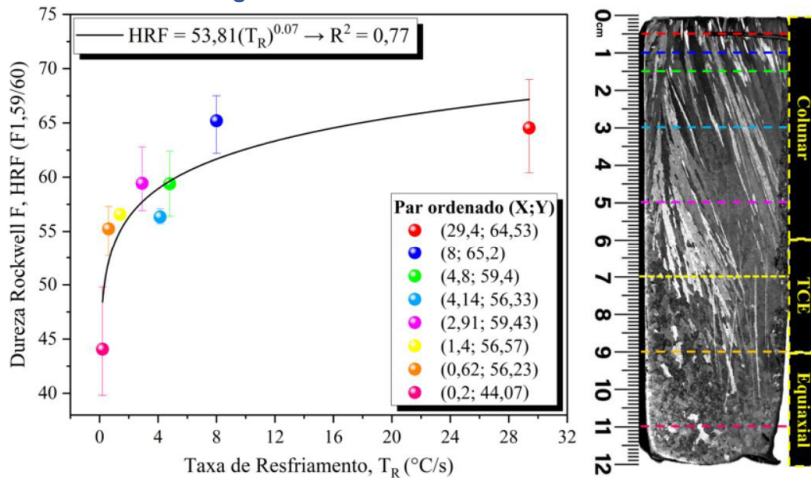
De forma quantitativa, a diferença entre os valores máximos e mínimos de dureza ao longo do lingote corresponde a um aumento aproximado de 46,6%, evidenciando a forte dependência do comportamento mecânico da liga em relação à posição de solidificação.

Correlação entre Taxa de Resfriamento e Dureza

A correlação entre a taxa de resfriamento e a dureza Rockwell F da liga Al-6201 solidificada direcionalmente foi avaliada a partir da análise integrada

dos gráficos de dureza em função da posição ao longo do lingote, associados às zonas macroestruturais (Figuras 1 e 3), e do gráfico de dureza em função da T_R apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Dureza Rockwell F vs. Taxa de resfriamento ao longo do lingote solidificado horizontalmente.



Fonte: Adaptada de Marques, 2025.

A Figura 4 mostra a variação da dureza HRF em função da taxa de resfriamento ao longo do comprimento do lingote solidificado horizontalmente. Observa-se que os pontos experimentais se distribuem em um intervalo de T_R que varia aproximadamente de 0,2 °C/s a 29,4 °C/s, com os valores mais elevados de T_R correspondendo às posições mais próximas da base refrigerada, associadas à zona colunar, e os menores valores de T_R localizados nas regiões mais afastadas, correspondentes à zona equiaxial.

Para baixas taxas de resfriamento, da ordem de 0,2 a 1,0 °C/s, típicas da região equiaxial, os valores de dureza situam-se entre aproximadamente 44 e 56 HRF. À medida que a T_R aumenta para valores intermediários, característicos da região de TCE, observa-se um crescimento gradual da dureza, atingindo valores próximos a 58-60 HRF. Nas maiores taxas de resfriamento, superiores a 8 °C/s, associadas à zona colunar, a dureza alcança valores máximos da ordem de 64-65 HRF.

O comportamento apresentado no gráfico indica uma relação positiva não linear entre a dureza e a taxa de resfriamento, evidenciada pelo ajuste empírico do tipo potência, expresso por $HRF = 53,81(T_R)^{0,07}$, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,77$. Embora o valor de R^2 indique uma dispersão moderada dos dados experimentais, a tendência global do ajuste confirma que a T_R exerce influência significativa sobre a dureza do material. Assim, o expoente reduzido da lei de potência sugere que, para valores elevados de T_R , o ganho incremental de dureza torna-se progressivamente menos acentuado, indicando um comportamento de saturação típico de propriedades mecânicas controladas por refino microestrutural.

A dispersão observada no gráfico pode ser atribuída à natureza transiente do processo de solidificação direcional, no qual flutuações locais nos gradientes térmicos, na velocidade da frente de solidificação e na intensidade das correntes convectivas afetam a microestrutura final e, conseqüentemente, a resposta mecânica local. Ainda assim, a coerência da tendência geral reforça a T_R como um parâmetro térmico dominante no controle da dureza da liga Al-6201.

Sob a perspectiva metalúrgica, o aumento da dureza com a elevação da T_R está relacionado ao crescimento colunar mais estável em regiões submetidas a maiores fluxos de calor. Por outro lado, as menores T_R s favorecem a formação de grãos equiaxiais mais grosseiros, resultando em menores valores de dureza, conforme evidenciado na Figura 4.

Pela ótica tecnológica, os resultados demonstram que o controle da taxa de resfriamento durante a solidificação direcional permite modular a dureza ao longo do lingote, possibilitando a obtenção de gradientes controlados de propriedades mecânicas sem a necessidade de tratamentos térmicos adicionais. Tal abordagem é particularmente relevante para aplicações industriais da liga Al-6201, utilizada em condutores elétricos e componentes estruturais leves, nas quais a combinação entre desempenho mecânico, confiabilidade e controle microestrutural é crítica.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados experimentais alcançados no presente estudo estabeleceram as correlações processo estrutura propriedade para a liga Al-6201 solidificada horizontalmente, permitindo concluir que:

1. A cinética térmica de solidificação seguiu uma lei de potência ($R^2 \approx 0,97$), com taxas de resfriamento variando significativamente entre 29,4 e 0,2 °C/s ao longo do lingote.
2. A macroestrutura apresentou zonas distintas, tais como colunar, transição (TCE) e equiaxial, porém a TCE pouco influenciou o comportamento mecânico da liga.
3. A taxa de resfriamento prevaleceu como o parâmetro determinante da dureza Rockwell F, que decresceu 46,6% (de 65,2 para 44,1 HRF) à medida que o resfriamento se tornou mais lento.
4. A correlação positiva entre a dureza e a taxa de resfriamento foi validada por um modelo empírico de potência ($R^2 \approx 0,77$), confirmando a sensibilidade das propriedades mecânicas da liga Al-6201 às variáveis térmicas de processo.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, S.; REINHART, G.; SOLTANI, H.; MAGALHÃES, D. C. C.; SPINELLI, J. E.; NGUYEN-THI, H. **In Situ Observation by X-Ray Radioscopy of Liquid Decomposition During Directional Solidification of Al-Cu-Sn Alloys**. Metals, v. 15, n. 3, p. 296, 2025.

ALLAMKI, A.; AL-MAHARBI, M.; QAMAR, S. Z.; AL-JAHWARI, F. **Precipitation hardening of the electrical conductor aluminum alloy 6201**. *Metals*, v. 13, n. 6, p. 1111, 2023.

ASTM International. (2015). **ASTM E18-15: Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials**. West Conshohocken, PA: ASTM International. DOI: 10.1520/E0018-15.

BARROS, A.; CRUZ, C.; SILVA, A. P.; CHEUNG, N.; GARCIA, A.; ROCHA, O.; MOREIRA, A. **Horizontally solidified Al-3 wt% Cu-(0.5 wt% Mg) alloys: tailoring thermal parameters, microstructure, microhardness, and corrosion behavior**. *Acta Metallurgica Sinica*, v. 32, n. 6, p. 695-709, 2019.

CARRARA, A.; KAKITANI, R.; GARCIA, A.; CHEUNG, N. **Effect of cooling rate on microstructure and microhardness of hypereutectic Al-Ni alloy**. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, v. 21, n. 1, p. 14, 2021.

GOMES, C.; KIKUCHI, R.; BARROS, A.; SILVA, J.; SILVA, A., MOREIRA, A.; ROCHA, O. **On the natural convection in the columnar to equiaxed transition in directionally solidified aluminum-based binary and multicomponent alloys**. *Materials Research*, v. 18, n. 6, p. 1362-1371, 2015.

FARIAS, J.; MARQUES, L.; SOUZA, H.; HOLANDA, L.; OLIVEIRA, L.; SILVA, A. **Industrial-Scale Assessment Of Grain Refinement Efficiency In Al-6201 Alloy Using Al-5ti-1b Additions**. *Revista de Gestão Social e Ambiental - RGSA*. São Paulo (SP), v. 19, n. 12, p. e014089, 2025.

JESUS, W.; SILVA, V.; SOUZA, H.; COSTA, T.; ROCHA, O.; NASCIMENTO, L.; SILVA, A. **Thermal and microstructural characterization of the multicomponent alloy Al33wt%Cu1wt%Ni-1.2wt%Ta solidified with transient heat flow**. *Trends in Sciences*, v. 21, n. 9, p. 8029-8029, 2024.

KOTADIA, H.; GIBBONS, G.; DAS, A.; HOWES, P. D. **A review of Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing of aluminium alloys: Microstructure and properties**. *Additive Manufacturing*, v. 46, p. 102155, 2021.

LIMA, J. O., BARBOSA, C. R., MAGNO, I. A. B., NASCIMENTO, J. M., BARROS, A. S., OLIVEIRA, M. C., ROCHA, O. L. Microstructural evolution during unsteady-state horizontal solidification of Al-Si-Mg (356) alloy. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, v. 28, n. 6, p. 1073-1083, 2018.

MARQUES, Luane Luiza Pereira. **Efeito Dos Processos De Solidificação E Tratamento Térmico Na Estrutura, Propriedades Mecânicas E Elétricas Da Liga 6201**. 2025. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém - PA, 2025.

MARQUES, L. P.; MESQUITA, S. Q.; MACIEL, A. C.; COSTA, R. B.; FRANÇA, R. S., ROCHA, O. L., & FERREIRA, I. L. **Effect of Cooling Rate on the Secondary Dendritic Spacing of a Horizontally Solidified 6xxx Series Aluminum**

Alloy. Materials Research, v. 28, n. Suppl 1, p. e20250045, 2025.

NGOMESSE, F.; REINHART, G.; SOLTANI, H.; ZIMMERMANN, G.; BROWNE, D. J.; SILLEKENS, W.; NGUYEN-THI, H. **In situ investigation of the Columnar-to-Equiaxed Transition during directional solidification of Al-20 wt.% Cu alloys on Earth and in microgravity.** Acta Materialia, v. 221, p. 117401, 2021.

NUNES, A.; GOUVEIA, G.; SPINELLI, J. **Solidification, α -Al morphologies, and tensile properties of low-Sc modified Al-Mg alloys.** Materials Characterization, v. 206, p. 113416, 2023.

PAIXÃO, J. L.; SOUSA, R.; FREITAS, P. R.; SOUSA, R. M.; LUZ, J. R.; SILVA, B. L.; SPINELLI, J. E. **Role of Zn in the Microstructure, Segregation, and Cytotoxicity of Sn-0.2 Ni Solders.** ACS Omega, v. 9, n. 8, p. 8829-8845, 2024.

RAHMAN, A.; ISANAKA, P.; LIOU, F. **A Comprehensive Study of Cooling Rate Effects on Diffusion, Microstructural Evolution, and Characterization of Aluminum Alloys.** Machines, v. 13, n. 2, p. 160, 2025.

RODRIGUES, J. A. F.; JÚNIOR, G. E. M.; BARROS, A. D. S.; ROCHA, O. F. L. D.; MOREIRA, A. L. S. **Liga hipoeutética Al-11% Si: coeficiente de transferência de calor interfacial, variáveis térmicas, parâmetros microestruturais e microdureza.** Matéria (Rio de Janeiro), v. 26, p. e13064, 2021.

SANTOS, J. R.; ARAÚJO, M. P.; VIDA, T.; CONDE, F. F.; CHEUNG, N.; GARCIA, A.; BRITO, C. **The Influence of Beryllium Incorporation into an Al-5wt.% Cu-1wt.% Si Alloy on the Solidification Cooling Rate, Microstructural Length Scale, and Corrosion Resistance.** Metals, v. 15, n. 7, p. 736, 2025.

SHEN, X.; LIU, S.; WANG, X.; CUI, C.; GONG, P.; ZHAO, L.; LI, Z. **Effect of cooling rate on the microstructure evolution and mechanical properties of Iron-Rich Al-Si Alloy.** Materials, v. 15, n. 2, p. 411, 2022.

SILVA, V.; JESUS, W.; MACIEL, A.; NASCIMENTO, G.; ALKIMIM, H.; LIMA, E.; SILVA, A. **Analysis Of Intermetallic Formation In A Multicomponent Al-Cu-Ni-Ta Alloy Solidified In An Upward Directional Device.** Revista Contemporânea, v. 5, n. 3, p. e7660-e7660, 2025.

SOUSA, S.; SALDANHA, F.; GOUVEIA, G.; GARCIA, A.; SPINELLI, J. E. **NbB refining capability: Effects of slow and rapid solidification on dendritic spacings and grain sizes of a 6201 alloy.** Materials Letters, v. 315, p. 131960, 2022.

YANG, Q.; SHI, W.; WANG, M.; JIA, L.; WANG, W.; ZHANG, H. **Influence of cooling rate on the microstructure and mechanical properties of Al-Cu-Li-Mg-Zn alloy.** Journal of Materials Research and Technology, v. 25, p. 3151-3166, 2023.

ZHANG, G.; LUO, X.; LI, Y.; LIU, S. **Comparative study of gravity effects in directional solidification of Al-3.5 wt.% Si and Al-10 wt.% Cu alloys.** npj Microgravity, v. 10, n. 1, p. 114, 2024.

ZHAO, K.; LIU, X.; FANG, Y.; GUO, E.; KANG, H.; HAO, Z.; WANG, T. Multiscale microstructures, mechanical properties and electrical conductivity of in-situ dual-size TiB₂ particles reinforced 6201 aluminum matrix composites. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 23, p. 5459-5473, 2023.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar sua gratidão pelo apoio financeiro concedido pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Brasil. Agradecemos também ao Núcleo de Processamento de Materiais (NPM), à Universidade Federal do Pará (UFPA) e ao Instituto Federal do Pará (IFPA) pela infraestrutura de pesquisa, instalações laboratoriais e apoio institucional que tornaram este trabalho possível. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.