

Influência de Aspectos de Solidificação e Teor de Solutos na Temperatura de Corte de Ligas Al-x%Cu (x = 3, 6 e 8)

Influence of Solidification Aspects and Solute Content on the Cutting Temperature of Al-x%Cu Alloys (x = 3, 6 and 8)

Sanderson Dias Maués

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0797-853X>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: sandersonmaues14@gmail.com

André Cruz da Costa Maciel

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9445-5128>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: andreccm10@gmail.com

Afonso e Souza Silva

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7228-7618>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: afonso.silva@itec.ufpa.br

Hérciles Ruiliman Oliveira de Souza

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0947-6384>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: hericlesoliveira.ho@gmail.com

Nádia Silva Cosmo

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9429-3987>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: nadia12188@gmail.com

Angela de Jesus Vasconcelos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2026-4025>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: angelavasconcelos@live.com

Maria Adrina Paixão de Souza da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7202-4541>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: adrina@ufpa.br

RESUMO

Usinagem é provavelmente o processo de fabricação mais amplamente utilizado e os metais e ligas formam a grande parte de materiais processados. Com a crescente demanda da indústria moderna para materiais com melhores propriedades e melhor facilidade de usinagem, o controle da cinética do processo de solidificação de metais e ligas metálicas vem a cada dia se consolidando como um objeto de estudo de extrema importância para a obtenção de materiais com propriedades homogêneas e cada vez mais adequadas à sua utilização prática. A partir da técnica da solidificação direcional em regime transiente de extração de calor, que engloba a maioria dos processos industriais, bem como o ensaio de sangramento que permite analisar diversos parâmetros e correlacionar os mesmos, este trabalho apresenta um estudo experimental com o objetivo de investigar termicamente o sangramento das ligas Al-3%Cu, Al-6%Cu e Al-8%Cu solidificadas em um dispositivo de solidificação direcional horizontal, analisando a interrelação entre as variáveis térmicas, espaçamentos dendríticos secundários (λ_2) e temperatura de corte, por exemplo.

Palavras-chave: Ligas Al-Cu; Espaçamento dendrítico secundário; Usinagem; Sangramento.

ABSTRACT

Machining is arguably the most widely used manufacturing process, with metals and alloys comprising the bulk of processed materials. With the growing demand of the modern industry for materials with improved properties and machining ease, controlling the kinetics of the metal and metallic alloy solidification process is increasingly becoming a subject of paramount importance for obtaining materials with homogeneous properties and increasingly suitable for practical use. Through the technique of directional solidification under transient heat extraction conditions, which encompasses most industrial processes, as well as the necking test that allows for the analysis of various parameters and their correlation, this work presents an experimental study aimed at thermally investigating the necking of Al-3%Cu, Al-6%Cu, and Al-8%Cu alloys solidified in a horizontal directional solidification device, analyzing the interrelationship between thermal variables, secondary dendrite spacings (λ_2), and cutting temperature, for example.

Keywords: Al-Cu alloys; Secondary dendrite spacing; Machining; Necking.

INTRODUÇÃO

A produção industrial moderna depende significativamente da capacidade de fabricar componentes com propriedades mecânicas e físicas adequadas para suas aplicações específicas. Entre os materiais metálicos amplamente utilizados nesse contexto, o alumínio e suas ligas desempenham um papel crucial. A versatilidade desses materiais, combinada com suas propriedades únicas, os torna indispensáveis em uma ampla gama de setores, incluindo aeroespacial, automotivo, construção civil, entre outros.

A capacidade de modificar as propriedades das ligas de alumínio por meio da adição de elementos de liga, como o cobre, é uma das características mais marcantes desses materiais. Essa capacidade permite ajustar uma série de características, desde o ponto de fusão até a resistência mecânica, permitindo que sejam adequados a diferentes exigências de aplicação. Em particular, o aumento do teor de cobre em ligas de alumínio promove um aumento contínuo na dureza, embora a resistência e, especialmente, a ductilidade, dependam da distribuição do cobre na matriz metálica (TOTTEN e MACKENZIE, 2003).

No entanto, a usinabilidade dessas ligas é um aspecto crucial a ser considerado em sua aplicação industrial. A usinabilidade pode ser definida como a facilidade ou dificuldade de usinar um material e é influenciada por uma série de fatores, incluindo o acabamento superficial, vida da ferramenta, taxa de metal removido, forças de corte, forma do cavaco, temperatura de corte, etc. (GONÇALVES, 2012). A temperatura de corte, por sua vez, está intimamente relacionada à estrutura de solidificação do material durante seu processo de fabricação.

A solidificação é um fenômeno fundamental na metalurgia e desempenha um papel crucial na determinação das propriedades finais do material. A estrutura formada durante o processo de solidificação influencia diretamente as propriedades mecânicas e de fabricação do material resultante. Portanto, entender e controlar esse processo é essencial para garantir a qualidade e o desempenho dos produtos fabricados. (CHALMERS, 1968; OHNO, 1976; DIETER, 1988; O'DELL *et al.*, 1999; QUARESMA *et al.*, 2000)

O controle das variáveis térmicas durante o processo de solidificação, como a velocidade de deslocamento da isoterma liquidus (V_L), a taxa de resfriamento (T_R) e o gradiente de temperaturas (G_L), é fundamental para obter a microestrutura desejada no material final. No entanto, é importante notar que a maioria dos estudos experimentais sobre solidificação na literatura baseia-se em condições estacionárias de troca de calor, enquanto a maioria dos processos industriais ocorre em condições transitórias (GARCIA, 2007). Isso sugere a necessidade de investigar como essas condições transitórias afetam o processo de solidificação e, por consequência, a usinabilidade das ligas de alumínio-cobre.

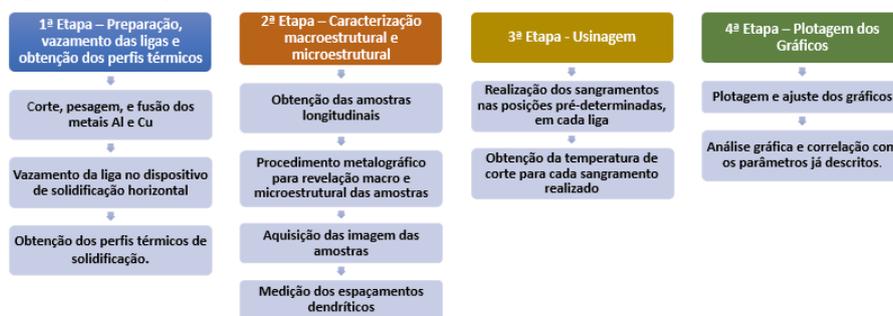
Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo investigar termicamente o processo de solidificação das ligas Al-3%Cu, Al-6%Cu e Al-8%Cu em um dispositivo de solidificação direcional horizontal. Pretende-se analisar a interrelação entre as variáveis térmicas, os espaçamentos dendríticos secundários (λ_2), o teor de soluto e a temperatura de corte, visando contribuir para o entendimento e otimização dos processos de fabricação de componentes em ligas Al-Cu, tão relevantes para a indústria atual.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para as análises deste trabalho, utilizaram-se os corpos de prova resultantes de ensaios de processo de solidificação direcional horizontal. Inicialmente, uma descrição do dispositivo de solidificação direcional horizontal usado é realizada, seguida da preparação das ligas estudadas neste trabalho, os equipamentos e softwares utilizados, a obtenção das variáveis térmicas de solidificação (V_L e T_R), bem como a caracterização microestutural das ligas. Por fim, a descrição do processo de usinagem e análise da temperatura de corte, bem como a correlação com os parâmetros térmicos e

microestruturais, além da plotagem dos gráficos. Vale ressaltar que para as análises processadas neste trabalho, foram utilizadas as amostras resultantes do processo de solidificação direcional horizontal, bem como os parâmetros térmicos e microestruturais do trabalho de Barros (2016) referente a liga Al-3%Cu e Dias Filho (2012) para a liga Al-6%Cu. As informações de temperatura de corte da liga Al-3%Cu foram obtidos em Rodrigues e Ribeiro (2014). Já para a liga Al-6%Cu, a temperatura de corte foi obtida em Silva (2021). E por fim, para a liga Al-8%Cu, a temperatura de corte foi obtida pelo processo de usinagem através dos sangramentos realizados. As Figuras 1 e 2 ilustram, de forma esquemática, a descrição das etapas realizadas no decorrer dos trabalhos experimentais.

Figura 1 - Representação das etapas experimentais executadas deste trabalho



Fonte: Adaptado de Barros (2016)

Figura 2 - Representação das etapas deste trabalho

Etapas	Liga Al-3%Cu	Liga Al-6%Cu	Liga Al-8%Cu
1ª Preparação e vazamento da liga	Barros (2016)	Dias Filho (2012)	Souza (2016)
2ª Caracterização macro e microestrutural	Barros (2016)	Dias Filho (2012)	Souza (2016)
3ª Usinagem	Rodrigues e Ribeiro (2014)	Silva (2021)	Este Trabalho
4ª Plotagem dos gráficos	Silva (2021)	Silva (2021)	Este trabalho

Fonte: Adaptado de Silva (2021)

Para a liga Al-3%Cu, Barros (2016) utilizou o dispositivo de solidificação direcional horizontal refrigerado a água fabricado pela FORTELAB, tendo com projeto básico, a construção e aferição a partir do dispositivo desenvolvido pela primeira vez por Silva *et al.* (2011) e, mais recentemente, aperfeiçoado por Carvalho (2013). A liga Al-8%Cu, Magno (2018) descreve a utilização do mesmo dispositivo de solidificação horizontal usado por Barros (2016). Assim, a Figura 3 ilustra esquematicamente o dispositivo e seus componentes interligados ao sistema de aquisição de dados.

Figura 3 - Representação do conjunto que compõe o dispositivo de solidificação direcional horizontal utilizado

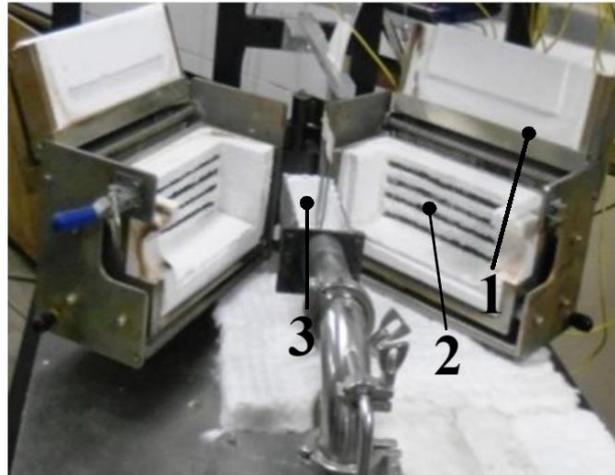


Fonte: AZEVEDO (2020)

Para a liga Al-6%Cu, Dias Filho (2012) utilizou este dispositivo de solidificação horizontal, o qual é constituído de resistências elétricas, que possui a potência controlada através de sensores de temperatura, possibilitando estabilização de diferentes níveis de superaquecimento no metal líquido, bem como fornecem um isolamento térmico adequado, evitando perdas de calor pelas laterais não refrigeradas e pela base do molde.

A seguir são mostrados detalhes dos componentes fundamentais do dispositivo de solidificação. Na Figura 4 é possível visualizar um registro fotográfico dos detalhes da parte interna do dispositivo. Já nas Figuras 5 a) e b) é apresentada a lingoteira, equipamento em que o lingote é moldado, bem como suas dimensões. E por fim, é mostrado o instrumento de medição de vazão que foi utilizado, representado na Figura 5 c).

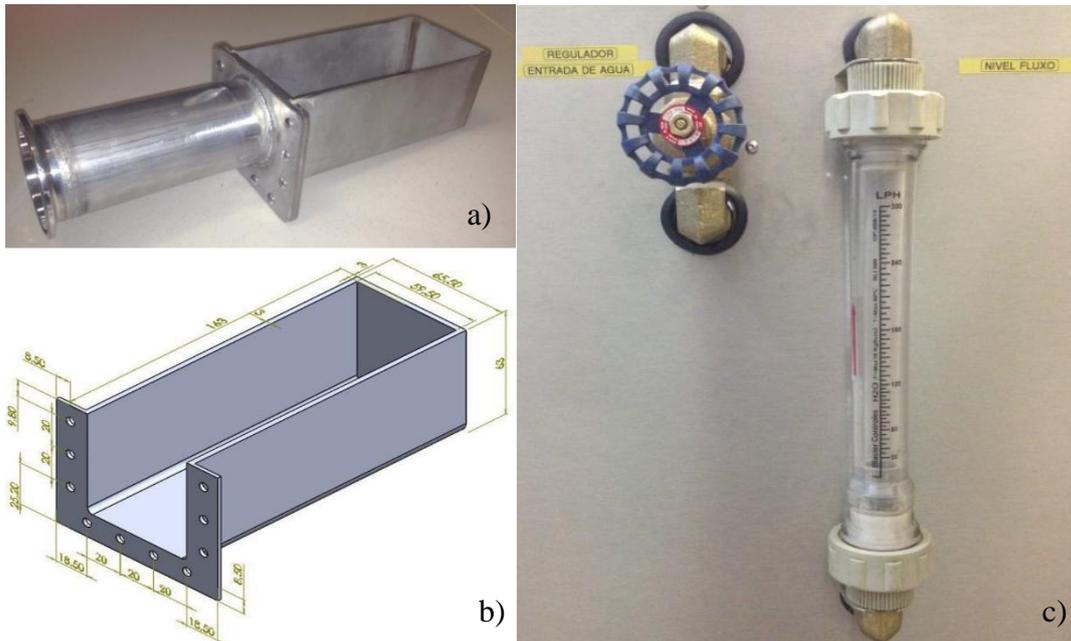
Figura 4 - Registro fotográfico da vista interna do dispositivo



- Legenda:
(1) Isolamento com blindagem em cerâmica
(2) Resistências elétricas
(3) Lingoteira

Fonte: Acervo GPMET/IFPA e GPSol/UFPA

Figura 5 - a) Lingoteira de aço inox acoplada ao tubo de resfriamento; b) Representação esquemática com detalhes dimensionais da lingoteira e c) Rotômetro controlador da vazão



Fonte: Fonte: Acervo GPMET/IFPA e GPSol/UFPA

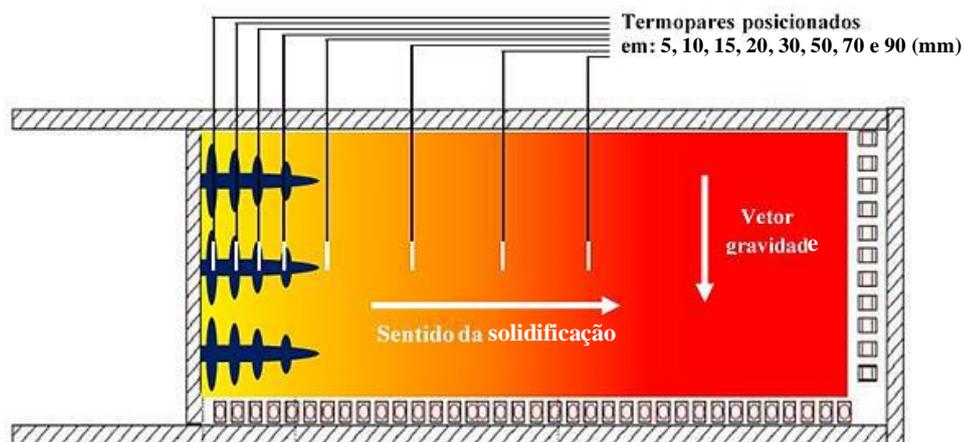
Os componentes do dispositivo de solidificação direcional horizontal são:

- balança eletrônica: utilizada para a pesagem dos componentes da liga de acordo com a concentração desejada;
- cadinho de carbeto de silício: com capacidade de 1 L, utilizado na fusão dos metais no interior do forno e realizar o vazamento da liga no dispositivo;

- forno mufla de aquecimento elétrico: com a finalidade de elevar a temperatura até a total fusão da liga metálica contida no interior do cadinho;
- termopares: tipo K com diâmetro de 1,5 mm, utilizados para mapear horizontalmente os lingotes;
- câmera de imagem térmica: utilizada para medição das temperaturas em todo o processo de sangramento;
- torno mecânico de bancada: de alto desempenho MR-320, utilizado para realização dos sangramentos;
- *software* Origin Pro 9.1: utilizado para plotagem e ajuste dos gráficos;
- bedames Rocast HSS: com dimensões 3/4" x 1/8" x 6" acoplado em um porta-bedame reto, utilizado para realização dos cortes dos sangramentos;
- *software* IR Thermometer: utilizado para realizar aquisição de dados de temperatura de corte no decorrer do experimento.

O modo de preparação, vazamento e obtenção dos perfís térmicos para as três ligas estudadas neste trabalho se deram da mesma forma com a utilização dos dispositivos de solidificação direcional horizontal já descritos. Na Figura 6 são representados os posicionamentos dos termopares em relação ao dispositivo de solidificação.

Figura 6 - Representação esquemática do posicionamento dos termopares adotados para o dispositivo de solidificação horizontal

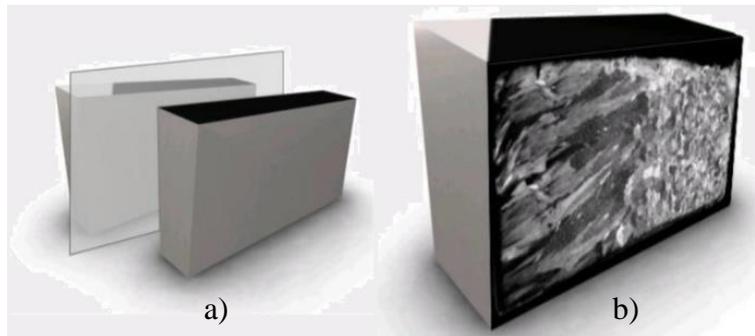


Fonte: BARROS (2016)

O procedimento para análise da macro e microestrutura se dá por meio de preparação da superfície visando uso de técnicas metalográficas que são propostas na literatura. A Figura 7 a seguir ilustra de forma esquemática o corte e a representação da

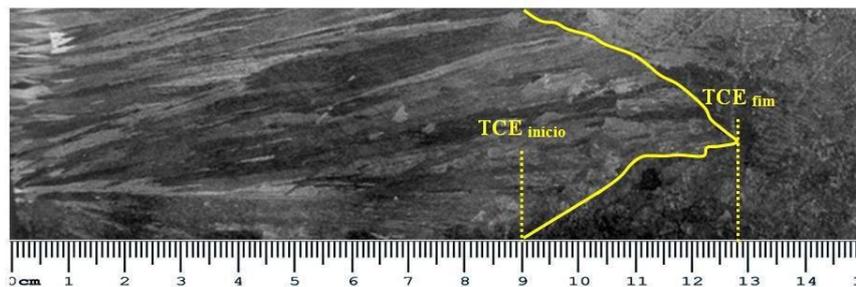
macrografia. Nas Figuras 8, 9 e 10 são apresentados os resultados dos ataques químicos que objetivam a revelação da macroestrutura e servem de subsídio para aferir a direcionalidade da solidificação para as três ligas estudadas.

Figura 7 - Representação esquemática: (a) corte perpendicular do lingote e (b) macrografia



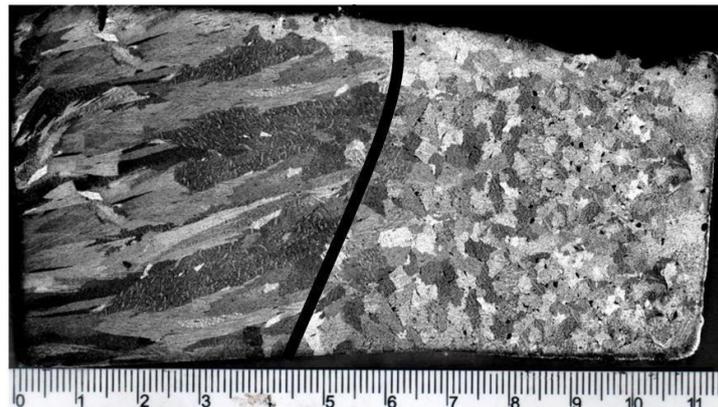
Fonte: DIAS FILHO (2012)

Figura 8 - Macroestrutura de solidificação da liga Al-3%Cu



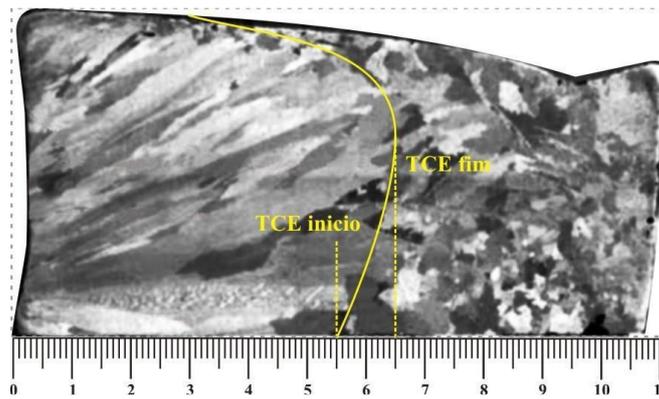
Fonte: BARROS (2016)

Figura 9 - Macroestrutura de solidificação da liga Al-6%Cu



Fonte: DIAS FILHO (2012)

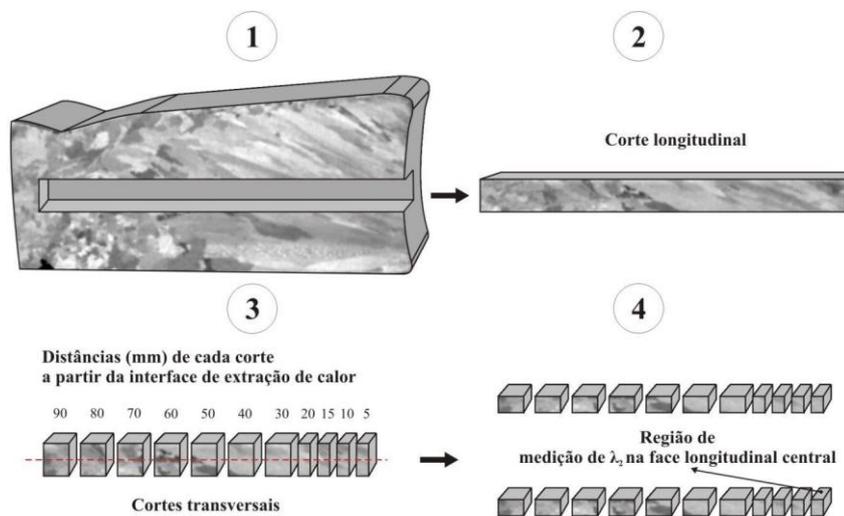
Figura 10 - Macroestrutura de solidificação da liga Al-8%Cu.



Fonte: SOUZA (2016)

Para a liga Al-8%Cu, foram realizados cortes na configuração que está apresentada na Figura 11, em que foi retirada uma seção longitudinal do lingote e seccionada em pequenos pedaços nas direções longitudinais e transversais, para caracterização microestrutural visando a obtenção e quantificação dos espaçamentos dendríticos.

Figura 11 - Ilustração do procedimento de corte para revelação da microestrutura da liga Al-8%Cu

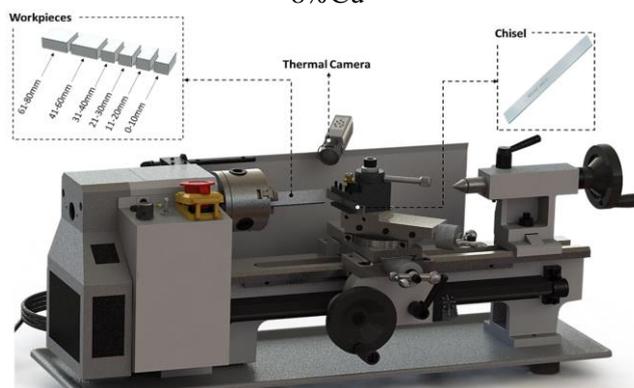


Fonte: SOUZA (2016)

Dividiu-se a seção longitudinal do lingote em quatro corpos de prova para a liga Al-8%Cu, com dimensão da seção a ser usinada de 11,44 mm x 7,9 mm. Não houve nenhum processo de torneamento para mudança de geometria da seção transversal de retangular para circular afim de evitar possíveis recristalizações e modificações da macroestrututa do lingote.

Os sangramentos (corte da amostra em um único passe) foram executados em um torno mecânico de bancada de alto desempenho, conforme é mostrado na Figura 12. Além disso, para a medição da temperatura de corte, utilizou-se uma termômetro infravermelho digital, acoplado a um computador e *software* de aquisição de dados.

Figura 12 - Ilustração do aparato experimental usado no ensaio de sangramento da liga Al-8%Cu



Fonte: Acervo GPSol/UFPA

Para o estudo em questão, além dos parâmetros de usinagem já relatados, adotou-se o avanço de 0,1 mm/rot, profundidade de corte variável, de acordo com a seção do corpo-de-prova e velocidades de corte de 28,4 m/min. Quando se fala de ferramenta de corte, foram utilizados bedames de aço rápido HSS T6 de 3/4" x 1/8" x 6", com seu polimento e retificação de fábrica, acoplado em um porta-ferramenta, um para cada sangramento.

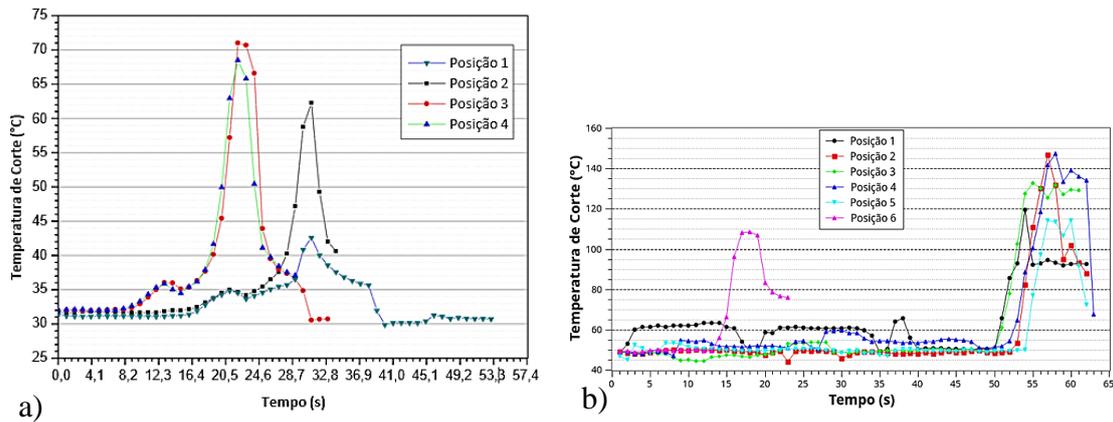
Após conclusão das etapas experimentais do ensaio de sangramento, os dados coletados pelo *software* IR Thermometer referentes às temperaturas de corte geradas no processo foram armazenados e posteriormente compilados em forma de representações gráficas para que fosse possível avaliar as características da liga Al-8%Cu, bem como proporcionar as comparações entre as mesmas. Para plotagem dos gráficos, utilizou-se o *software* Origin Pro 9.1.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figuras 13 e 14 mostram, respectivamente, os resultados da temperatura de corte em função do tempo para os quatro sangramentos realizados na liga Al-3%Cu observados por Rodrigues e Ribeiro (2014), para os seis sangramentos realizados na liga Al-6%Cu observados por Silva (2021) e para os quatro sangramentos realizados na liga Al-8%Cu deste trabalho. Em todos os casos, verifica-se um aumento da temperatura,

seguido de um grande decréscimo ao final do processo, em todos os sangramentos realizados. Os resultados deste comportamento já são conhecidos da literatura (HADDAG e NOUARI, 2013; LEAL, 2018; RODRIGUES e RIBEIRO, 2014; SILVA e WALLBANK, 1999; SILVA *et al.*, 2013).

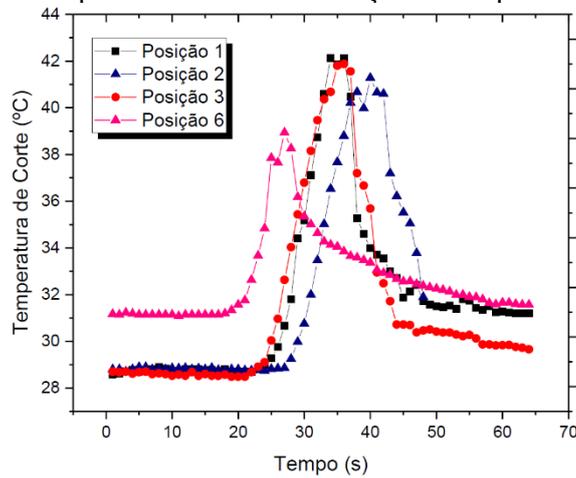
Figura 13 - a) Temperatura de corte em função do tempo da liga Al-3%Cu e b) Temperatura de corte em função da posição da liga Al-6%Cu



Fonte: a) Adaptado de RODRIGUES e RIBEIRO (2014) e b) SILVA (2021)

Nota-se que no gráfico da Figura 13 b), o antecipamento dos resultados da posição 6 deve-se à quebra da ferramenta durante o processo de sangramento.

Figura 14 - Temperatura de corte em função do tempo da liga Al-8%Cu



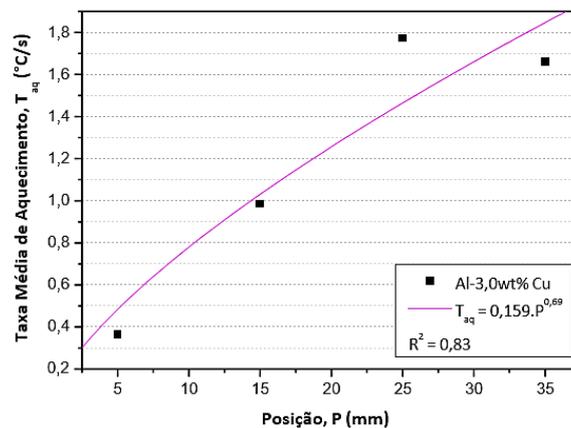
Fonte: Arquivo pessoal

Uma possível justificativa para este comportamento pode estar ligada ao fato de o sangramento ter sido realizado sem a utilização do fluido de corte, o qual reduziria a área de contato na interface cavaco-ferramenta, reduzindo a temperatura de corte (SILVA, 2021). Neste caso, com a velocidade de corte determinada e sem utilização de fluido de

corte, gerou-se um aumento na velocidade de escoamento do cavaco que, conseqüentemente, ocasionou um aumento significativo da temperatura sobre a superfície de saída da ferramenta, conforme resultados obtidos na literature (BOTELHO *et al.*, 2017; LIST *et al.*, 2005). Além disso, uma possível justificativa para o declínio da temperatura de corte no final de cada processo de sangramento seria que a velocidade de corte, sendo diretamente proporcional à rotação do torno e ao diâmetro da peça (no caso em questão, rotação constante e diâmetro na seção da amostra variando ao longo do sangramento) diminui muito ao final do sangramento, diminuindo os esforços de corte e, por conseguinte, a temperatura de corte ao final do processo (SILVA e WALLBANK, 1999).

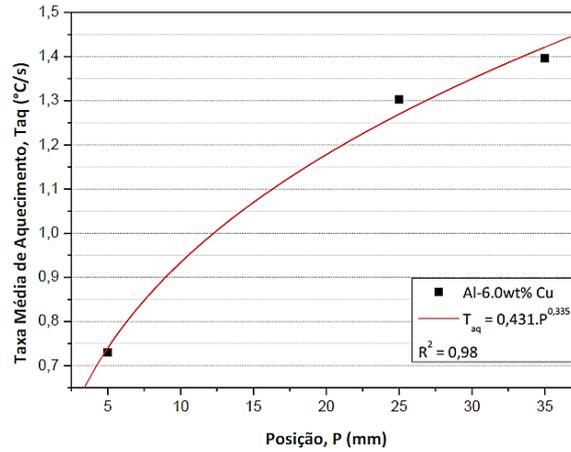
As Figuras 15 a 18 apresentam os resultados da taxa de aquecimento de corte (T_{aq}) em função da posição a partir da interface metal/molde e do espaçamento dendrítico secundário, respectivamente, para os sangramentos realizados e expostos em seus trabalhos por Rogrigues e Ribeiro (2014) e Silva (2021).

Figura 15 - Taxa de aquecimento de corte em função da posição para a liga Al-3%Cu



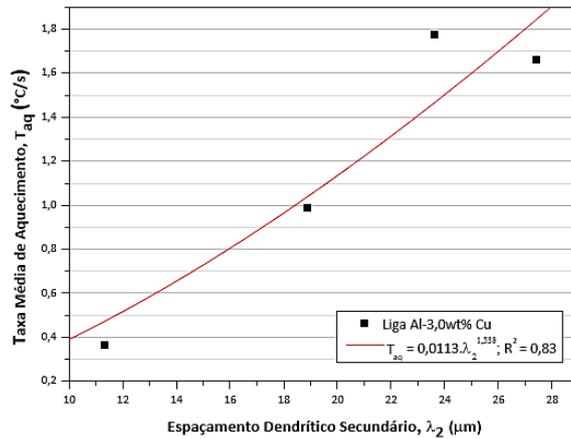
Fonte: Adaptado de RODRIGUES e RIBEIRO (2014)

Figura 16 - Taxa média de aquecimento em função da posição de corte da liga Al-6%Cu



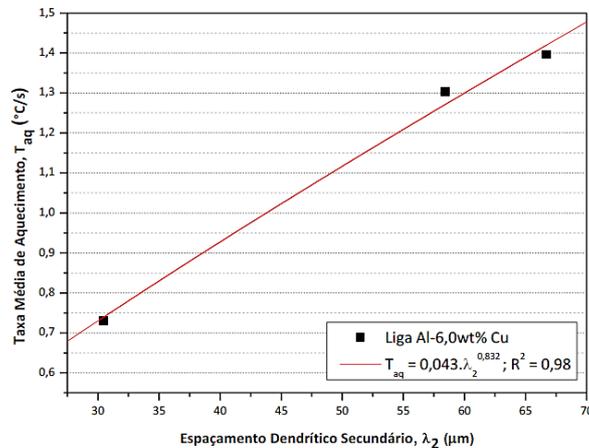
Fonte: SILVA (2021)

Figura 17 - Taxa média de aquecimento em função do espaçamento dendrítico secundários da liga Al-3%Cu



Fonte: Adaptado de RODRIGUES e RIBEIRO (2014)

Figura 18 - Taxa média de aquecimento em função do espaçamento dendrítico secundários da liga Al-6%Cu



Fonte: SILVA (2021)

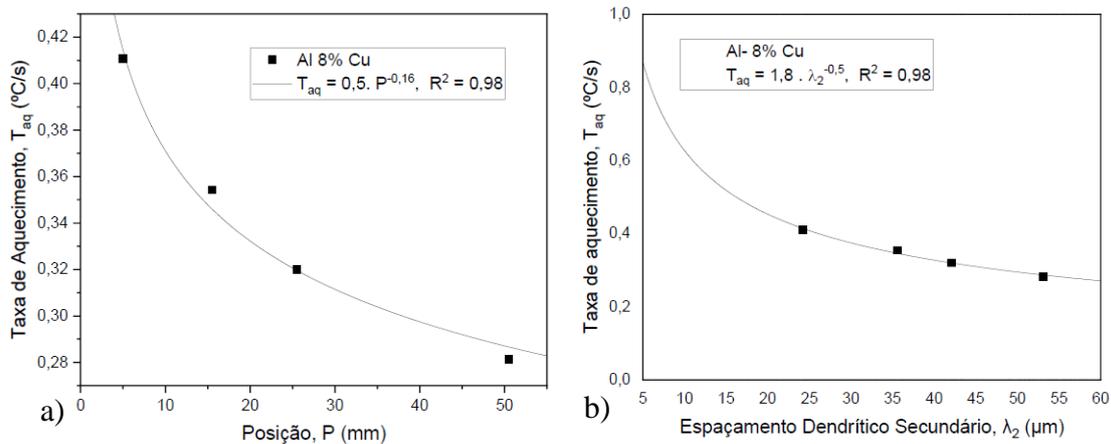
Silva (2021) explica que na região do gráfico de 0 a 35 mm (Figura 16), aproximadamente, ocorre uma tendência de crescimento nos valores de taxa de aquecimento com a posição a partir da interface metal/molde. Soares *et al.*, (2017) ao analisarem a microestrutura da liga Al-6%Cu, observaram um espessamento da fase Al₂Cu com o distanciamento da interface metal/molde. Sabe-se da literatura (FERRARESI, 2009), que a fase θ -Al₂Cu é uma fase dura, e que o processo de usinagem é realizado por conta do cisalhamento da peça e, no caso de ligas Al-Cu, cisalhamento da matriz α e da fase θ -Al₂Cu, com geração de calor. Como o cisalhamento de partículas grandes de Al₂Cu geram aquecimento excessivo durante a usinagem, provavelmente essa é a justificativa para o aumento da taxa de aquecimento de corte com o distanciamento da interface metal/molde. Da mesma forma, a mesma justificativa é válida para a liga Al-3%Cu.

Silva (2021) justifica a ausência das posições 5 e 6 nos gráficos por dois motivos principais. O primeiro é de que o ensaio referente à posição 5 da Figura 13 b), localiza-se na região de aproximadamente 50 mm, onde está compreendida a zona de transição columnar equiaxial. Esta zona é caracterizada pela instabilidade na formação microestrutural e neste caso mostra um brusco declínio na taxa média de aquecimento, inferindo que a zona TCE apresenta menor dureza, visto que nesta posição foi registrada a menor temperatura de corte. O segundo motivo apresentado pela autora para o corte na posição 6 é que está localizada a aproximadamente 80 mm em relação ao início da solidificação e neste caso não pode ser analisada devido a uma fratura antecipada, como já apresentado.

A fim de se estabelecer uma relação entre a taxa de aquecimento da ferramenta com a posição e espaçamentos dendríticos secundários, a Figura 19 a) e b) mostram os comportamentos encontrados para as posições médias e espaçamentos dendríticos secundários correspondentes às taxas de aquecimento de corte encontradas para os sangramentos da liga Al-8%Cu. Contrariamente aos resultados encontrados para as ligas Al-3%Cu e Al-6%Cu, observa-se que a taxa de aquecimento de corte diminui com o distanciamento da interface metal/molde e aumento de λ_2 . Barros *et al.* (2015), ao analisar as microestruturas das ligas Al-3%Cu e Al-8%Cu, verificou uma maior quantidade de Al₂Cu nas regiões interdendríticas da liga com maior teor de soluto, porém também com uma maior quantidade desta fase microsegregada na mistura eutética, o que pode

justificar a mudança do comportamento da taxa de corte para a liga Al-8%Cu, fazendo com que neste caso, os espaçamentos dendríticos (refinamento ou engrossamento) sejam predominantes no calor gerado durante o processo de corte.

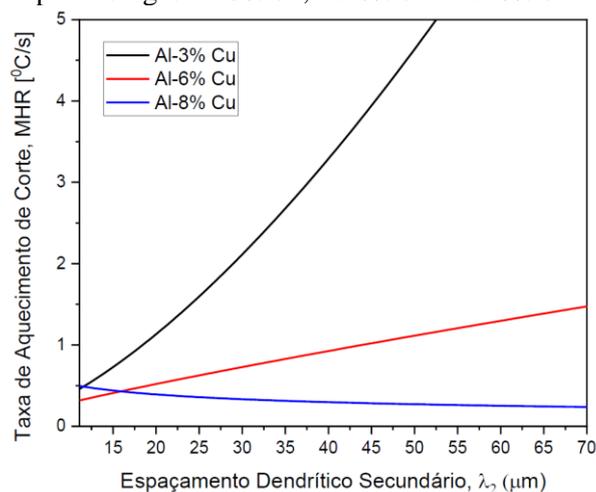
Figura 19 - a) Taxa média de aquecimento em função da posição de corte e b) Taxa média de aquecimento em função do espaçamento dendrítico secundário da liga Al-8%Cu



Fonte: Arquivo pessoal

Visando analisar a influência do teor de soluto na taxa de aquecimento de corte das três ligas analisadas, tomou-se os resultados de taxa de aquecimento de corte em função do espaçamento dendrítico secundário para análise. Dessa forma, a Figura 20 mostra o compilado dos comportamentos encontrados para os espaçamentos dendríticos secundários correspondentes às taxas de aquecimento de corte encontradas para os sangramentos das três ligas estudadas.

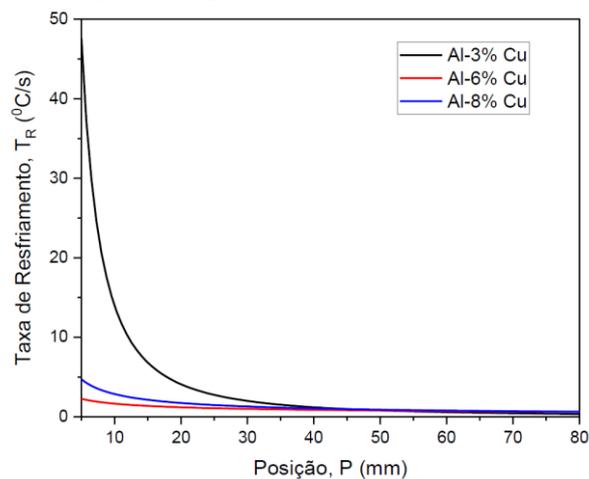
Figura 20 - Taxa de aquecimento de corte em função do espaçamento dendrítico secundário para as ligas Al-3%Cu, Al-6%Cu e Al-8%Cu



Fonte: Arquivo pessoal

Ao se analisar os resultados, observa-se um comportamento bastante interessante: a liga Al-3%Cu apresenta os maiores valores de taxa de aquecimento de corte para todos os valores de λ_2 encontrados e há uma mudança no comportamento térmico durante o processo de corte entre as ligas Al-6%Cu e Al-8%Cu, com a liga Al-6%Cu apresentando maiores valores de taxa de aquecimento de corte a partir de um valor de λ_2 de aproximadamente 15,9 μm . Sabe-se que todas as ligas são hipoeutéticas e formam a fase α -primária pró-eutética, rica em solvente e o microconstituente eutético, formado pelas fases α -Al e Al_2Cu . Para se avaliar as mudanças de comportamento ocorridas, deve-se, então, analisar tanto a quantidade e distribuição da fase Al_2Cu quanto as taxas de resfriamento impostas no processo de solidificação da liga. Na Figura 21, que mostra o compilado dos valores de taxa de resfriamento durante o processo de solidificação em função da posição a partir da interface metal/molde verifica-se que taxas de resfriamento altíssimas foram encontradas durante a solidificação da liga Al-3%Cu e as taxas de resfriamento mais baixas foram encontradas durante a solidificação da liga Al-6%Cu. As taxas vão diminuindo com o distanciamento da interface, porém com a liga Al-3%Cu apresentando uma variação muito brusca, até um momento em que todas se encontram praticamente iguais. As taxas de resfriamento influenciam tanto na quantidade de Al_2Cu que fica aprisionada na solução sólida, o que faz com que haja uma diminuição na fração do eutético, quanto na magnitude do espaçamento dendrítico secundário.

Figura 21 - Compilado dos valores de taxa de resfriamento obtidos durante o processo desolidificação das ligas Al-3%Cu, Al-6%Cu e Al-8%Cu



Fonte: Arquivo pessoal

Na liga Al-3%Cu, as altas taxas de resfriamento durante o processo de solidificação fizeram tanto com que uma quantidade maior de cobre ficasse aprisionada

na solução sólida quanto causou um refinamento da estrutura. O Al_2Cu formado, como já dito, se deposita nas regiões interdendríticas, com partículas maiores para maiores valores de λ_2 . O cisalhamento dessas partículas, como já dito, gera uma grande quantidade de calor. Esse conjunto leva tanto a taxas de aquecimento de corte maiores como o aumento dessas com o aumento de λ_2 . Na liga Al-8%Cu, menores taxas de resfriamento durante o processo de solidificação geram uma melhor distribuição das partículas de Al_2Cu na liga e maiores espaçamentos dendríticos. Dessa forma, ainda que essa liga possua maior dureza, por conta do aumento do teor de soluto e, conseqüentemente, das partículas de Al_2Cu , houve tempo para migração dentro do eutético, resultando em magnitudes da fase menores e mais bem distribuídas, diminuindo as taxas de aquecimento corte tanto em relação à liga Al-3%Cu quanto com o aumento de λ_2 na própria liga. Já para a liga Al-6%Cu, as menores taxas de resfriamento durante o processo de solidificação, como já mencionado, resulta em melhores distribuições de partículas, que com o teor de soluto menor em relação à liga Al-8%Cu, resulta em menores esforços de corte no início do processo. As baixas taxas de resfriamento, entretanto, ocasionam maiores valores de espaçamento dendrítico e magnitudes mais altas da fase Al_2Cu nas regiões interdendríticas, aumentando os esforços para o cisalhamento da fase e, conseqüentemente, aumentando a geração de calor, o que foi suficiente para aumentar a taxa de aquecimento de corte em relação à liga Al-8%Cu a partir de determinado momento.

CONCLUSÕES

Os resultados encontrados neste trabalho permitem concluir que:

- O processo de sangramento segue o mesmo padrão para todas as ligas, com um aumento de temperatura, seguido de um decréscimo ao final do processo;
- As ligas hipoeutéticas Al-3%Cu e Al-6%Cu apresentam um comportamento semelhante durante o processo de sangramento, com o aumento da taxa de aquecimento de corte com o aumento de λ_2 . Os resultados puderam ser expressos por leis do tipo potência, com excelentes coeficientes de correlação;
- A liga hipoeutética Al-8%Cu apresentou um comportamento diferente das ligas anteriormente descritas, com a diminuição da taxa de aquecimento de corte com o aumento de λ_2 . Os resultados também puderam ser expressos por leis do tipo potência, com excelentes coeficientes de correlação;

- Padronizando-se os outros parâmetros, observa-se que tanto o teor de soluto quanto as taxas de resfriamento impostas durante o processo de solidificação e a magnitudee morfologia das fases formadas são importantes para a maior ou menor geração de calor durante o processo de sangramento das ligas Al-Cu estudadas, com a combinação deles sendo um diferencial para esse critério de usinabilidade;
- É possível produzir ligas com maior dureza e resistência mecânica, melhorando também a usinabilidade, analisando o critério de temperatura de corte. A liga Al-8%Cu possui maior resistência mecânica do que as duas outras, porém a programação prévia do processo de solidificação com taxas que resultem em maiores espaçamentos dendríticos pode acabar resultando em menores taxas de aquecimento de corte;
- Para os critérios de solidificação e microestrutura das ligas apresentadas, os melhores resultados foram obtidos para a liga Al-8%Cu, a qual apresentou temperaturas de corte bem abaixo das demais ligas e também uma menor taxa de aquecimento por λ_2 .

REFERÊNCIAS

AZEVEDO, Hugo. Efeito Dos Parâmetros Térmicos e Microestruturais na Resistência ao Desgaste Micro-Abrasivo da Liga Al-7%Si-0.3%Mg. 2020. 89 f. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Bacharelado em Engenharia de Materiais) Instituto Federal do Pará, Belém, 2020.

BARROS, A. S. Coeficiente de transferência de calor interfacial, crescimento dendrítico secundário e microdureza da liga Al-3%Cu solidificada direcionalmente. **Trabalho de Conclusão de Curso**, Universidade Federal Do Pará, 2016.

BARROS, A. S., Magno, I. A., Souza, F. A., Mota, C. A., Moreira, A. L., Silva, M. A., e Rocha, O. L. Measurements of microhardness during transient horizontal directional solidification of Al-Rich Al-Cu alloys: Effect of thermal parameters, primary dendrite arm spacing and Al₂Cu intermetallic phase. **Metals and Materials International**, 21(3), 429– 439, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12540-015-4499-2>

CARVALHO, D. L. B. Correlação entre parâmetros térmicos e espaçamentos dendríticos primários de ligas Al-Si durante a solidificação direcional horizontal. Belém: 2013. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)** – Faculdade de Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

CHALMERS, B. The structure of ingots. **The journal of the australian institute of metals**. 8: 255, 1968.

DIAS FILHO, J. M. da S. Análise Teórico-Experimental dos Espaçamentos Dendríticos Primários e Secundários da Liga Al-6%Cu Solidificada Unidirecionalmente sob Condições Transitórias de Extração de Calor. **Trabalho de Conclusão de Curso**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, 2012.

DIAS FILHO, J. M. da S. Análises Térmica e Microestrutural na Solidificação de Ligas Monofásica e Peritéticas do Sistema Zn-Ag 63/2013. **Dissertação de Mestrado** Universidade Estadual de Campinas, 2013.

DIETER, George E. Mechanical metallurgy. **SI Metric Edition**, 1988.

GARCIA, A. SOLIDIFICAÇÃO Fundamentos e aplicações (2a). **Editora UNICAMP**, 2007.

GONÇALVES, R. A. Investigação a Usinabilidade das Ligas de Alumínio da Série 6XXX. 107 f. **Dissertação de Mestrado**, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

HADDAG, B.; NOUARI, M. Tool wear and heat transfer analyses in dry machining based on multi-steps numerical modelling and experimental validation. **Wear**. 302, 1158–1170, 2013.

LEAL, L. R. M. Análise comparativa da usinabilidade de ligas à base de alumínio: Influência do elemento de liga e do teor de soluto no desgaste da ferramenta. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal do Pará, 2018.

LIST, G., Nouari, M., Gehin, D., Gomez, S., Manaud, J., Petitcorps, Y., e Girot, F. Wear behaviour of cemented carbide tools in dry machining of aluminium alloy. **Wear**, 259, 1177–1189, 2005.

O'DELL, S. P.; DING, G. I.; TEWARI, S. N. Cell/dendrite distribution directionally solidified hypoeutectic Pb-Sb alloys. **Metallurgical and materials transactions A**. v. 30A, pp. 2159- 2165, 1999.

OHNO, A. The solidification of metals. Japan: ChijinShokan, 1976.

QUARESMA, J.M.V.; SANTOS, C. A.; GARCIA, A. Correlation between unsteady-state solidification conditions, dendrite spacings and mechanical properties of Al-Cu alloys. **Metallurgical and materials transactions A**. v. 31A, pp. 3167-3178, 2000.

RODRIGUES, D. C., e RIBEIRO, L. J. M. Análise da temperatura de corte no sangramento das ligas Al-1,2%Pb, Al-3%Cu, Al-3%Si solidificadas em um dispositivo direcional horizontal. **Trabalho de Conclusão de Curso**. Universidade Federal do Pará, 2014.

SILVA, B. ARAUJO, I.; SILVA, W.; GOULART, P.; GARCIA, A.; SPINELLI, J. Correlation Between Dendrite Arm Spacing And Microhardness During Unsteady-State Directional Solidification of Al-Ni alloys. **Philosophical Magazine Letters (Print)**, v. 91, p. 337-343, 2011.

SILVA, C. A. P. Correlação entre os parâmetros térmicos, microestruturais e de usinabilidade da solidificação transiente horizontal direcional da liga Al-7%Si. **Trabalho de Conclusão de Curso** - Universidade Federal Do Pará, 2015.

SILVA, S. L. de P. Análise Comparativa de Usinabilidade de Ligas à Base de Alumínio Com Diferentes Teores de Cobre. **Trabalho de Conclusão de Curso**. Universidade Federal do Pará, 2021.

SOARES, D. C. de B. L., BARROS, A. S., DIAS FILHO, J. M. S., MOREIRA, A. L. S., FILHO, J. C., SILVA, M. A., e ROCHA, O. F. L. The Role of Thermal and Microstructural Parameters on Corrosion Resistance of Unsteady-State Horizontally Solidified Aluminum-Copper Hypoeutectic Alloys. **International Journal of Electrochemical Science**. 2017, 12, 413–428. DOI: <https://doi.org/10.20964/2017.01.63>

SOUZA, F. V. A de. Variáveis Térmicas, Microestrutura E Microdureza De Uma Ligahipoeutética Al-Cu Solidificada Direcionalmente. **Trabalho de Conclusão de Curso**. Instituto Federal De Educação, Ciência E Tecnologia Do Pará, 2016.

TOTTEN, George E.; MACKENZIE, D. Scott (Ed.). Handbook of aluminum: vol. 1: physical metallurgy and processes. **CRC press**, 2003.