

## **Determinação da Transição Colunar/Equiaxial da Liga Al-8%Cu na Solidificação Unidirecional Horizontal**

**Leonardo COSTA (1); Luiz GOMES (2); Max SASAKI (3); Odilene CARDOSO (4); Vanessa BEZERRA (5); José DIAS FILHO (6); Otávio ROCHA (7).**

- (1) IFPA, Av. Almirante Barroso, 1155, Belém-Pa, e-mail: leonardoscosta@gmail.com  
(2) IFPA, Av. Almirante Barroso, 1155, Belém-Pa, e-mail: fernandogomessantos@gmail.com  
(3) IFPA, Av. Almirante Barroso, 1155, Belém-Pa, e-mail: mks\_16jp@hotmail.com  
(4) IFPA, Av. Almirante Barroso, 1155, Belém-Pa, e-mail: odilene Cardoso@hotmail.com  
(5) IFPA, Av. Almirante Barroso, 1155, Belém-Pa, e-mail: vanessa\_bezerra1@hotmail.com  
(6) IFPA, Av. Almirante Barroso, 1155, Belém-Pa, e-mail: marcelino\_dias@hotmail.com  
(7) IFPA, Av. Almirante Barroso, 1155, Belém-Pa, e-mail: otvrocha@oi.com.br

### **RESUMO**

A solidificação é um fenômeno de transformação de fases que está presente em várias etapas de um produto, sendo de extrema importância na formação do mesmo. Um metal fundido é vazado em um molde, de geometria selecionada, que será resfriado e solidificado, revelando características que dependem do tamanho de grão, do espaçamento dendrítico, da distribuição das inclusões, das porosidades e etc. Após o processo de solidificação e metalografia, macroscopicamente, dependendo da temperatura de superaquecimento as zonas coquilhada, colunar e equiaxial serão reveladas. Ao analisar um lingote submetido ao processo de solidificação percebemos a presença de duas macroestruturas distintas, a colunar e a equiaxial. Cada estrutura evidencia uma propriedade mecânica ao material, o que desencadeará na aplicabilidade do mesmo. O percentual de cada estrutura no lingote depende das condições termodinâmicas aplicadas no processo de solidificação através dos parâmetros operacionais deste processo. O trabalho vem trazer a determinação da Transição Colunar/Equiaxial (TCE) da liga Al-8%Cu submetida à solidificação unidirecional horizontal, com temperatura de vazamento ( $T_v$ ) a 10% da temperatura Liquidus ( $T_L$ ) da liga. São calculados os parâmetros térmicos de forma experimental, e analisado o comportamento da transição colunar/equiaxial através da macroestrutura da liga.

**Palavras-chave:** Transição colunar/equiaxial, Parâmetros térmicos, liga Al-8%Cu

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações Iniciais

A estrutura que se forma no processo de solidificação determina as propriedades do produto final, obtidas no processo de fundição ou em peças que serão conformadas posteriormente. Inúmeras variáveis determinarão suas propriedades, tais como tamanho de grão, espaçamentos dendríticos, heterogeneidades da composição química, teor de soluto (no caso de ligas). Essas variáveis são obtidas conforme os parâmetros adotados no sistema de solidificação. Basicamente dois tipos de grãos são encontrados em um lingote submetido ao processo, os grãos equiaxiais e os colunares. A determinação da faixa de cada um deles no lingote é importante quando falamos nas propriedades resultantes e na aplicabilidade do material resultante.

## 1.2 Grãos Colunares e Equiaxiais

A macroestrutura de solidificação de peças fundidas ou lingotes pode apresentar-se na forma de grãos completamente colunares ou totalmente equiaxiais, dependendo da composição química da liga e das condições de solidificação. Essa forma mista de solidificação ocorre quando os grãos equiaxiais encontram condições de nuclear e crescer no líquido, à frente da fronteira colunar de crescimento, provocando a transição colunar/equiaxial (TCE).

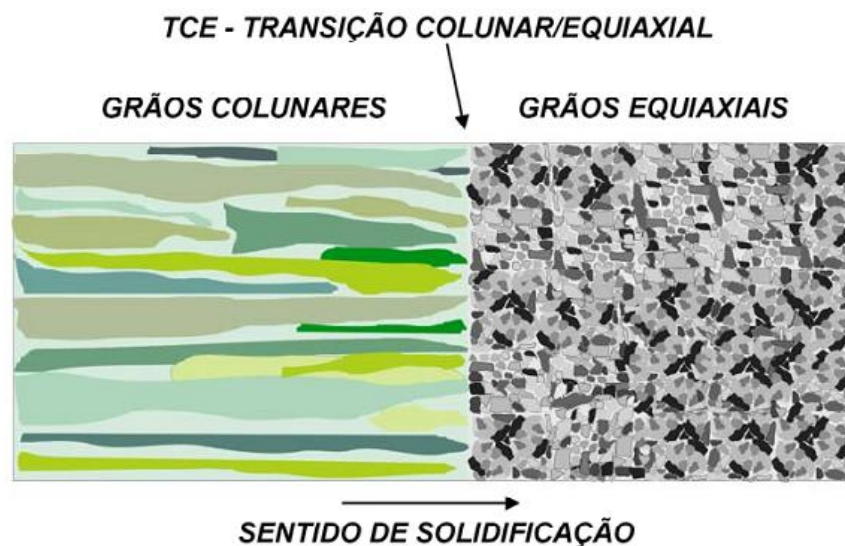


Figura 1 – Macroestrutura com transição colunar/equiaxial (GARCIA, 2005)

A previsão dessa transição é de grande interesse na programação das propriedades mecânicas de produtos fundidos. Peças com estrutura completamente equiaxiais são mais apropriadas para aplicações onde a isotropia de propriedades físicas e mecânicas é necessária. Por outro lado, a anisotropia das propriedades das estruturas colunares permite aplicações tecnológicas importantes como, por exemplo, no crescimento de palhetas de turbinas de motores a jato, onde o crescimento colunar deve coincidir com a direção de máxima solicitação mecânica durante o funcionamento das turbinas.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A solidificação é a mudança de estado físico de uma substância de líquido para sólido, no caso de solidificação dos metais e suas ligas, com a influência da liberação de calor latente e outros parâmetros termodinâmicos consideráveis, pode-se analisar o comportamento do material através de análises micro e macroscópicas.

“A solidificação dos metais e ligas metálicas é caracterizada por uma transformação de fase com mudança de estado, em que uma fase líquida se transforma em uma fase sólida, quando as condições termodinâmicas são tais que o sólido apresenta menor energia livre, sendo, portanto mais estável. A solidificação de metais e ligas dá-se através da nucleação e do crescimento de partículas da fase sólida no interior da fase líquida.” (Rezende, 2006)

Com a fusão dos metais, a viscosidade sofre uma queda considerável, fazendo com que o metal líquido tenha a capacidade de ser acomodar em um molde de geometria determinada proporcionando o formato de uma peça semi-acabada. No lingotamento, o metal líquido é vazado em um molde de geometria mais simples, podendo ter as seções quadradas, retangulares ou cilíndricas.

No caso de estrutura, a estrutura que será formada após a solidificação influenciará nas propriedades do produto final, como por exemplo, em produtos como chapas e fios. Alguns autores trabalham com a idéia de que os defeitos de estrutura bruta de solidificação são eliminados durante a conformação plástica, mas na prática não é isso que ocorre, pois mesmo que alguns defeitos desapareçam macroscopicamente devido a este processo, geralmente a maioria deles prolonga-se até o produto final.

Com relação às características mecânicas do produto, segundo Garcia, dependem do tamanho de grão, espaçamento dendrítico, espaçamentos lamelares ou fibrosos, das heterogeneidades de composição química, do tamanho, forma e distribuição das inclusões, porosidades e etc.

No processo de solidificação, a temperatura de vazamento do metal líquido surge como uma primeira variável de influência correlacionada com as correntes convectivas no decorrer do preenchimento do molde. O molde atua como absorvedor de calor, extraindo diretamente calor do metal, promovendo o processo de transformação de estado.

Ao final do processo de solidificação, macroscopicamente podemos observar a presença das chamadas zonas, classificadas como coquilhada, colunar e equiaxial. Quando o metal líquido é vazado em uma lingoteira, a parte que entra em contato com as paredes frias da lingoteira é rapidamente super-resfriada, resultando em uma nucleação intensa de grãos cristalinos de orientação aleatória, esta camada de pequenos grãos finamente dispersos e localizados na superfície do lingote é denominada zona coquilhada. A zona colunar caracteriza-se por um crescimento de dendritas orientadas e em equilíbrio térmico com o líquido, e crescem mais rápido do que o calor latente fluindo para as paredes do molde. No caso da zona equiaxial, surge a partir do líquido presente na parte central do lingote tornando-se super-resfriado, tanto por efeito térmico quanto por constitucional, ocorrendo em qualquer embrião de sólido crescendo aleatoriamente.

Os grãos equiaxiais exercem um crescimento competitivo com a frente colunar, de tal forma que, se os cristais equiaxiais forem pequenos, eles são adicionados a essa frente e passam a crescer de forma colunar dendrítica. A determinação do ponto onde ocorre a transição colunar-equiaxial é importante no planejamento tanto de processo quanto de propriedades do produto final. Logo, alguns mecanismos de surgimentos dessa transição são levados em consideração como: superaquecimentos crescentes, resfriamento na interface metal/molde, taxas de resfriamento, teor de soluto na composição química da liga e um parâmetro de super-resfriamento constitucional.

## 3. METODOLOGIA

A figura 2 apresenta o dispositivo de solidificação unidirecional horizontal refrigerado à água utilizado na obtenção do lingote em estudo.



Figura 2- Dispositivo de solidificação unidirecional horizontal

A liga foi fundida em um forno elétrico tipo mufla à resistência. Inicialmente, foram colocados os materiais constituintes em proporção exata em um cadinho de silício, revestido internamente por uma camada protetora de tinta à base de caulim, na proporção 75% de caulim e 25% de água. O forno foi programado a uma temperatura de superaquecimento de 10% acima da temperatura liquidus da liga (700,7°C).

Após o processo de obtenção dos lingotes preparou-se as amostras dos lingotes visando à análise macroestrutural da liga com o intuito de avaliar a existência da transição colunar-equiaxial induzida pelas condições de solidificação, através de técnicas metalográficas.

Os lingotes foram seccionados longitudinalmente e posteriormente polidos em lixadeira manual utilizando-se lixas d'água de carbeto de silício de granulometrias variáveis em uma seqüência crescente determinada (100,220,320,400 e 600 mesh).

Após a última operação de lixamento, utilizou-se álcool etílico 99°Gl na limpeza da superfície da liga, com o objetivo de eliminar resíduos e machas existentes, e ao mesmo tempo, obter uma superfície seca evitando oxidação.

Por fim, as superfícies da amostra foi atacada com reagente químico adequado, cuja composição foi 5ml HF, 1,5 ml HNO<sub>3</sub>, 3ml HCl e 90,5 ml H<sub>2</sub>O .

Os respectivos ataques foram realizados por imersão da superfície da amostra durante aproximadamente um minuto, tempo suficiente para a revelação da macroestrutura solidificada.

## 4. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

### 4.1 Perfil de Temperatura

Os perfis de temperatura da liga foram obtidas através do registro de temperaturas a cada segundo até a completa solidificação da liga. Os dados foram armazenados em um registrador de temperaturas do tipo AMR-CONTROL, marca ALMEMO. Os dados armazenados no mesmo foram tratados em software específico para plotagem da curva como na Figura 3.

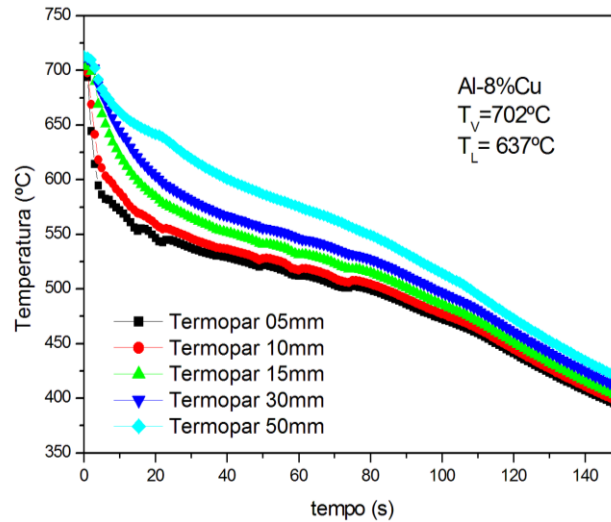


Figura 3 – Curva de Resfriamento da liga Al-8%Cu

#### 4.2 Determinação dos parâmetros térmicos de solidificação Velocidade da Isoterma Liquidus e Taxa de Resfriamento (VL e T)

Foi gerada uma função da potência da posição em função do tempo (equação 01), conforme figura 4, onde a derivada desta função (equação 02) permitiu a obtenção da velocidade de resfriamento da isoterma liquidus em função do tempo (equação 03) e, a partir desta função, foi obtida uma relação da equação 04, cujo comportamento da mesma é observada. A Figura 5 representa a evolução da velocidade de deslocamento da isoterma liquidus em função da posição em relação à interface metal/molde, nas quais se verifica a diminuição da velocidade da isoterma liquidus para as posições mais afastadas da câmara refrigerada. Isso pode ser facilmente explicado em função do aumento crescente da resistência térmica da camada solidificada com a evolução do processo de solidificação. A Figura 6 mostra o comportamento experimental das taxas de resfriamento com a posição da isoterma liquidus. Igualmente ao comportamento da  $V_L$ , os valores da  $\dot{T}$  são menores para posições mais afastadas da interface metal/câmara de refrigeração.

$$P=f(t) \quad [\text{Eq. 01}]$$

$$V_L=dP/dt \quad [\text{Eq. 02}]$$

$$V_L=f(t) \quad [\text{Eq. 03}]$$

$$V_L=f(P) \quad [\text{Eq. 04}]$$

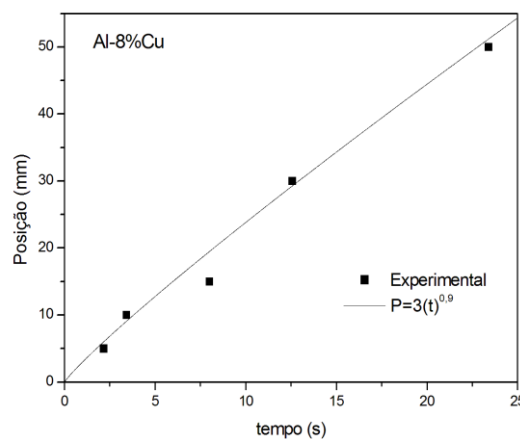


Figura 4- Posição da Isoterma liquidus em função do tempo

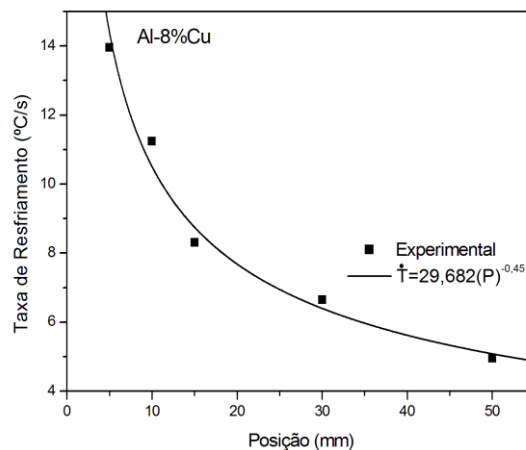


Figura 5- Taxa de resfriamento em função da posição da isoterma liquidus para a liga Al- 8%Cu

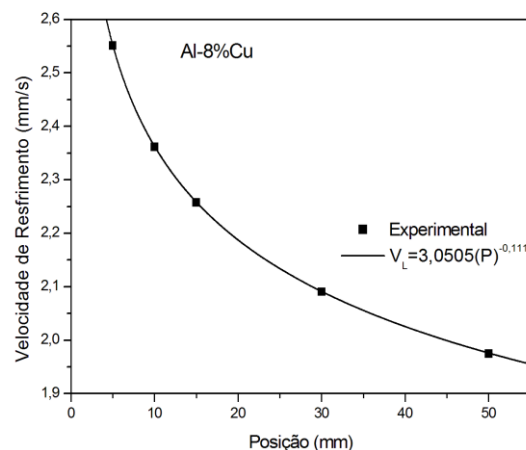


Figura 6-Velocidade da Isotherma liquidus em função da posição da isoterma liquidus para a liga Al-8%Cu

#### 4.3 Análise da transição colunar/equiaxial (TCE) e sua correlação com os parâmetros térmicos da solidificação

A Transição Colunar/Equiaxial (TCE) é dependente das variáveis térmicas de solidificação (  $V_L$  e  $\dot{T}$  ), sendo que estas variam com o tempo e a posição da isoterma liquidus durante o processo de mudança de fase.

#### 4.4 Análise da macroestrutura

A figura 7 apresenta a macroestrutura característica obtida no experimento para a liga Al-8% Cu. Verifica-se o surgimento da transição colunar-equiaxial a partir da interface metal/molde para tal composição de Cu. Os grãos equiaxiais exercem um crescimento competitivo com a frente colunar, de tal forma que, se os cristais equiaxiais forem pequenos, eles são adicionados a essa frente e passam a crescer de forma colunar dendrítica, enquanto, se a zona super-resfriada à frente da interface colunar for relativamente grande e com alta densidade de cristais, esses grãos equiaxiais tem tempo suficiente para formar uma fração volumétrica suficientemente alta a ponto de bloquear o crescimento colunar ( Garcia, 2001).



Figura 7-Macroestrutura de solidificação para a liga Al- 8% Cu

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo teórico-experimental desenvolvido neste trabalho, somado às comparações realizadas tendo como referência outros trabalhos anteriormente realizados sobre o assunto, permitem que sejam extraídas as seguintes conclusões:

- A velocidade experimental da isoterma liquidus, para a composição estudada, diminui para posições mais afastadas da interface metal/molde.
- No caso investigado os valores encontrados para a taxa de resfriamento são menores para posições mais afastadas da interface metal/molde.
- O super-aquecimento de 10% gera condições termodinâmicas para o crescimento de grãos colunares em relação aos grãos equiaxiais.

## REFERÊNCIAS

GOMES, R. **Transformações de fases em materiais metálicos**. 1. Ed. São Paulo: Editora Unicamp, 2006

GRACIA, A. **Solidificação: fundamentos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Editora da Unicamp, 2001.

ROCHA, O.F. **Análise Teórico Experimental da Transição Celular/Dendrítica e da Evolução da Morfologia Dendrítica na Solidificação Unidirecional em Condições de Fluxo de Calor. Transitório**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2003.