

- Siqueira, C. A., Cheung, N., Garcia, A., 2002, "Solidification Thermal Parameters Affecting the Columnar-to.Equaxed Transition", Metallurgical Materials Transaction A, Vol. 33, pp. 2107-2118.
- Southin, R. T., 1967, "Dynamic Nucleation of solidifying metals". Proceedings of the Conference on the Solidification of Metals, ISI Publication, Vol.110, pp. 305-308.

## **INFLUENCE OF FORCED CONVECTION AND OF THE SUPERHEATING IN THE MACROESTRUCTURE FORMATION IN NON-FERROUS EUTECTICS ALLOYS**

**Evaldo Júlio Ferreira Soares  
Otávio Fernandes de Lima Rocha  
João Lobo Peralta**

Centro Federal de Educação Tecnológica do Pará  
Av. Almt. Barroso, n.<sup>o</sup> 1155, Belém/Pa

**Antônio Luciano Seabra Moreira**  
Universidade Federal do Pará  
Rua Augusto Coreia s/n.<sup>o</sup>, Belém/Pa

**Abstract:** *The structural parameters more studied in the literature own her elevated influence in the ingots final properties, are the cellular and dendrite arm spacings, solute segregation, inclusions, size, shape, crystalline grains orientation and distribution. Several papers have been being developed to characterize the crystalline grains through the columnar/equiaxed zones transition determination. Currently, the thermal parameters effects have been being strongly analyzed to select macrostructures of solidification either by the type modification of the mold, cooled or chill casting, size, geometry and material of the mold, superheating, or by the forced convection provoked for electromechanical vibrations or inert gas flow in the liquid metal. In this work, the promoted effects by the forced convection through the injection of an inert gas in the liquid metal, and by the superheating in the zone equiaxed formation and were going investigated in three eutectic alloys Sn-38,1wt%Pb, Al-33wt%Cu and Zn-wt%Al . The obtained results show a different enough behavior for the three analyzed materials.*

**Key Words:** *Solidification, Macrostructures, Central Equiaxial Zone, Forced Convection, Superheat.*

## 5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho permitem que sejam extraídas as seguintes conclusões:

1. Diferentes materiais, quando solidificados segundo os mesmos critérios e condições iniciais estabelecidos, podem apresentar comportamentos bastante heterogêneos no que se refere à formação de suas respectivas macroestruturas;
2. A convecção forçada proporcionada pela injeção de gases inertes no metal líquido, durante o processo de solidificação de materiais metálicos, estimula de forma bastante diferente os mecanismos que atuam na formação das zonas equiaxial central de um produto fundido não sendo, portanto, inquestionável sua ação à formação desta zona, conforme previsto por alguns trabalhos publicados anteriormente.
3. Um mesmo valor considerado para a temperatura de vazamento, durante o processo de fundição de diferentes materiais solidificados segundo os mesmos critérios e condições iniciais, pode influenciar de maneira bastante heterogênea a estrutura final dos mesmos, fato que contraria alguns estudos desenvolvidos existentes na literatura.

## REFERÊNCIAS

- Miyata, Y., 1997, "Dendritic growth in Under Cooled Melt With Forced Convection". Proceedings of the 4<sup>th</sup> Decennial International Conference on Solidification Processing, Sheffield, pp. 409-412, .
- Morando, R, Biloni, H, COLE, G. S. and Bolling, G. F., 1970, "The Development of Macrostructure in Ingots of Increasing Size". Metallurgical Transaction, Vol. 1, pp.1407-1412,.
- Ohno, A., 1976, "The Solidification of Metals", Chijin Shokan Co. Ltda, Tokyo.
- Onho, A. and Motegi, T., 1977, "Formation Mechanism Equiaxial Zones in Cast Metals", AFS International Cast Metals Journal, pp. 28-36.
- Peralta, J. L., 1998, Influência do Superaquecimento e da Vazão de um gás Inerte no Refino de Grão do Zinco e do Eutético Zn-5Al. Tese de Mestrado, UFPa, PA.
- Peralta, J. L., Moreira, A. L. S., 2000, "Influência da Variação da Vazão do Argônio na Formação da Zona Equiaxial do Zinco e da Liga Eutética Zn-5Al Considerando Diferentes Níveis de Superaquecimento", Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, CONEM 2002, CD-ROM.
- Pontes, P. S., 1982, "Refino de Grão de Alumínio Comercial por Injeção de Gases Inertes". Tese de Mestrado, Unicamp, SP, 1982.
- Rocha, O. F. L., 1998, "Influência do Superaquecimento e da Vazão de um Gás Inerte na Formação da Macroestrutura de Solidificação do Al e do Eutético Al-33Cu. Tese de Mestrado, UFPa, PA.
- Rocha O. F. L; Siqueira, C. A.; Garcia, A., 2002, "Theoretical-Experimental Analysis of the Cellular/Dendritic Transition During Unidirectional Solidification of Sn-Pb Alloys", Materials Research, pp.391-397.
- Rocha O. F. L; Siqueira, C. A.; Garcia, A., 2003, "Cellular Spacings in Unsteady-State Directionally Solidified Sn-Pb Alloys", Materials Science Engineering, A, Vol. 361, pp.111-118.
- Rocha O. F. L; Siqueira, C. A.; Garcia, A., 2003, "Cellular/Dendritic Transition During Unsteady-State Unidirectional Solidification of Sn-Pb Alloys", Materials Science Engineering, A, Vol. 347, pp.59-69.
- Rocha O. F. L; Siqueira, C. A.; Garcia, A., 2003, "Heat Flow Parameters Affecting Dendrite Apacings During Unsteady State Solidification of Sn-Pb and Al-Cu Alloys", Metallurgical ans Materials Transaction A, Vol. 34, pp.995-1005.
- Rocha, O. F. L. e Moreira, A. L. S., 1998, Estudo comparativo da Formação da Macroestrutura de Solidificação do Alumínio e do Eutético Al-33Cu Considerando a Variação da Vazão de um Gás Inerte", Anais do 13º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, pp. 1305-1314.

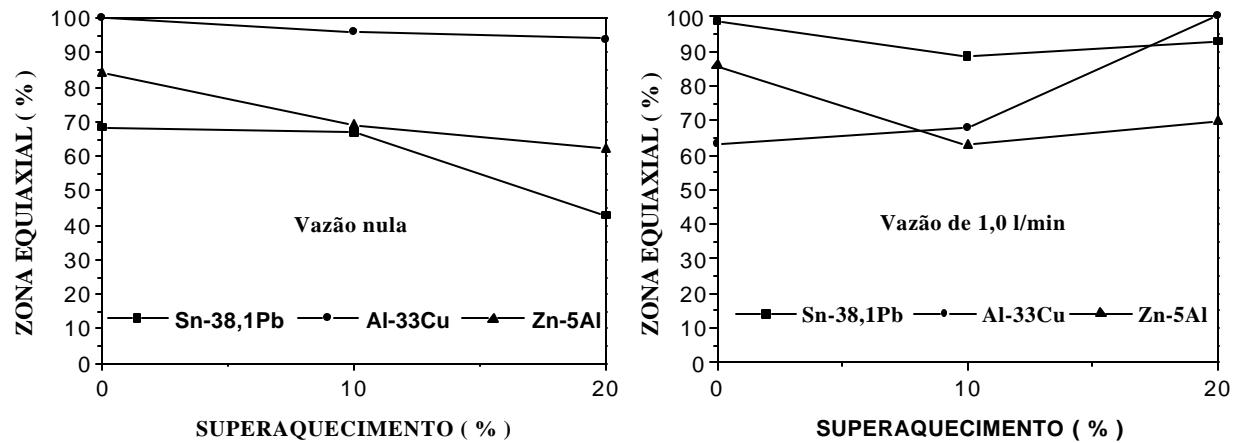


Figura 2. Efeito do superaquecimento sobre a porcentagem da zona equiaxial formada nas ligas eutéticas Sn-38,1Pb , Al-33Cu e Zn-5Al considerando a vazões do gás inerte nula e 1,0 l/min.

A Figura 3 apresenta, como exemplo, para o eutético Sn-38,1Pb, uma das macroestruturas resultantes do processo de solidificação adotado neste trabalho, considerando vazões de gas de 0,2 l/min e 1,0 l/min e superaquecimento de 20%, observa-se pela mesma o aumento da zona equiaxial com o aumento da vazão de gás.

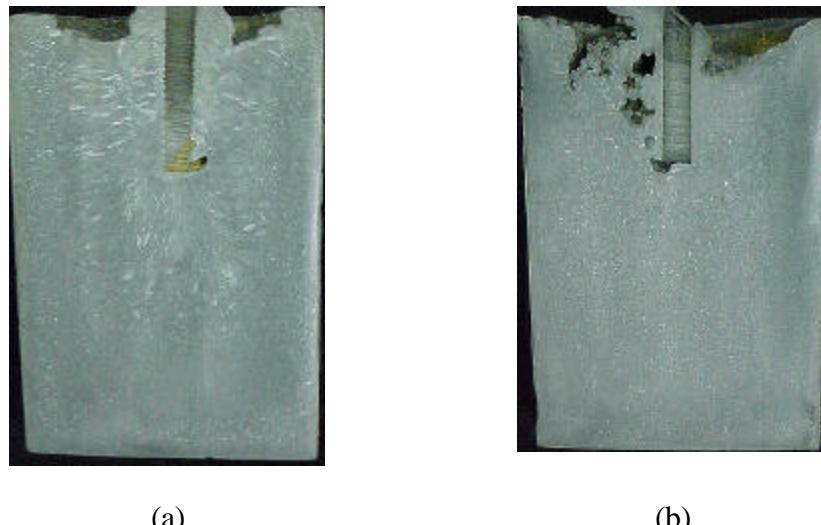


Figura 3. Macroestrutura resultante para o eutético Sn38,1Pb, obtida com superaquecimento de 20% e: (a) vazão de gás de 0,2 l/min e (b) vazão de 1,0 l/min.

#### 4. AGRADECIMENTOS

Para o desenvolvimento deste trabalho os autores agradecem o apoio financeiro fornecido pela White Martins Gases Industriais do Norte S/A e as Instituições Federais de Ensino CEFET-PA e UFPA.

gradativo da vazão de gás. Fenômeno contrário é verificado no eutético Al-33Cu, ou seja, a zona equiaxial diminui no início do processo de borbulhamento até a vazão de 0,2 l/min e com o decorrer do processo se mantém praticamente constante, sem, portanto, a convecção agir como ativadora desta zona. No que se refere ao eutético Zn-5Al, nota-se que o fenômeno da convecção provocado pelo borbulhamento do gás, parece não influenciar à constituição da zona equiaxial, ou seja, verifica-se que o seu tamanho não se altera com o aumento gradativo da vazão de gás. Estes resultados contrariam estudos desenvolvidos anteriormente sobre a eficiência dos efeitos proporcionados pela convecção forçada, provenientes da injeção de gases inertes no metal líquido durante a solidificação na formação da respectiva zona ( Pontes, 1982; Miyata, 1997). Em relação aos resultados obtidos para o superaquecimento de 20%, observa-se que a convecção forçada através do borbulhamento do gás proporciona um efeito significativo para o aumento da zona equiaxial central somente nos eutéticos dos binários Sn-Pb e Zn-Al, uma vez que a respectiva zona aumenta, elevando-se de 40% e 60%, na vazão nula, para 70% e 90%, na vazão de 1,0 l/min, para os eutéticos Sn-38,1Pb e Zn-5Al, respectivamente. Para o eutético Al-33Cu, o efeito combinado do superaquecimento e da convecção parece não influenciar de forma significativa na formação da zona equiaxial central, pois um leve aumento desta zona no início do processo de injeção de gás é observado na vazão de 0,2 l/min, e depois a mesma se mantém constante com o decorrer do processo.

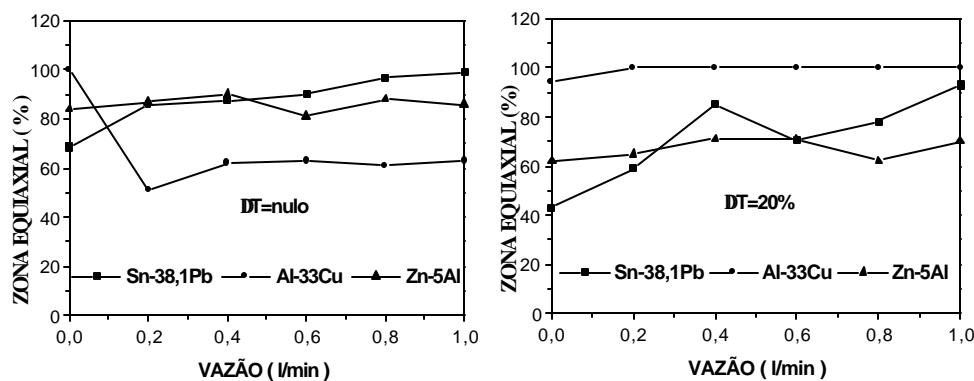


Figura 1. Efeito da variação da vazão do gás inerte sobre a porcentagem da zona equiaxial formada nas ligas eutéticas Sn-38,1Pb, Al-33Cu e Zn-5Al considerando o superaquecimento nulo e 20%.

A Figura 2 apresenta dois exemplos de resultados para o efeito do superaquecimento sobre a porcentagem da zona equiaxial formada nas ligas analisadas, considerando vazões de gás nula e de 1,0 l/min. Podemos verificar que na ausência de convecção, isto é, vazão nula, aumentos sucessivos na temperatura de vazamento dos referidos materiais, de maneira geral, estimulam mecanismos de formação da zona colunar, inibindo, portanto, a presença da zona equiaxial, sendo que estes efeitos são bem mais acentuados nas ligas Sn-38,1Pb e Zn-5Al. Quando o efeito da convecção é levado em consideração, os resultados obtidos revelam um comportamento semelhante para todos os materiais analisados, no que se refere à formação da zona equiaxial central, isto é, verifica-se para os eutéticos Sn-38,1Pb e Zn-5Al o mesmo comportamento observado para o caso da vazão nula, onde os efeitos proporcionados pelo aumento do superaquecimento predominam sobre os efeitos da convecção forçada, produzindo a inibição da presença da zona equiaxial nestes materiais. Por outro lado, no caso do eutético Al-33Cu o que se verifica é um comportamento oposto e bastante interessante, pois os efeitos convectivos proporcionados pela vazão do gás passam a predominar sobre os efeitos promovidos pelo aumento do superaquecimento estimulando em consequência a formação da zona equiaxial.

mecanismos baseados na convecção forçada pode-se incentivar a formação dos referidos grãos. Um dos processos mecânicos utilizados para estudar o efeito de correntes convectivas no metal que solidifica é aquele baseado no borbulhamento de gases inertes, o qual estimula mecanismos formadores de grãos equiaxiais. Devido a elevada importância tecnológica industrial, comercial e social que representa, o alumínio e suas ligas têm sido o principal objeto de análise nessa área de conhecimento, inclusive com trabalho recentemente desenvolvido focado na determinação da transição da zona colunar/equiaxial para as ligas Sn-Pb e Al-Cu (Siqueira et al, 2002). No entanto, é extremamente importante, sob o ponto de vista científico, o desenvolvimento de estudos capazes de estender esses estudos a outros materiais também de grande significação industrial no que diz respeito à produção de fundidos o que tem sido exaustivamente sugerido por diversos autores de trabalhos realizados anteriormente (Rocha , 1998 e Peralta, 1998).

Nesse sentido, o presente trabalho visa um estudo comparativo dos efeitos proporcionados pela convecção forçada, através da injeção de um gás inerte no metal líquido, assim como pela variação da temperatura de vazamento na formação da zona equiaxial central nas ligas eutéticas Al-33Cu, Zn-5Al e Sn-38,1Pb. Os resultados obtidos mostram um comportamento diferente, em relação aqueles previstos teoricamente, para os materiais analisados.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizadas as ligas eutéticas Al-33Cu, Zn-5Al e Sn-38,1Pb (% em peso), molde constituído de aço carbono ABNT 1045 com formato cilíndrico, medindo 99 mm de altura, diâmetro inferior de 61 mm, diâmetro superior de 63 mm e 5mm de espessura de parede. Adotou-se superaquecimento nulo, 10% e 20% acima da temperatura de fusão das ligas analisadas, a qual foi determinada a partir do diagrama de equilíbrio de fases das mesmas.

O sistema completo de solidificação utilizado foi detalhado em artigos prévios (Rocha et al, 1998 e Peralta e Moreira, 2000) e pode ser dividida em duas etapas distintas, ou seja, a primeira refere-se à obtenção dos lingotes dos eutéticos Al-33Cu, Zn-5Al Sn-38,1Pb submetidos às condições de solidificação nos três níveis de superaquecimento supracitados, bem como a injeção de um gás inerte, no caso o gás argônio, com vazões correspondentes a 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 e 1,0 l/min. A segunda etapa refere-se à obtenção das macroestruturas de solidificação desses lingotes através de procedimentos metalográficos .

As temperaturas no metal foram monitoradas durante a solidificação através de um termômetro tipo digital portátil, de fabricação Hanna Instruments, com alcance máximo de 950 °C, contendo probe tipo L em aço inoxidável, para uso em metais líquidos.

Finalmente, os lingotes obtidos foram submetidos às técnicas metalográficas para caracterizar e quantificar as estruturas equiaxiais resultantes e soluções ácidas apropriadas foram utilizadas na revelação macroestrutural. Foram mapeadas as regiões correspondentes à zona equiaxial em todos os lingotes resultantes, sendo possível, portanto, estimar-se o percentual da mesma, em cada peça, por meio do cálculo da área efetiva ocupada por grãos equiaxiais através da relação: área de grãos equiaxiais/área total (% =  $S_E / S_T$ ). A técnica utilizada para determinar o tamanho da zona equiaxial central nos lingotes se encontra detalhada em artigos prévios (Rocha et al 1998 e Peralta e Moreira, 3.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 1 apresenta a influência da variação da vazão do gás inerte sobre a porcentagem da zona equiaxial formada nos eutéticos estudados considerando superaquecimentos nulo e 20% acima da temperatura de fusão. No caso dos materiais solidificados sem superaquecimento, observa-se para o eutético Sn-38,1Pb que a convecção produzida pelo borbulhamento do gás parece ser um estimulante à formação da zona equiaxial central, pois o que se verifica é o aumento da mesma com o aumento

# **INFLUÊNCIA DA CONVEÇÃO FORÇADA E DA TEMPERATURA DE VAZAMENTO NA FORMAÇÃO DE MACROESTRUTURAS EM LIGAS EUTÉTICAS NÃO FERROSAS**

**Evaldo Júlio Ferreira Soares  
Otávio Fernandes de Lima Rocha  
João Lobo Peralta**

Centro Federal de Educação Tecnológica do Pará  
Av. Almt. Barroso, n.º 1155, Belém/Pa

**Antônio Luciano Seabra Moreira**  
Universidade Federal do Pará  
Rua Augusto Coreia s/n.º , Belém/Pa

**Resumo:** Os parâmetros estruturais mais estudados atualmente, devido a influência que exercem nas propriedades finais dos produtos fundidos, são os espaçamentos intercelulares e interdendríticos, segregação de soluto, inclusões, tamanho, forma, orientação e distribuição de grãos cristalinos. Vários trabalhos têm sido desenvolvidos no sentido de caracterizar os grãos cristalinos através da determinação da transição colunar/equiaxial. Os efeitos de parâmetros térmicos têm sido igualmente bastante investigados com o objetivo de obterem-se macroestruturas de solidificação desejadas através da modificação do tipo, dimensão, geometria e material do molde, variação da temperatura de vazamento bem como pela convecção forçada promovida por vibrações eletromecânicas ou injeção de gases inertes no metal que solidifica. Assim, neste trabalho, é realizado um estudo comparativo dos efeitos proporcionados pela convecção forçada, com uso da injeção de um gás inerte no metal líquido, assim como pela variação da temperatura de vazamento na formação da zona equiaxial central nas ligas eutéticas Al-33Cu, Zn-5Al e Sn-38,1Pb. Os resultados obtidos mostram um comportamento diferente, em relação aqueles previstos teoricamente, para os materiais analisados.

**Palavras-Chaves:** Solidificação, Macroestrutura, Zona Equiaxial, Convecção Forçada, Superaquecimento.

## **1. INTRODUÇÃO**

As características mecânicas inferiores de um material são decorrentes de heterogeneidades tais como trincas, inclusões não metálicas, porosidade, vazios, segregação de soluto, etc. existentes na estrutura de solidificação do mesmo. Estruturas homogêneas, constituídas por grãos de dimensões reduzidas, elevam o índice de isotropia o que proporciona ao material propriedades superiores (Ohno, 1976 e 1977; Southin, 1967; Morando et al., 1970, Rocha et al 2002 e 2003). Logo, existe a necessidade, durante o desenvolvimento dessas estruturas, da eliminação do crescimento de grãos colunares através do estímulo de condições favoráveis à formação de grãos equiaxiais refinados.

Resultados experimentais obtidos em trabalhos realizados anteriormente revelam que os grãos equiaxiais podem ser nucleados sobre as paredes do molde ou na superfície líquida resfriada, de onde se separam e se precipitam antes da formação de uma camada sólida estável. Então, através de