



## ANÁLISE COMPARATIVA DA FORMAÇÃO DE MACROESTRUTURAS EM METAIS NÃO FERROSOS CONSIDERANDO DIFERENTES SUPERAQUECIMENTOS E VARIAÇÃO DA VAZÃO DE UM GÁS INERTE DURANTE O PROCESSO DE SOLIDIFICAÇÃO

### **João Lobo Peralta**

Centro Federal de Educação Tecnológica, CEFET/PA, Av. Almirante Barroso, 1155, Marco, CEP. 66010-840, Belém - Pará, e-mail: jlperalta@fem.unicamp.br.

### **Otávio Fernandes Lima da Rocha**

Centro Federal de Educação Tecnológica, CEFET/PA, e-mail: orocha@amazon.com.br.

### **Evaldo Julio Ferreira Soares**

Centro Federal de Educação Tecnológica, CEFET/PA, e-mail: ejfsoares@fem.unicamp.br

### **Antonio Luciano Seabra Moreira**

Universidade Federal do Pará, UFPA, Campus Universitário do Guamá, Centro Tecnológico, Deptº de Engenharia Mecânica, CEP. 66075-900, Belém-Pará-Brasil, e-mail: lmoreira@amazon.com.br.

**Resumo:** *Espaçamentos intercelulares e interdendríticos, segregação de soluto, inclusões, tamanho, forma, orientação e distribuição de grãos cristalinos são os parâmetros estruturais mais estudados na literatura devidos suas elevadas influências nas propriedades finais dos produtos fundidos. Vários trabalhos têm sido desenvolvidos no sentido de caracterizar os grãos cristalinos através da determinação da transição das zonas colunar/equiaxial. Atualmente, os efeitos dos parâmetros térmicos têm sido fortemente analisados para selecionar as macroestruturas de solidificação, seja pela modificação do tipo do molde, refrigerado ou maciço, tamanho, geometria e material do molde, superaquecimento, ou pela convecção forçada provocada por vibrações eletromecânicas ou injeção de gás inerte no metal líquido. Neste trabalho, os efeitos promovidos pela convecção forçada, realizada através da injeção de um gás inerte no metal líquido, e pelo superaquecimento na formação da zona equiaxial central e no tamanho do grão equiaxial foram investigados em metais puros. Para tanto, foram utilizados um sistema de injeção com o gás inerte argônio e três materiais puros não ferrosos: alumínio, estanho e zinco. Os resultados obtidos mostram um comportamento bastante diferente para os três materiais analisados.*

**Palavras-chaves:** *Convecção Forçada; Superaquecimento; Macroestrutura de Solidificação; Tamanho de Grão.*

## 1. INTRODUÇÃO

A maior parte dos produtos metálicos produzidos industrialmente é obtida a partir de blocos de metal solidificados em formato simples denominados de lingotes, os quais possuem seções transversais quadradas, retangulares ou cilíndricas, que são submetidos a um ou mais processos de conformação mecânica, nos quais se alcança a forma final desejada. A maior o menor facilidade dos lingotes se deformarem plasticamente dependem fortemente da sua estrutura de solidificação, tais como

dos espaçamentos celulares e interdendríticos primários e secundários, do tamanho e da orientação dos grãos cristalinos (Garcia, 2001; Rocha et al, 2000, 2001; Bouchard-Kirkaldy, 1997; Quaresma et al, 2000; Feng et al, 1999; Cardili e Gunduz, 2000; Yu et al, 1999, Santos et al, 2001). Logo, ao observarmos as macroestruturas de solidificação de um lingote, pode-se verificar três zonas distintas, que dependem de diversas variáveis inerentes ao processo de solidificação (Ohno, 1976). Estas zonas são denominadas de zona coquilhada, zona colunar e zona equiaxial, mostradas pela Figura (1).

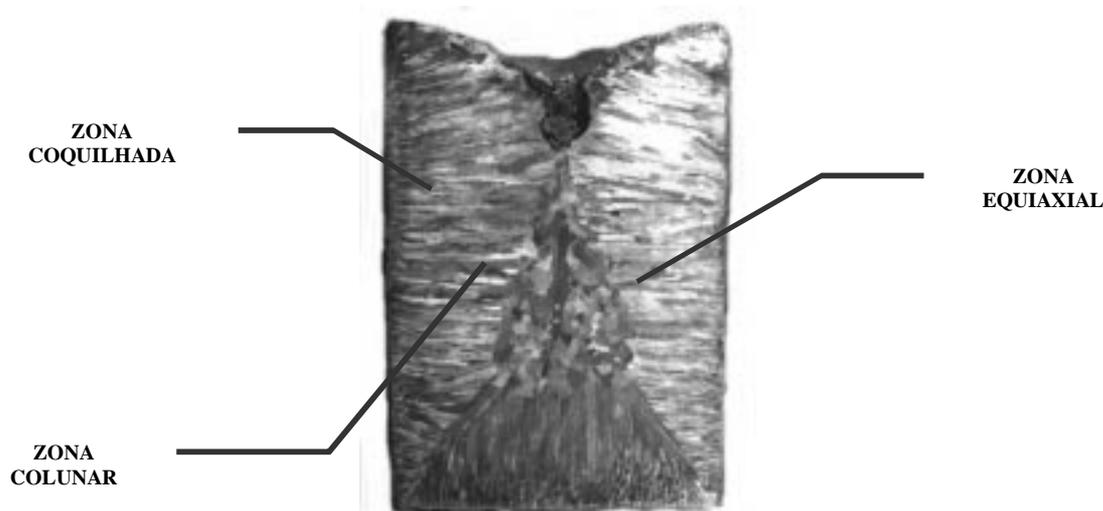


Figura 1. Macroestrutura de um lingote de zinco puro apresentando as três zonas distintas (Peralta, 2000).

A zona coquilhada é uma camada de pequenos grãos finamente dispersos localizada na superfície do lingote que possuem orientação aleatória. Estes grãos são intensamente nucleados devido ao super-resfriamento que ocorre a partir do contato do metal líquido, que é vazado, com as paredes frias da lingoteira. Sua intensidade depende de algumas variáveis do processo como o grau de superaquecimento, a temperatura e o material da parede do molde (Biloni, 1968).

A zona colunar é formada por grãos que crescem a partir da parede do molde em direção ao centro do lingote, sendo coincidentes com a direção de extração de calor, ou seja, perpendicularmente à parede do molde. Estes grãos se desenvolvem devido à liberação de calor latente de solidificação associado ao calor que flui do líquido em direção ao molde. Este fluxo de calor remove o super-resfriamento nas proximidades das paredes do molde impedindo o desenvolvimento de grãos com orientação aleatória. O tamanho desta zona é influenciado por algumas variáveis do processo de solidificação que aumenta, por exemplo, à medida que maiores temperaturas de vazamento são utilizadas e/ou quando ocorre o aquecimento prévio do molde.

A zona equiaxial ocorre quando a região central do lingote se torna super-resfriada tanto por efeito térmico quanto constitucional favorecendo o desenvolvimento de núcleos que podem crescer aleatoriamente na forma de cristais. Estes cristais são denominados de equiaxiais e impedem o desenvolvimento da zona colunar. Fatores como baixos superaquecimentos, utilização de molde com baixa difusividade de calor e intenso movimento convectivo favorece o aumento desta zona (Ohno, 1977).

Como as propriedades mecânicas de estruturas brutas de solidificação, geralmente, apresentam tendência de aumentar com a diminuição do tamanho dos grãos, é desejável que estes se apresentem na forma equiaxial na grande maioria das situações práticas devido estas propriedades serem isotrópicas. Para se desenvolver estruturas completamente equiaxiais é necessário impedir o desen-

volvimento da zona colunar durante o processo de solidificação, pelo controle da nucleação por imposição de condições de solidificação (Ohno, 1975, Levy, 1990, Appolaire et al, 1997 ) ou pelo uso de inoculantes e utilização de métodos físicos para movimento forçado no metal líquido como a vibração (Vives, 1996), agitação mecânica, borbulhamento gasoso e outros.

O borbulhamento de gás, por exemplo, provoca flutuação térmica no metal líquido, que age como elemento refinador de grão pela fragmentação mecânica e ruptura de ramificações dendríticas por refusão promovendo o crescimento equiaxial (Cole, 1967). Esta agitação facilita a transferência de calor através da interface metal/molde favorecendo uma nucleação mais intensa de cristais junto ao molde e ao mesmo tempo distribuindo-os na massa líquida favorecendo o crescimento equiaxial de maneira extensiva.

Neste sentido, o presente trabalho visa analisar experimentalmente o efeito da convecção forçada, provocada pela injeção de um gás inerte no metal líquido na formação da zona equiaxial e no nível de refino de grão do estanho, alumínio e zinco.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizados vazamentos nas temperaturas de fusão do alumínio, zinco e do estanho e com superaquecimento de 20% acima da temperatura de fusão, em lingoteira de aço ABNT 1045 de formato cilíndrico com 92 mm de altura, 62 mm de diâmetro médio interno e 5 mm de espessura. Para cada material, os primeiros vazamentos nas temperaturas correspondentes, foram realizados sem injeção de gás inerte, com objetivo de se observar o comportamento estrutural e também medir a profundidade do rechupe no sentido de definir a profundidade do tubo injetor de aço inoxidável com 6,5 mm de diâmetro, garantindo assim, a permanência do mesmo em contato com o metal líquido até sua completa solidificação. Determinada então a profundidades do tubo injetor para cada material, procederam-se aos vazamentos dos mesmos na lingoteira e em seguida foram submetidos à injeção do gás argônio nas temperaturas assumidas. As vazões do gás argônio injetado, em todos os materiais, foram de 0,2 , 0,4 , 0,6 , 0,8 e 1,0 l/min cujo tempo correspondeu ao período entre o momento do contato do tubo com o metal líquido até sua completa solidificação. Após a obtenção dos lingotes, realizaram-se análises macro e micrográficas dos mesmos a fim de avaliar-se os efeitos promovidos pela convecção forçada no líquido na estrutura dos mesmos.

O sistema completo de injeção de gás utilizado neste trabalho encontra-se ilustrado na Figura (2).

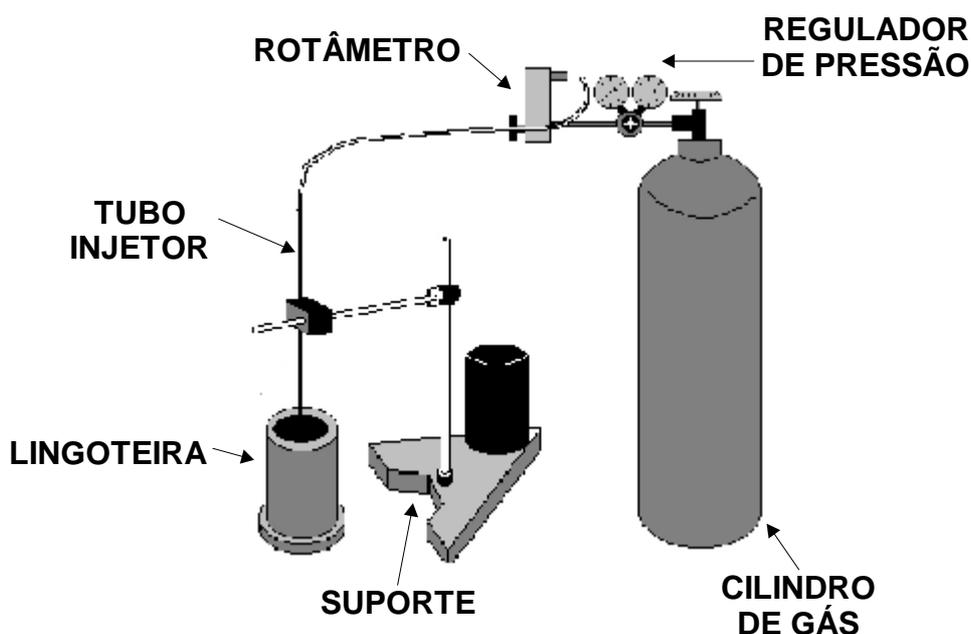


Figura 2. Esquema do sistema de injeção de gás inerte utilizado no processo de solidificação.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura (3) apresenta, respectivamente, para os materiais em análise, o efeito da variação da vazão do gás inerte sobre o diâmetro médio do grão equiaxial considerando superaquecimentos nulo e 20% acima da temperatura de fusão. Os resultados obtidos para o alumínio, demonstram que baixos valores da vazão do gás são suficientes para promover uma diminuição considerável do tamanho do grão e se mantém constante para vazões mais elevadas. Para o estanho, aumentos progressivos da vazão inicialmente reduzem e posteriormente elevam o tamanho do grão. No caso do zinco, que apresenta o menor tamanho inicial para o grão, observa-se um outro comportamento, pois aumentos sucessivos da vazão do gás não estimulam a diminuição do tamanho do grão sendo que elevados valores para a vazão chegam, inclusive, a contribuir para o aumento da dimensão do mesmo, o que contraria trabalhos anteriores (Chalmers, 1963; Jakson et al., 1966). No caso do superaquecimento de 20%, podemos observar pelos resultados obtidos, para o estanho e o alumínio, a diminuição do tamanho médio dos grãos para vazões até 0,2 l/min, permanecendo praticamente constantes para vazões superiores. Finalmente, no zinco, para níveis de superaquecimento elevado, ao contrário do estanho e do alumínio, a injeção do gás contribui significativamente para o aumento da dimensão do grão.

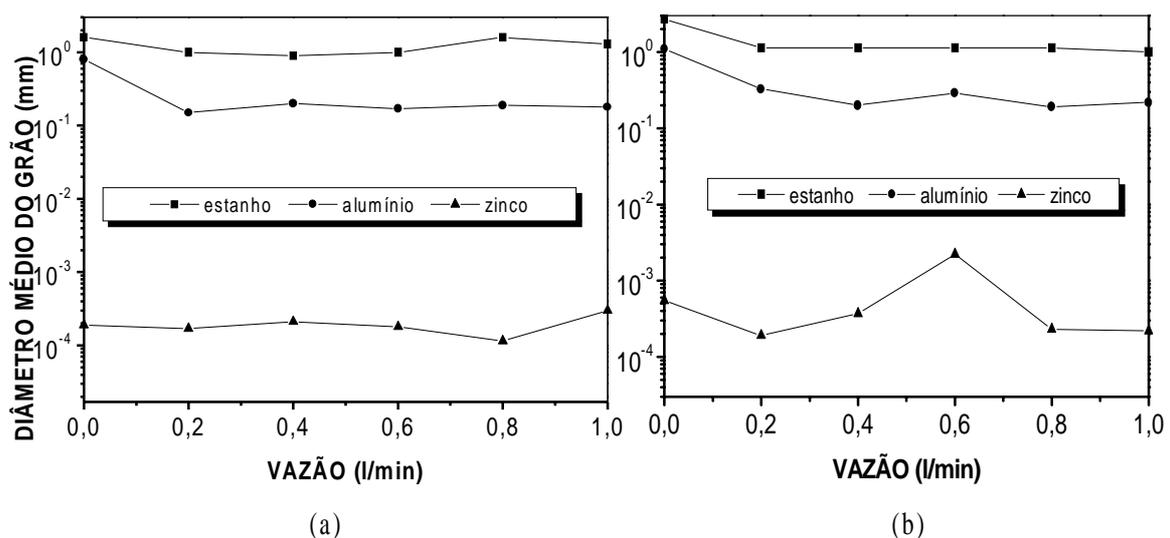


Figura 3. Efeito da variação da vazão do gás inerte sobre o diâmetro médio do grão equiaxial considerando: (a) superaquecimento nulo e (b) superaquecimento de 20%.

A Figura (4) compara, respectivamente, para os três materiais em questão, o efeito da variação da vazão do gás inerte sobre a porcentagem da zona equiaxial formada considerando superaquecimentos nulo e 20% acima da temperatura de fusão dos mesmos. Podemos notar que para o superaquecimento nulo o efeito da vazão no alumínio e no estanho promove um aumento da zona equiaxial, sendo com maior intensidade para o alumínio. No caso do zinco verificamos um comportamento contrário, isto é, aumentos progressivos na vazão de gás desestimulam a constituição da zona equiaxial central. No caso do superaquecimento de 20% para o alumínio e o estanho o efeito do borbulhamento do gás inerte também estimula à formação da zona equiaxial. Contudo, quando comparamos esses resultados com os mostrados na Figura 2.2(a), o superaquecimento no alumínio atua como agente inibidor da zona equiaxial, o que atende as teorias propostas na literatura, o que não se observa para o estanho. Por outro lado, no caso do zinco, os resultados experimentais mostram um comportamento contrário aos verificados para o superaquecimento nulo, ou seja, nota-se que o superaquecimento de 20% agindo em conjunto com a vazão do gás estimulam à formação da zona equiaxial.

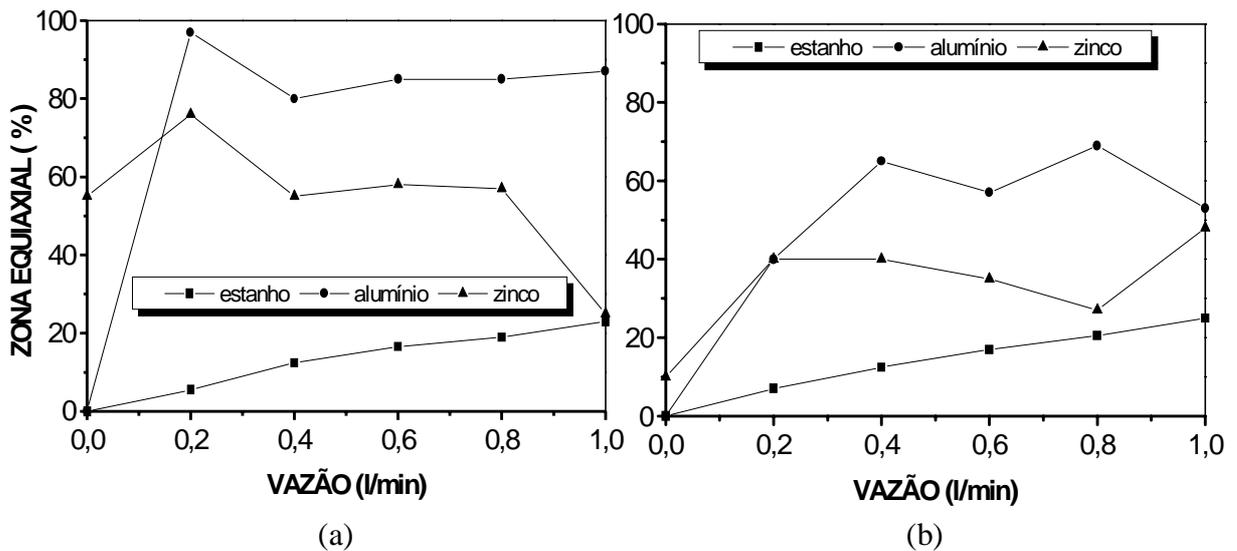


Figura 4. Efeito da variação da vazão do gás inerte sobre a porcentagem da zona equiaxial considerando: (a) superaquecimento nulo e (b) superaquecimento de 20%.

A Figura (5) apresenta, respectivamente, o efeito da variação do superaquecimento sobre o diâmetro médio do grão equiaxial do estanho, zinco e alumínio considerando vazões nula e de 1,0 l/min. Para a vazão nula, em todos os casos analisados, observamos, pelos valores dos resultados experimentais obtidos, que aumentos no grau de superaquecimento proporcionam igualmente aumentos no tamanho do grão dos materiais estudados, principalmente no zinco. Estes resultados se encontram em concordância com estudos anteriormente propostos que afirmam ser o superaquecimento um dos fatores que estimulam o aumento da dimensão do grão equiaxial durante o processo de solidificação (Rocha, 1998 e Peralta, 2000). Em relação ao caso anterior, verificamos que a presença dos efeitos convectivos promovidos pelo borbulhamento do gás inerte no líquido, mostrado pela Figura (3), conforme previsto por alguns estudos (Miyata, 1997), inibem em parte, para o estanho e o zinco, a ação do superaquecimento no sentido de estimular a formação de grãos equiaxiais grosseiros nos metais estudados. Assim, no zinco a dimensão do grão de maneira geral é reduzida e no estanho o diâmetro médio do grão inicialmente diminui, contudo, volta a crescer quando são admitidos maiores valores para os superaquecimentos. No caso do alumínio, apesar do comportamento da curva não mostrar variação no tamanho dos grãos equiaxiais, em virtude da mesma ter sido plotada em escala logarítmica para permitir a comparação dos três materiais, o superaquecimento promove aumento no tamanho dos mesmos.

A Figura (6) mostra, respectivamente, a influência do aumento do superaquecimento sobre a porcentagem da zona equiaxial formada no estanho, zinco e alumínio considerando a vazão do gás nula. Os resultados demonstram que para um superaquecimento nulo o zinco apresenta zona equiaxial, no entanto, com o aumento do superaquecimento imposto a constituição desta zona é gradativamente inibida passando então a existir praticamente somente a zona colunar. O estanho e o alumínio apresentam somente grãos colunares, ou seja, ausência completa da estrutura equiaxial central.

No caso da vazão de 1,0 l/min verificamos que aumentos gradativos do superaquecimento no alumínio diminuem a área de zona equiaxial formada ativando sobremaneira a formação da zona colunar. No zinco, o superaquecimento agindo em conjunto com a agitação do gás no metal líquido, estimula o surgimento da zona equiaxial e, finalmente, no estanho não exercem qualquer influência na formação da sua macroestrutura.

Esses resultados podem ser observados pelas macroestruturas resultantes mostradas na Figura (7) para o alumínio, zinco e estanho, respectivamente.

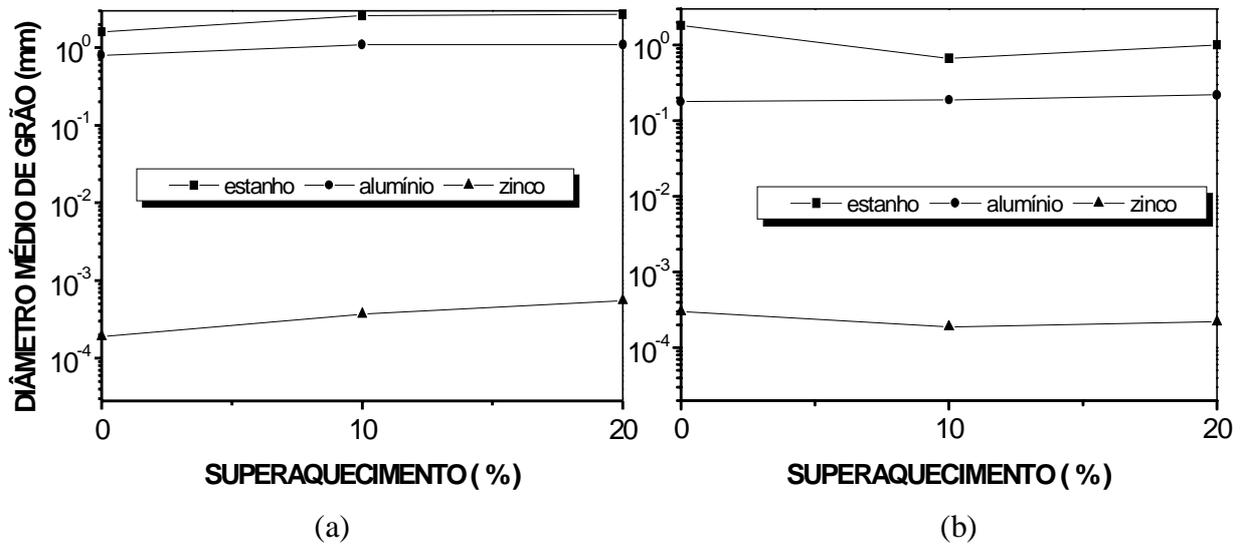


Figura 5. Efeito da variação do superaquecimento sobre o diâmetro médio do grão equiaxial formado considerando vazões: (a) nula e (b) 1,0 l/min.

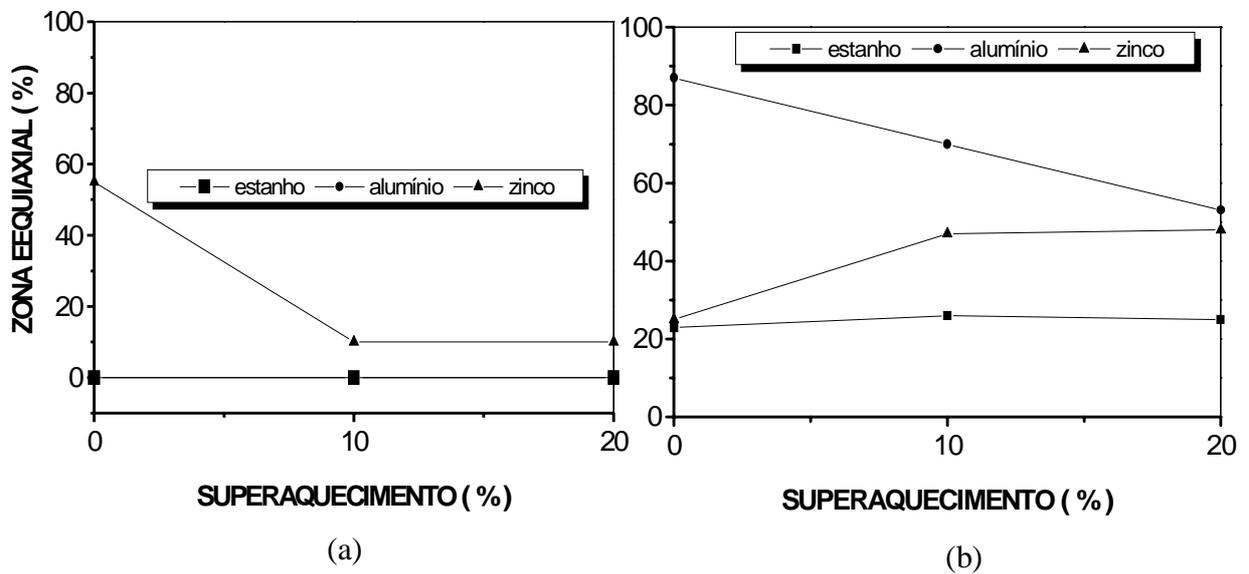
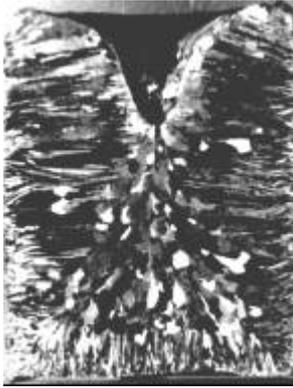


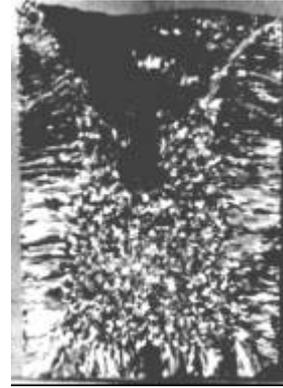
Figura 6. Efeito do superaquecimento sobre a porcentagem da zona equiaxial considerando vazões: (a) nula e (b) 1,0 l/min.



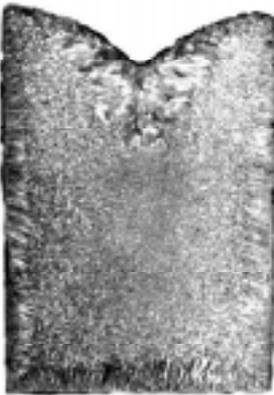
**Al**  
**Vazão=nula**  
**ΔT=nulo**



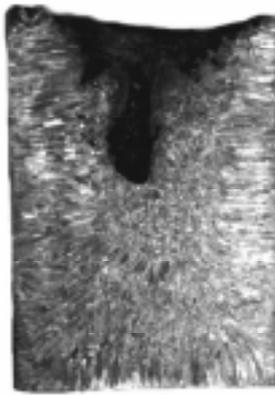
**Al**  
**Vazão=1,0 l/min**  
**ΔT=nulo**



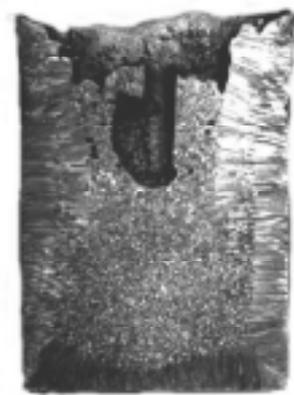
**Al**  
**Vazão=1,0 l/min**  
**ΔT=20%**



**Zn**  
**Vazão=nula**  
**ΔT=nulo**



**Zn**  
**Vazão=1,0 l/min**  
**ΔT=20%**



**Zn**  
**Vazão=1,0 l/min**  
**ΔT=20%**



**Sn**  
**Vazão=nula**  
**ΔT=nulo**



**Sn**  
**Vazão=1,0 l/min**  
**ΔT=20%**



**Sn**  
**Vazão=1,0 l/min**  
**ΔT=20%**

Figura 7. Macroestruturas Resultantes (redução de 50%).

## 4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho permitem concluir que:

- Os grãos equiaxiais formados nas macroestruturas dos lingotes de alumínio e estanho sofrem reduções em suas dimensões médias quando submetidos somente à variação da vazão do gás inerte. Quando a mesma atua juntamente com os superaquecimentos, a redução do tamanho do grão é mais significativa sem, no entanto, alcançar uma macroestrutura consideravelmente refinada;
- Os efeitos proporcionados pela convecção forçada, a partir do borbulhamento do gás inerte no metal líquido, apesar da presença do superaquecimento, apresentam uma influência significativa na formação da zona equiaxial central;
- Comparando os resultados segundo os mesmos critérios e condições iniciais para os três materiais em questão, são observadas significativas discrepâncias entre os mesmos, no que se refere ao comportamento teórico previsto segundo as teorias existentes sobre o assunto.

Portanto, isto nos leva a concluir que algumas teorias apresentadas e tradicionalmente aceitas sobre o assunto, baseadas em determinados mecanismos ativados durante o fenômeno da solidificação, que tentam descrever o processo de formação da zona equiaxial central nos materiais metálicos, podem ser limitadas somente a alguns materiais quando submetidos a condições específicas de solidificação havendo, portanto, há necessidade do desenvolvimento de novos estudos para outros materiais solidificados segundo os mesmos critérios e condições iniciais a fim de tornar as referidas teorias mais abrangentes e genéricas.

## 5. REFERÊNCIAS

- Appolaire, B., Combeau, H. and Lesout, G., 1997, Modeling of equiaxed growth with convection. Proceeding of the 4<sup>th</sup> Decennial International Conference on Solidification Processing, Sheffield, p. 295-298.
- Biloni, H. and Morando, R., 1968, On the nature of the chill zone in the ingot solidification, Transactions of the Metallurgical Society of AIME, v. 242, p. 1121 – 1125.
- Bouchard, D; Kirkaldy, J. S., 1997, Prediction of Dendrite Arm Spacings in Unsteady and Steady-State Heat Flow of Unidirectionally Solidified Binary Alloys, Metallurgical and Materials Transactions B, v. 28B, pp.651-663.
- Chalmers, B., 1963, The structure of ingots, The Journal of the Australian Institute of Metal, v. 8, n. 3, p 225.
- Cardili, E.; Gündüz, M., 2000, The Directional Solidification of Pb-Sn Alloys, Journal of Materials Science , v. 35, pp. 3837-3848.
- Cole, G. S. and Bolling, G. F., 1967, Importance of fluid motion during ingot solidification, Proceeding of the Conference on The Solidification of Metals, ISI, Publ. 110, p. 323-329
- Couthard, J. O. and Elliott R., 1967, The Dependence of the Cellular Interface Structure in Dilute Binary Alloys on Solidifications Conditions, Journal of The Institute of Metals, vol. 95, pp. 21-23.
- Feng, J.; Huang, W. D.; Lin, X.; Pan, Q. Y.; Li, T.; Zhou Y.H., 1999, History-Dependent Selection Primary Cellular/Dendritic Spacing During Unidirectional Solidification In Aluminum Alloys, Acta Materialia, v. 47, n. 11, pp.3271-3280.
- Garcia, A., 2001, Solidificação: Fundamentos e aplicações, Editora da Unicamp, Campinas, São Paulo.
- Jakson, K. A., Hunt, J. D., Uhlmann, D. R. and Seward III, T. P., 1966, On the origin of the equiaxed zone in castings, Transaction of the Metallurgical Society of AIME, v 239, p. 149-158.
- Levy, S. A., 1990, Monitoring grain refiner performance using thermal analysis, The Minerals, Metals & Materials Society, p. 831-836.
- 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, p. 409-412.

- 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, p. 28-36.
- Onho, A. and Motegi, T., 1975, Principles of grain refining of cast structures, AFS Cast Metals Research Journal, p. 45-51.
- 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.
- Quaresma, J. M. V.; Santos, C. A.; Garcia, A., 2000, Correlation between Unsteady-State Solidification Conditions, Dendrite Spacings, and Mechanical Properties, Metallurgical and Materials Transactions, v. 31A, pp.3167-3178.
- 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, 13º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, p. 1305-1314.
- Rocha, O. F. L.; Siqueira, C. A.; Garcia, A., 2000, Análise Teórico-Experimental dos Espaçamentos Celulares na Solidificação Unidirecional da Liga Sn-1Pb, Anais do CBECIMAT/2000 (CDROM), Águas de São Pedro, SP, pp.31301-31312.
- Rocha, O. F. L.; Siqueira, C. A., 2001, Garcia, A., Theoretical - Experimental Analysis Of The Cellular/Dendritic Transition During Unidirectional Solidification Of Sn-Pb Alloys, Anais do II Simpósio Brasileiro de Estruturologia/IISBE-2001 (CDROM), Tiradentes, MG, (in press).
- Santos, C. A.; Quaresma, J. M. V.; Garcia, A., 2001, Determination of transient interfacial heat transfer coefficients in chill mold castings, Journal of Alloys and Compounds, v. 319, pp.174-186.
- Vives, C., 1996, Effects of forced electromagnetic vibrations during the solidification of aluminum alloys: Part I and II, Metallurgical and Materials Transactions, v. 27 B, p. 445-464.

## **COMPARATIVE ANALYSIS OF MACROSTRUCTURES FORMATION IN NON-FERROUS METALS CONSIDERING DIFFERENT SUPERHEATS AND VARIATION OF FLOW OF INERT GAS BY SOLIDIFICATION PROCESS**

**Summary:** *Cellular and dendrite spacing, solute segregation, inclusions, size, shape, crystalline grains orientation and distribution are the structural parameters more studied in the literature owed her elevated influences in the ingots final properties. In previous 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 solidification macrostructures by the modification of the mold, cooled or chill casting, size, geometry and material of the mold, superheating, or by the forced convection provoked for electro-mechanical 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 formation zone equiaxed zone and in the equiaxed grain size were going investigated in pure metals. For so much, they were going used an injection system with the argon inert gas and three pure non-ferrous materials: aluminum, tin and zinc. The obtained results show a different enough behavior for the three analyzed materials.*

**Keys-words:** *Forced convection; Superheating; Macrostructure of Solidification; Grain size.*