

IMPORTÂNCIA DAS DIMENSÕES DO MOLDE E DA VARIAÇÃO DA VAZÃO DE UM GÁS INERTE NA FORMAÇÃO DA ZONA EQUIAXIAL CENTRAL DO ALUMÍNIO

Cláudio A. F. Siqueira

Antonio L. S. Moreira

Universidade Federal do Pará – UFPA

Centro tecnológico – CT - Departamento de Engenharia Mecânica – DEM

Rua Augusto Corrêa, 01 – CEP: 66075-900 – Belém - Pará

E-mail: claudio@fem.unicamp.br e luciano@amazon.com.br

Resumo O processo de fundição de produtos metálicos é considerado o mais antigo dos processos convencionais de fabricação, tendo sido desenvolvido de forma empírica há milhares de anos. Apesar da sua grande importância tecnológica, somente nas últimas décadas surgiram as primeiras pesquisas sistemáticas sobre o fenômeno da solidificação de metais, incentivadas pela crescente necessidade do desenvolvimento de novos processos tais como fundição sob pressão, fundição centrífuga, fundição por microfusão, lingotamento contínuo, reofundição, etc. Logo, um dos objetivos da metalurgia física nos últimos anos tem sido a investigação de técnicas capazes de controlar a dimensão, forma, distribuição e orientação dos grãos cristalinos de produtos fundidos, visando a obtenção de estruturas de solidificação homogêneas e isotrópicas, compatíveis com as propriedades mecânicas exigidas. Assim, o principal objetivo deste trabalho é apresentar um estudo teórico-experimental sobre os efeitos impostos pelas dimensões do molde e pela variação da vazão de um gás inerte na formação da zona equiaxial central do alumínio. Para tanto, são utilizadas 05 (cinco) lingoteiras de dimensões variáveis (altura, espessura e diâmetro) bem como vazões do gás inerte correspondentes a zero, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1,0 l/min.

Palavras Chaves: Solidificação, Moldes, Zona Equiaxial e Alumínio.

1. INTRODUÇÃO

Embora a conformação de metais utilizando a solidificação seja o mais antigo dos processos convencionais de fabricação, somente nas últimas décadas surgiram as primeiras pesquisas sistemáticas sobre este fenômeno, incentivadas pela sua crescente utilização no desenvolvimento de novos processos tornando inadequado o estabelecimento dos mesmos a partir de métodos empíricos[Chiaverini,1994]. O conhecimento do fenômeno da solidificação dos metais apresenta um papel importante no controle de estruturas de solidificação e, portanto, na obtenção de produtos fundidos com características isotrópicas[Siqueira, 1998; Oliveira & Gonzales, 1998; Ohno,1976]. O fator mais importante na formação da macroestrutura de um metal fundido é, sem dúvida, a estimativa quanto às propriedades mecânicas que são dependentes, principalmente, do tamanho, da forma, da distribuição e da orientação dos grãos cristalinos.[Wang & Beckermann, 1996; Ohno,1976]

O alumínio é considerado o não-ferroso mais importante industrialmente, devido a sua possibilidade de formar ligas. Segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), as ligas de alumínio já apresentam resistência mecânica comparável à do aço, com uma enorme vantagem no preço e no campo da reciclagem[Siqueira 1998]. A maioria dos produtos fundidos requer propriedades isotrópicas capazes de atender as diversas aplicações encontradas na prática. A obtenção destas estruturas dependem de vários fatores como coeficiente de extração de calor da interface metal/molde, a presença de soluto no líquido, a temperatura de vazamento, a existência de convecção forçada, as dimensões do molde, etc, sendo que esta última tem sido pouco estudada quanto aos efeitos proporcionados. Considerando o exposto, este trabalho apresenta como objetivo principal o estudo das dimensões do molde e da variação da vazão de um gás inerte na formação da zona equiaxial central do alumínio.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Durante os trabalhos experimentais foram utilizadas 05 (cinco) lingoteiras cilíndricas, fabricadas em aço baixo carbono SAE 1020, de acordo com a “Tabela 1”.

Tabela 1. Dimensões dos cinco tipos de lingoteiras utilizadas na realização dos trabalhos experimentais.

Lingoteiras	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Espessura (mm)	Volume ($10^4 \times \text{cm}^3$)
1	95,00	80,00	10,00	477
2	118,75	100,00	12,50	933
3	142,50	120,00	15,00	1600
4	166,25	140,00	17,50	2560
5	190,00	160,00	20,00	3520

Foram realizados vazamentos à temperatura de 660^0 C , com vazões do gás inerte hélio, no metal líquido, para produzir borbulhamentos correspondentes a 0,2 , 0,4 , 0,6 , 0,8 e 1,0 l/min, à pressão de $2,0 \text{ kgf/cm}^2$ nas diferentes lingoteiras. A “Fig. 1”, ilustra o dispositivo utilizado na realização dos trabalhos experimentais. O sistema de injeção de gás, é constituído por um cilindro de alta pressão, regulador de pressão, rotâmetro e tubo injetor de aço inox.

A eliminação total do processo de injeção de gás ocorreu somente quando do término da solidificação do material. A profundidade do tubo injetor no interior do molde, foi determinada em função da altura do pé do rechupe observada no material estudado para cada uma das dimensões do molde, sem a injeção do gás inerte que, para o alumínio, é mostrada na “Tabela 2”.

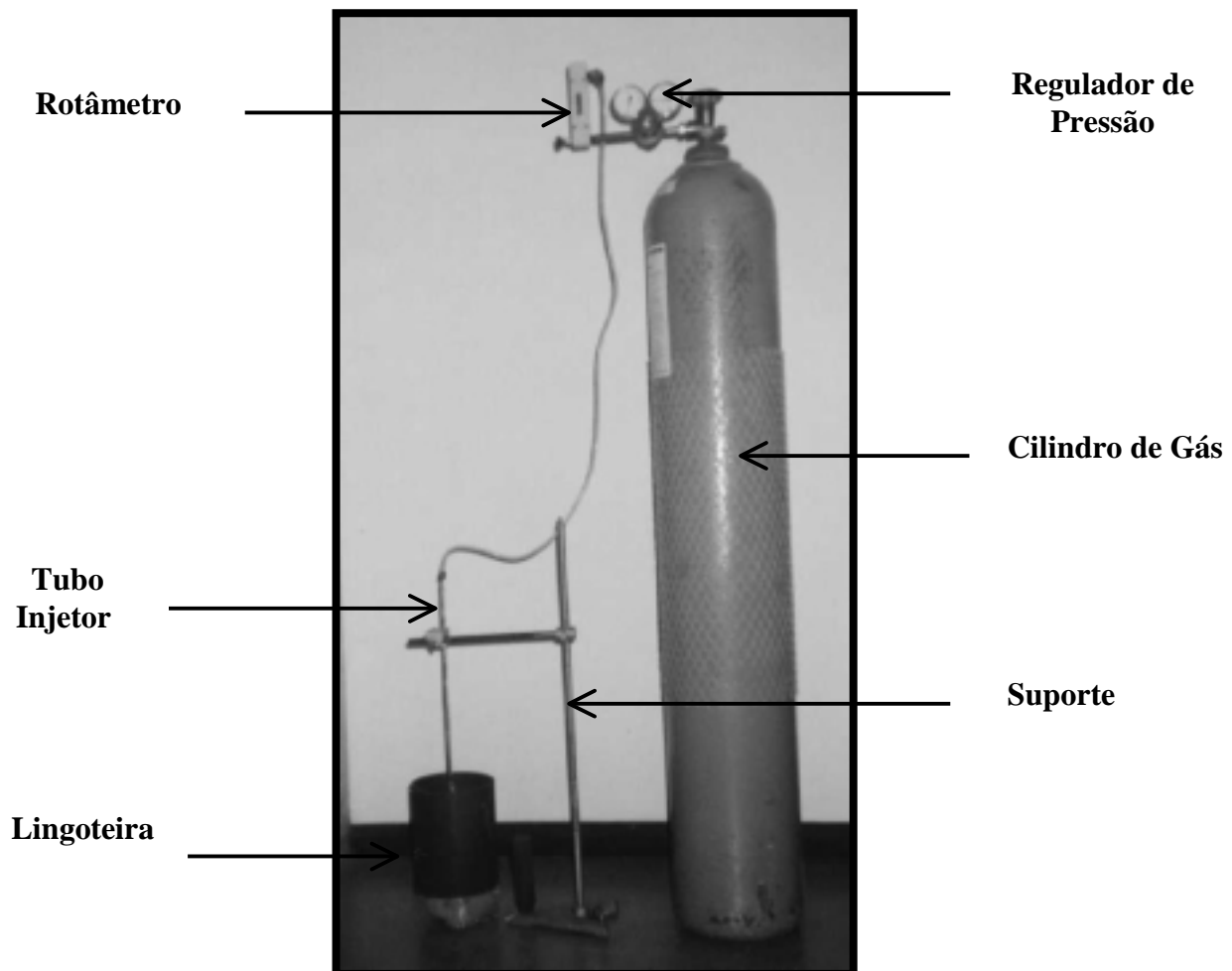


Figura 1 - Dispositivo utilizado para a realização dos trabalhos experimentais.

Tabela 2. Alturas do rechupe e do tubo injetor.

Lingoteiras	Rechupe (cm)	Tubo Injetor (cm)
1	2,30	3,30
2	3,00	4,20
3	4,70	6,60
4	5,90	8,25
5	6,20	8,70

Após o processo de obtenção dos lingotes, estes foram cortados no sentido longitudinal e faceados em torno tipo universal a fim de possibilitar um melhor acabamento superficial aos mesmos. Em seguida, os lingotes foram polidos em lixadeira manual utilizando-se lixas d'água de carbeto de silício (SiC) de granulometrias variáveis (200,320,400 e 600 mesh). Após o lixamento, foi realizada uma cuidadosa limpeza superficial, com detergente comum, objetivando a eliminação de resíduos de

gordura existentes na superfície dos mesmos. Posteriormente, estas superfícies foram limpas com álcool etílico a fim de que as mesmas estivessem bem visíveis e secas, isto é, sem manchas. Em seguida, estas superfícies foram polidas e atacadas com reagente químico adequado, cuja composição foi 320 ml de HCl, 160 ml de HNO₃ e 20 ml de HF. O ataque foi realizado através do procedimento de atritar pequenas quantidades de algodão umedecidas no reagente contra a superfície dos lingotes até que as macroestruturas de solidificação desejadas fossem perfeitamente reveladas. As amostras foram fotografadas sem aumento e com iluminação adequada. Posteriormente, as fotografias das macroestruturas foram analisadas quanto à porcentagem de formação da zona equiaxial central. Para verificação do tamanho do grão as amostras foram preparadas para análise micrográfica. Assim, as mesmas foram retiradas da região central do lingote, polidas e atacadas com reagente apropriado, em seguida foram microfotografadas através de microscópio de luz refletida com aumento de 115 vezes para posterior contagem de grãos através do método do *intercepto*, norma NB – 1323 da ABNT de contagem de grãos equiaxiais de materiais metálicos. Finalmente, os resultados obtidos foram plotados segundo o método de ajuste de curvas dos quadrados mínimos, através de uma função quadrática aproximando-se ao máximo da curva real que identifica o fenômeno físico.

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A “Figura 2” apresenta os resultados da variação do diâmetro do grão equiaxial em função da vazão do gás para o alumínio solidificado, na pressão de 2,0 kgf/cm² nas Lingoteiras 1, 2, 3, 4 e 5. Assim, podemos observar que, em todas as lingoteiras, o tamanho do grão equiaxial inicialmente diminui, atinge um valor mínimo e volta a crescer. A “Fig. 3” mostra os valores obtidos para a variação do diâmetro do grão em função do volume da lingoteira para o alumínio solidificado na pressão de 2,0 kgf/cm² nas vazões de zero a 1,0 l/min. Verificamos que, quando a vazão de gás é nula, à medida que se elevam os valores das dimensões das lingoteiras ocorre um aumento progressivo do diâmetro do grão equiaxial fato que pode ser justificado, segundo alguns autores [Morando, Biloni, Cole and Bolling,1970], pela maior quantidade de calor latente que necessita ser rejeitado, durante o processo de mudança de fase, do sistema metal/molde para o meio ambiente. Para as vazões de gás de 0,2 a 0,6 l/min ocorre uma redução no diâmetro do grão equiaxial formado, em relação a situação inicialmente analisada, nas diversas lingoteiras consideradas sendo que este efeito é mais relevante para as vazões de 0,4 e 0,6 l/min. Apesar disso, verificamos que os efeitos introduzidos pela variável "aumento do volume da lingoteira" predominam sobre a variável "aumento da vazão de gás". Somente quando os valores para a vazão de gás correspondem a 0,8 l/min e 1,0 l/min, observa-se a inibição desses efeitos uma vez que o diâmetro do grão tende a diminuir, em relação aos casos anteriormente analisados, para as diversas lingoteiras.

A “Figura 4” apresentam os resultados obtidos para a porcentagem de formação da zona equiaxial central em função da vazão do gás para o alumínio solidificado, na pressão de 2,0 kgf/cm² nas Lingoteiras 1, 2, 3, 4 e 5. De maneira geral, verificamos que, em todos os casos estudados a porcentagem de formação da zona equiaxial central aumenta à medida que se elevam os valores da vazão de gás sendo que este efeito é bem mais significativo nas lingoteiras de maiores dimensões uma vez que em condições normais de solidificação, isto é, na ausência da vazão e pressão de gás, lingoteiras de maiores dimensões nas mesmas condições de solidificação, tendem proporcionar estruturas grosseiras.

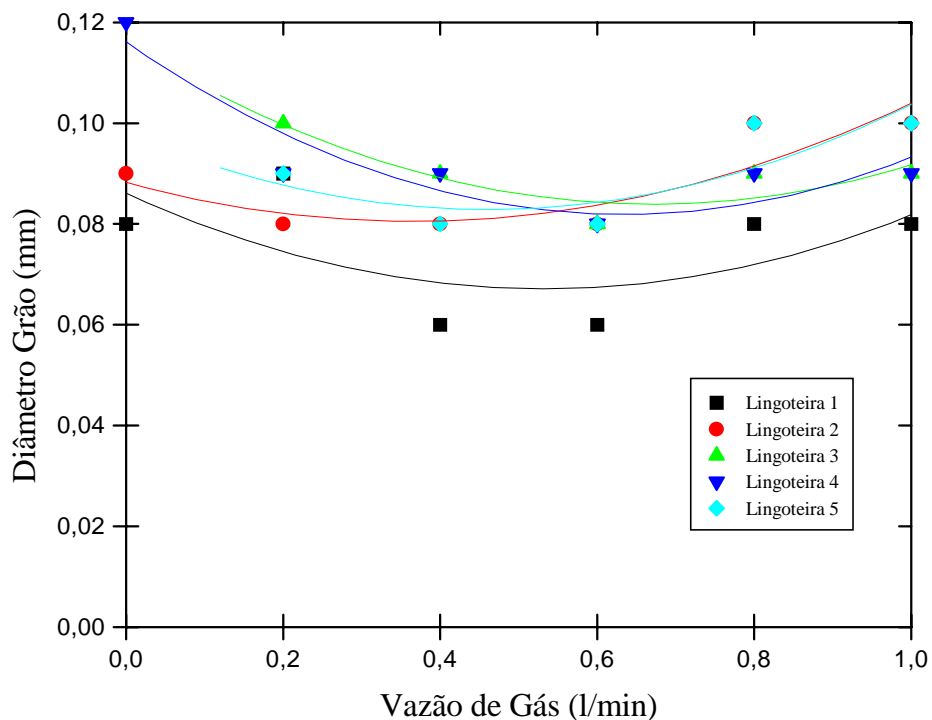


Figura 2 - Variação do diâmetro do grão em função da vazão de gás para o alumínio solidificado à pressão de 2,0 kgf/cm² nas Lingoteiras 1, 2, 3, 4 e 5.

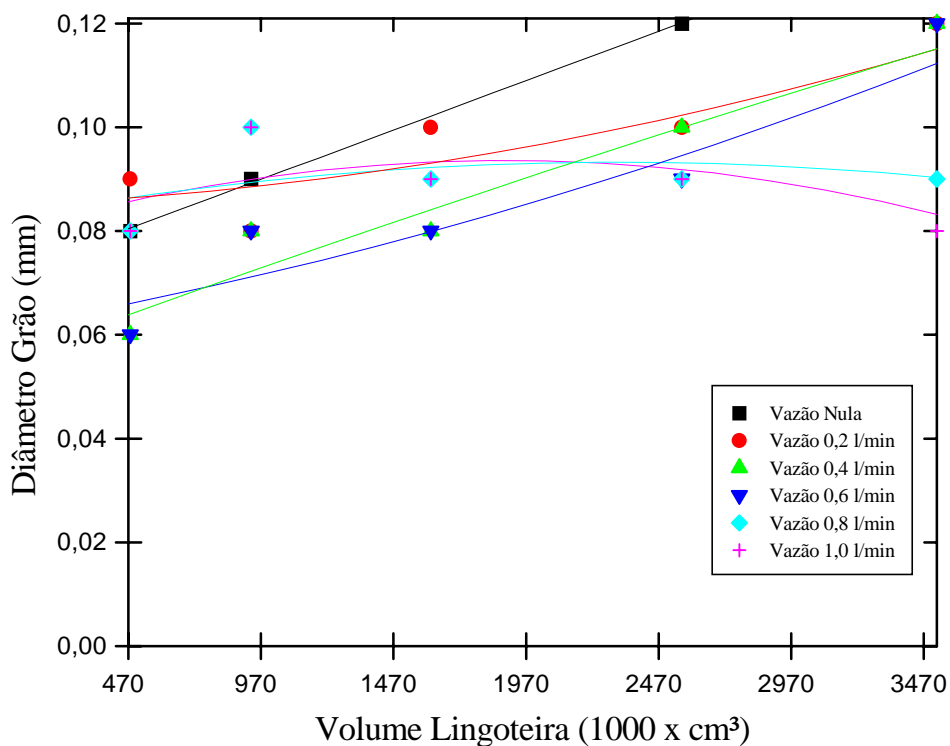


Figura 3 - Variação do diâmetro do grão em função do volume da lingoteira para o alumínio solidificado à pressão de 2,0 kgf/cm² nas vazões de gás de zero à 1,0 l/min.

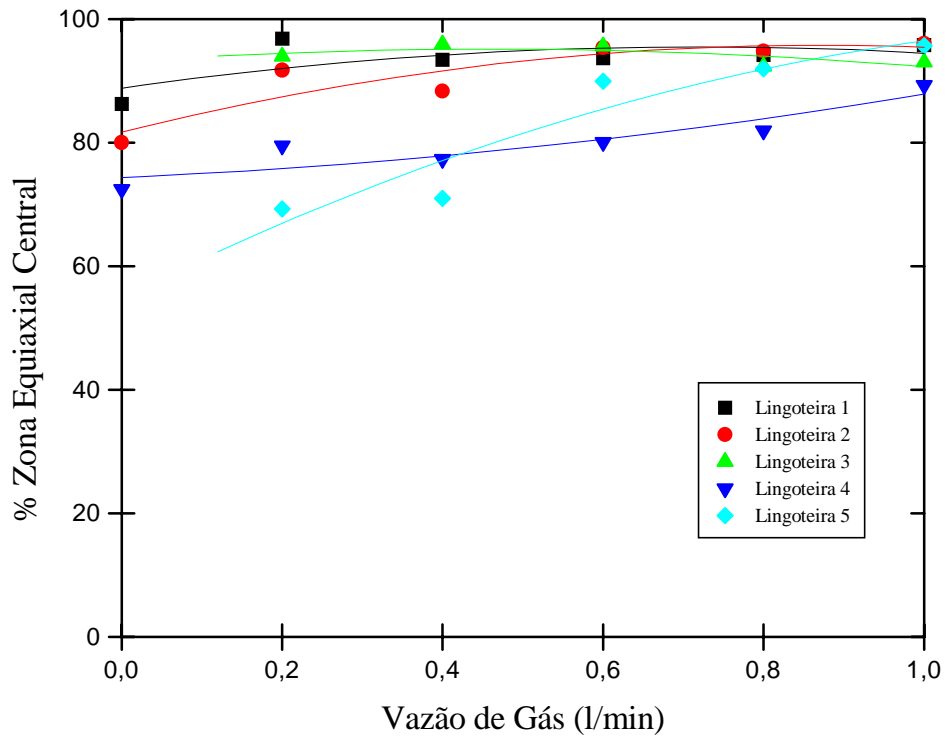


Figura 4 - Variação da porcentagem de formação da zona equiaxial central em função da vazão de gás para o alumínio solidificado à pressão de 2,0 kgf/cm² nas Lingoteiras 1, 2, 3, 4 e 5.

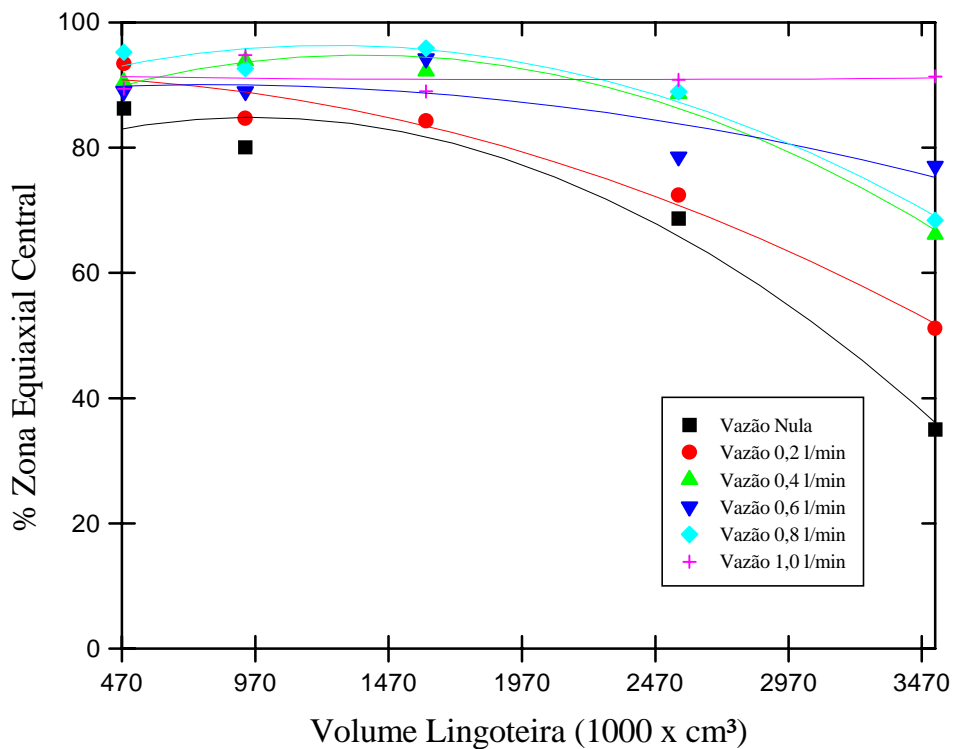


Figura 5 - Variação da porcentagem de formação da zona equiaxial central em função do volume da lingoteira para o alumínio solidificado à pressão de 2,0 kgf/cm² nas vazões de gás de zero a 1,0 l/min.

A “Figura 5” apresenta os resultados encontrados para a porcentagem de formação da zona equiaxial central em função do volume da lingoteira para o alumínio solidificado, na pressão de $2,0 \text{ kgf/cm}^2$, nas diversas vazões de gás consideradas. Verificamos que, quando a vazão de gás é nula, à medida que as dimensões das lingoteiras aumentam ocorre a diminuição gradativa da presença de zona equiaxial central nas peças obtidas, o que pode ser explicado pelos mesmos motivos expostos anteriormente quando da análise do diâmetro do grão em função do aumento do volume da lingoteira. Para as vazões de gás de 0,2 a 0,8 l/min acontece um aumento progressivo da quantidade de zona equiaxial central formada, em relação à situação anteriormente analisada, a qual diminui à proporção que as dimensões das lingoteiras se elevam indicando, assim, que os efeitos introduzidos pela variável “aumento do volume da lingoteira” predominam sobre a variável “aumento da vazão de gás”. Somente quando a referida vazão é de 1,0 l/min, observa-se a inibição desses efeitos uma vez que a quantidade de zona equiaxial central permanece a mesma nas diversas lingoteiras.

4. CONCLUSÕES

(a) Vazão do Gás Inerte x Diâmetro do Grão

- Os valores encontrados revelam que o aumento progressivo da vazão de gás nas condições de solidificação assumidas parece não implicar, necessariamente, na diminuição do diâmetro do grão do alumínio fato que, de certa maneira, contraria algumas tradicionais teorias existentes na literatura que consideram os efeitos proporcionados pela convecção forçada como um mecanismo fundamental para obtenção de estruturas equiaxiais refinadas.

(b) Volume da Lingoteira x Diâmetro do Grão

- Para a pressão correspondente a $2,0 \text{ kgf/cm}^2$ e na presença de baixos valores de vazão do gás, os efeitos introduzidos pela variável “aumento do volume da lingoteira” predominam sobre a variável “aumento da vazão de gás”. Elevados valores para a vazão de gás, no entanto, tendem a inibir tais efeitos.

(c) Vazão do Gás Inerte x Porcentagem de Formação da Zona Equiaxial Central

- Em todos os casos estudados a porcentagem de formação da zona equiaxial central aumenta à medida que se elevam os valores da vazão de gás sendo que este efeito é bem mais significativo nas lingoteiras de maiores dimensões uma vez que em condições normais de solidificação, isto é, na ausência da vazão e pressão de gás, lingoteiras de maiores dimensões, nas mesmas condições de solidificação, tendem proporcionar estruturas grosseiras.

(d) Volume da Lingoteira x Porcentagem de Formação da Zona Equiaxial Central

- Para a pressão correspondente a $2,0 \text{ kgf/cm}^2$ e na presença de baixos valores de vazão do gás, os efeitos introduzidos pela variável "aumento do volume da lingoteira" predominam sobre a variável "aumento da vazão de gás". Elevados valores para a vazão de gás, no entanto, tendem a inibir tais efeitos.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHIAVERINI, V. "O Papel da Engenharia na Era dos Materiais". III Congresso de Engenharia Mecânica Norte Nordeste (III CEM-NNE/94), Pág. 66-67, 1994.

MOHANTY, P. S. , GRUZLESKI, J. E. "Mechanism of Grain Refinement in Aluminium". Acta Metall Mater, v.43, n 5, pág. 2001-2012, 1995.

MORANDO, R. , BILONI, G. S. , COLE, AND BOLLING , G. F. "The Development of Macrostructure in Ingots of Increasing Size". Metallurgical Transactions, vol.1, may 1970, pág. 1407-1412.

OHNO, A. "The Solidification of Metals". Chijin Shokan Co. Ltda, Tokyo 1976.

OLIVEIRA, C. S & GONZALEZ, C. H. "Determinação do Tamanho de Grão de uma Liga de Alumínio Al-Mg-Si, Via Análise Automática de Imagem". V Congresso de Engenharia Mecânica Norte Nordeste (VCEM-NNE/98), pág. 103-109, 1998

SIQUEIRA, C.A.S.F. "Análise da Influência da Variação da Vazão e Pressão de um Gás Inerte na Macroestrutura de Solidificação do Alumínio em Lingoteiras de Dimensões variadas". Dissertação de Mestrado Universidade Federal do Pará - UFPA - Belém – Pará, 1998.

SIEGEL, M. "Tendências Atuais da Indústria do Alumínio". Metalurgia – ABM, v.47, setembro 1991, pág. 259.

WANG, C.Y. , BECKERMANN, C. "Equiaxed Dendritic Solidification With Fluid Flow". Metallurgical Transactions, v.27 A, pág.229-234, 1996.

IMPORTANCE OF DIMENSIONS OF MOLD AND OF VARIATION OF FLOW AN INERT GAS IN THE FORMATION OF THE AXIAL ZONE OF THE ALUMINUM

Abstrac: *The foundry process of metallic products is considered the oldest of the conventional processes of production, having been developed in an empiric way there are thousands of years. In spite of its great technological importance, only in the last decades the first systematic researches appeared on the phenomenon of the solidification of metals, motivated by the growing need of the use of new such processes as foundry under pressure, foundry centrifuges, foundry for microfusion, continuous casting, rheocasting, etc. Therefore, one of the objectives of the physical metallurgy in the last years it has been the investigation of techniques able to control the dimension, it form, distribution and orientation of the crystalline grains of melted products, seeking the obtaining of structures of homogeneous solidification and isotropics, compatible with the demanded mechanical properties. Thus, the main objective of this work is to present a theoretical-experimental study on the effects of the dimension of the mold and of the variation of the flow of an inert gas in the formation of the axial zone of the aluminum. For so much, five metallic molds of variable dimensions (height, thickness and diameter) are used as well as flow of the inert gas corresponding to zero, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 and 1,0 l/min.*

Key Words: Solidification, Dimensions, Grains, Structures e Aluminum.