



# ANÁLISE MACRO E MICROESTRUTURAL DE LIGAS DO SISTEMA Al-Si SOLIDIFICADAS UNIDIRECIONALMENTE<sup>1</sup>

Fabício Dias Magalhães<sup>2</sup>  
Marcelo Torres de Oliveira<sup>3</sup>  
Flaviano dos Santos Rodrigues<sup>4</sup>  
Adriano Alves Rabelo<sup>5</sup>

## Resumo

Estabelecer correlações entre macro e microestruturas e as propriedades mecânicas decorrentes, é uma tarefa complexa e que se inicia pela análise dos diferentes aspectos macro e microestruturais, como ocorrência de transição colunar/equiaxial (TCE), tamanho de grão e microestruturas de solidificação. Desta forma o presente trabalho consiste na solidificação das ligas Al-5%Si e Al-9%Si em um dispositivo de solidificação unidirecional refrigerado a água, onde é obtido o histórico térmico dos lingotes por meio de termopares dispostos ao longo da lingoteira, e os mesmos conectados a um registrador interfaciado a um computador para a aquisição de dados. Observou-se, nas duas ligas, a ocorrência de estruturas colunares e equiaxiais, sem variação na posição da TCE, estando de acordo com a literatura e afirmando não haver interferência do teor de Si na posição da TCE para ligas do sistema Al-Si. Observou-se pequenos espaçamentos dendríticos secundários (EDS) nas posições próximas a base do lingote e um aumento destes espaçamentos no sentido longitudinal ocasionado por uma alta taxa de resfriamento na base, e um decréscimo desta taxa ao longo do lingote. Este comportamento microestrutural, originou um perfil de dureza que é decrescente no sentido longitudinal da base para o topo do lingote.

**Palavras-chave:** Solidificação; Estruturas; Espaçamentos.

## MACRO AND MICROSTRUCTURAL ANALYSIS OF ALLOYS OF THE Al-Si SOLIDIFY VALVE

### Abstract

Establish links between macro and microstructures and mechanical properties arising, is a complex task and it begins with the analysis of various aspects of macro and micro, as the occurrence of transition columnar/equiaxed (TCE), grain size and microstructures of solidification. Thus the present study is the solidification of alloys Al-5% Si and Al-9% Si in a device cooled unidirectional solidification of water, which is obtained from the thermal history of the ingots by means of thermocouples placed along the ingot, and they connected to a recorder interfaced to a computer for data acquisition. It was observed in both alloys, the occurrence of columnar structures and equiaxiais, no change in the position of TEC, which is consistent with the literature stating that no interference content of Si in the position of TEC for alloys in the Al-Si. There were little secondary dendritic spacings (EDS) in positions near the base of the block and an increase of spacing in the longitudinal direction caused by a high cooling rate at the base, and a decrease of this rate throughout the ingot. This behavior microstructure resulted in a hardness profile which is decreasing in the longitudinal direction of the base to the top of the block.

**Key words:** Solidification; Structures; Spacing.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Aluno de Graduação de Engenharia de Materiais – UFPA – Fabricio742@hotmail.com

<sup>3</sup> Aluno de Graduação de Engenharia de Materiais – UFPA - oliveira.engmat@gmail.com

<sup>4</sup> Aluno de Graduação de Engenharia de Materiais – UFPA - rodriguesengmat05@hotmail.com

<sup>5</sup> Professor Dr. do curso de Engenharia de Materiais – UFPA - adrianoalves@ufpa.br



## 1 INTRODUÇÃO

As ligas de alumínio são utilizadas nas mais diversas aplicações, desde utensílios domésticos, artigos decorativos, peças para automóveis, na fuselagem de aviões. Uma das características que possibilita esse leque de aplicações do alumínio é sua versatilidade, pois suas propriedades podem ser ajustadas em uma larga faixa de valores, dependendo dos elementos de liga utilizados.<sup>(1)</sup>

As ligas de alumínio, quando comparadas a outras ligas, adéquam-se bem ao processo de fundição, pois possuem propriedades importantes como ótima fluidez, baixo ponto de fusão, baixa solubilidade para gases (com exceção do hidrogênio), são quimicamente estáveis e possuem uma ótima aparência.<sup>(2)</sup> Um exemplo são as ligas do sistema alumínio-silício amplamente utilizadas na indústria por apresentarem uma atrativa combinação entre propriedades mecânicas e fundibilidade. Estas propriedades são fortemente dependentes do processo de fundição empregado, das adições de elementos para modificação do eutético e da estrutura granulométrica.

A macroestrutura bruta de solidificação das ligas metálicas geralmente possui uma combinação de três zonas distintas: uma zona coquilhada, próxima à superfície do molde; uma zona colunar, composta por grãos de formato alongado; e uma zona equiaxial, formada por grãos equiaxiais semelhantes aos grãos da zona coquilhada, porém com tamanho médio maior.<sup>(3)</sup> Nem sempre todas estas zonas estão presentes, mas, quando as zonas colunar e equiaxial existirem, a região de transição entre elas é chamada de zona de transição colunar-equiaxial (TCE). Como as propriedades de um metal estão intrinsecamente ligadas à sua macroestrutura de grãos e especificamente à quantidade de zona colunar e equiaxial, existem uma grande motivação para se prever a transição colunar-equiaxial.

Durante a solidificação, a transição colunar equiaxial ocorre quando os grãos equiaxiais à frente da zona de crescimento colunar impedem o crescimento desta frente. O aparecimento dos grãos equiaxiais, por sua vez, depende dos mecanismos de nucleação e crescimento comuns aos processos de transformação de fases. Atualmente, os detalhes destes mecanismos são relativamente bem entendidos.<sup>(4)</sup>

Alguns trabalhos da literatura afirmam que o tamanho do espaçamento interdendrítico é mais importante que o próprio tamanho de grão para as propriedades mecânicas que resultam do arranjo microestrutural. Por outro lado, os espaçamentos dendríticos dependem das condições térmicas durante o processo de solidificação. Sabe-se que para a maioria das condições de solidificação, a morfologia dendrítica é a característica dominante da microestrutura. Microestruturas dendríticas finas em fundidos, caracterizadas pelos espaçamentos dendríticos, são reconhecidas pelas propriedades mecânicas superiores.

Diante disto, o presente trabalho tem por objetivo, através da solidificação unidirecional ascendente, registrar a evolução da temperatura ao longo do processo e analisar as estruturas resultantes da solidificação, assim como verificar a relação entre a macroestrutura e microestrutura com a propriedade mecânica através de ensaio de dureza HLD nas ligas hipoeutéticas Al-5%Si e Al-9%Si.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

As ligas Al-5%Si e Al-9%Si utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho foram obtidas a partir dos elementos comercialmente puros, fundidos em um forno tipo mufla a temperatura de 760°C. A solidificação foi realizada por meio de um

dispositivo de solidificação unidirecional vertical ascendente, que consiste em um forno tubular aquecido radialmente com resistências do tipo global, acrescido de um sistema de refrigeração a água na parte inferior (Figura 1). Foi utilizada uma lingoteira, de seção cônica, de aço inoxidável SAE 310 com 150 mm de altura. Neste trabalho adotou-se superaquecimento de 10% acima da temperatura *liquidus* das ligas.

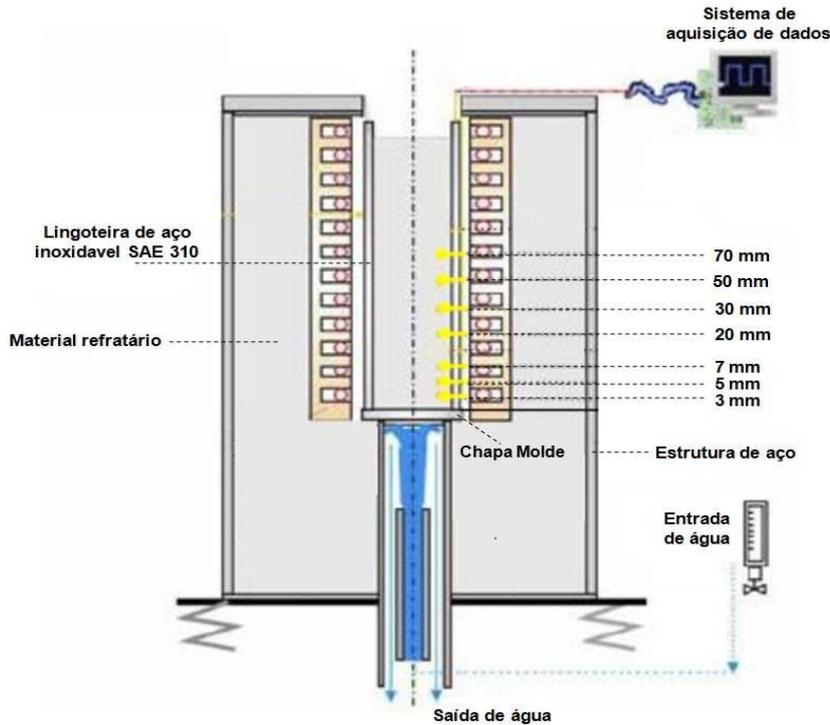


Figura 1 . Representação esquemática do sistema de solidificação unidirecional.<sup>(5)</sup>

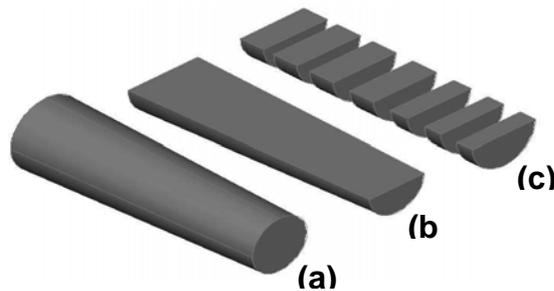


Figura 2. Forno vertical refrigerado a água utilizado no processo de solidificação.

As temperaturas no metal foram monitoradas durante a solidificação através de um conjunto de 7 termopares tipo K, dispostos ao longo da lingoteira nas posições 3 mm, 5 mm, 7 mm, 20 mm, 30 mm, 50 mm e 70 mm em relação a base. Todos os termopares foram conectados a um registrador ligado a um computador para aquisição automática de dados.

Após a confecção dos lingotes, os mesmos foram seccionados longitudinalmente e posteriormente lixados em lixadeira rotativa utilizando-se uma

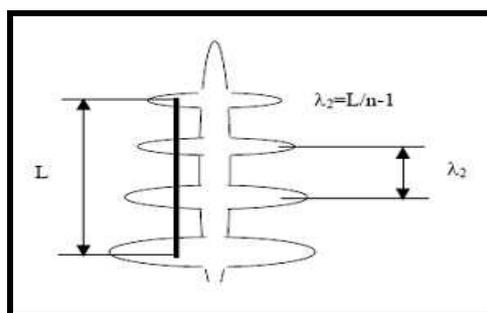
sequência de lixas de carbeto de silício (100 mesh, 220 mesh, 320 mesh, 400 mesh e 600 mesh). Para revelação da macroestrutura as superfícies das amostras foram atacadas com solução ácida composta por 20 ml HCl, 20 ml HNO<sub>3</sub> e 5 ml HF em 25 ml de H<sub>2</sub>O.<sup>(5)</sup> Após a caracterização macroestrutural foram retiradas 7 amostras referentes as posições 3 mm, 5 mm, 7 mm, 20 mm, 30 mm, 50 mm e 70 mm, em relação a base do lingote (Figura 3), estas foram submetidas a um novo lixamento com uma sequencia de lixas de carbeto de silício (100 mesh, 220 mesh, 320 mesh, 400 mesh, 600 mesh, 800 mesh, 1.000 mesh e 1.200 mesh) e polimento em uma politriz rotativa. Foi utilizado como abrasivo (pasta de diamante) de 9 μ, 6 μ, 3 μ, 1 μ e 1/4 μ. As faces polidas foram atacadas com o reagente 5%HF em água destilada, para revelar suas microestruturas.<sup>(6)</sup>



**Figura 2.** Esquema referente à preparação das amostras: (a) Lingote inteiro, (b) Corte longitudinal para caracterização macroestrutural e (c) cortes para caracterização microestrutural.

A caracterização continuou com a captura de imagens da microestrutura das amostras por meio de um microscópio óptico metalográfico seguido da quantificação dos espaçamentos dendríticos secundário (EDS), representados por  $\lambda_2$ .

Os valores de  $\lambda_2$  foram medidos de acordo com esquema mostrado na Figura 3. Este método consiste em calcular o valor de  $\lambda_2$  através da média das distâncias entres os braços adjacentes (ramificações secundárias) sobre a seção longitudinal (paralela ao fluxo de calor ou a direção de crescimento) de uma dendrita primária, onde n é o número de braços secundários. Desta forma, foram realizadas 20 medições de  $\lambda_2$  para cada posição, a partir da interface metal/molde.

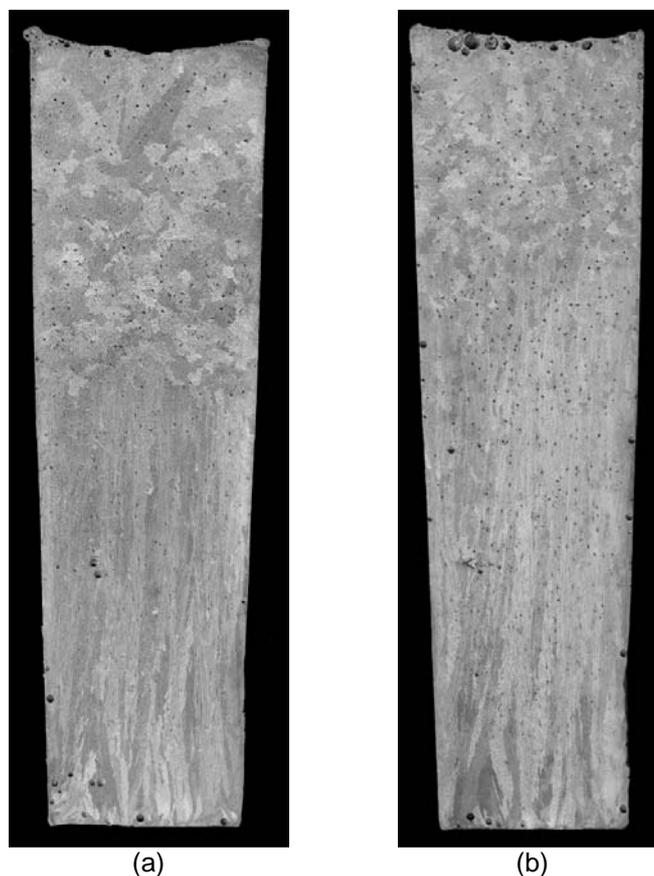


**Figura 3.** Esquema para quantificação do parâmetro  $\lambda_2$ .<sup>(5)</sup>

Os procedimentos experimentais foram finalizados com o ensaio de dureza HLD realizados em uma máquina da marca equotip 3, foi realizada uma varredura nas posições 3 mm, 5 mm, 7 mm, 20 mm, 30 mm, 50 mm e 70 mm da base do lingote.

### 3 RESULTADOS

Na Figura 4 são apresentadas as imagens das macroestruturas de solidificação para as ligas Al-5%Si e Al-9%Si, onde se nota a presença de grãos colunares e equiaxiais com predominância da zona colunar, ao longo do lingote, e uma linha de transição colunar/equiaxial bastante definida.



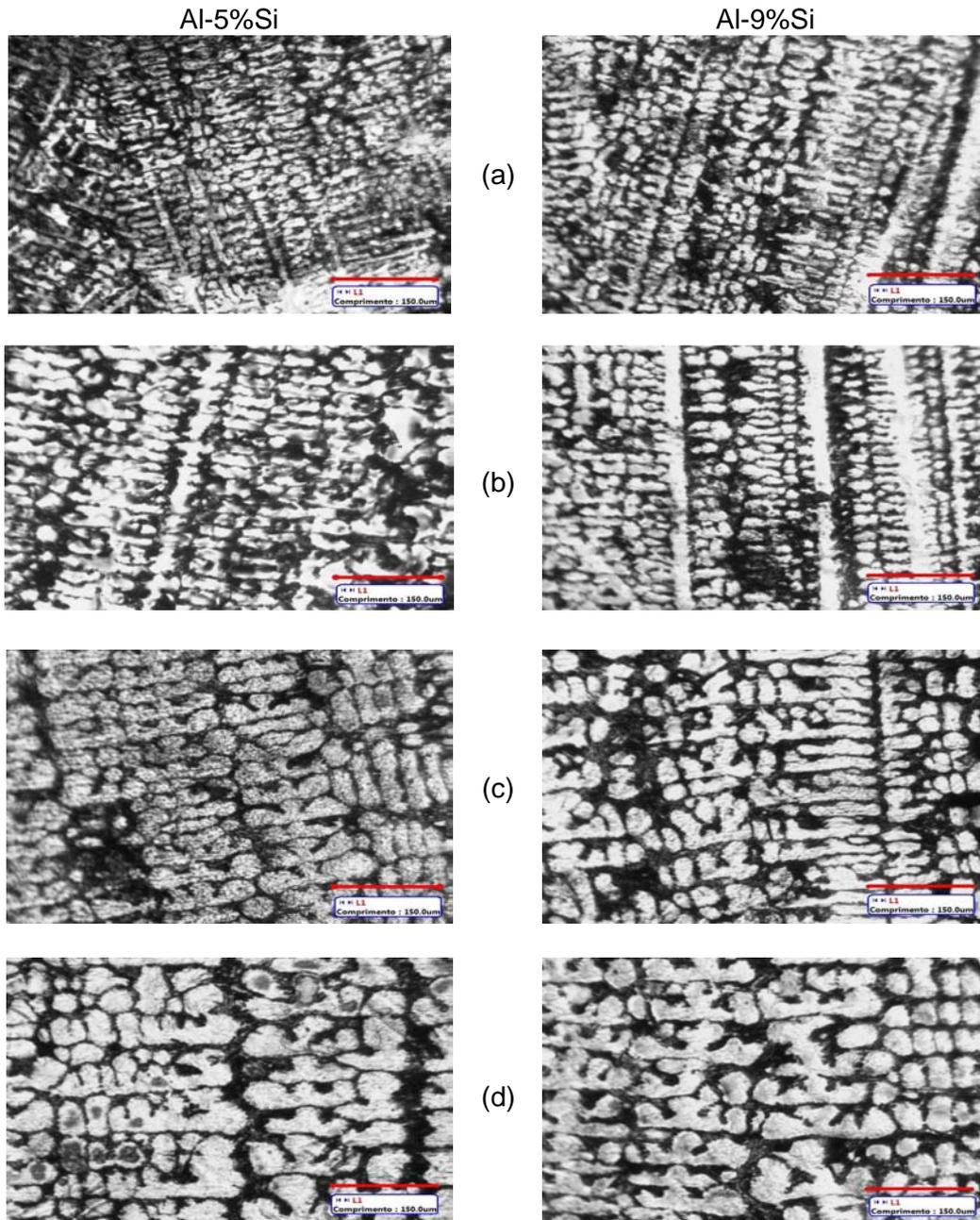
**Figura 4.** Macroestruturas da liga: (a) Al-5%Si e (b) Al-9%Si, solidificadas unidirecionalmente.

Através das macroestruturas foram determinadas as posições da transição colunar/equiaxial para os dois lingotes submetidos à solidificação direcional. As posições, em relação à base do lingote, são apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Posição da TCE em relação à base do lingote

Liga	TCE
Al – 5%Si	83 mm
Al – 9%Si	85 mm

Na Figura 5, são mostradas imagens das microestruturas para as ligas de trabalho. É possível verificar através das imagens que os espaçamentos dendríticos secundários tornaram-se cada vez maiores à medida que se avança a solidificação, pois a velocidade de solidificação e a transferência de calor entre metal e molde no início da solidificação são elevadas, para as duas ligas. Com o decorrer da solidificação essas taxas de resfriamento vão diminuindo, o que resulta em um aumento dos espaçamentos dendríticos da base para o topo dos lingotes.



**Figura 5.** Micrografias das ligas Al-5%Si e Al-9%Si contendo os espaçamentos dendríticos secundários para as posições (a) 3 mm, (b) 7 mm, (c) 20 mm e (d) 70 mm em relação a base da lingoteira. (aumento de 100x)

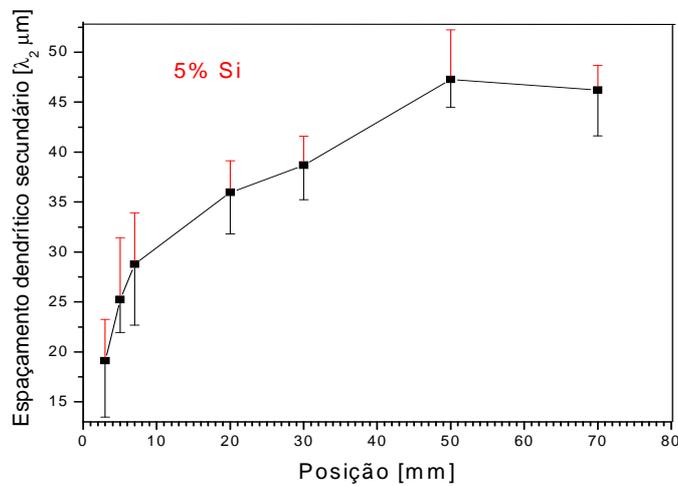
As médias dos resultados dos espaçamentos dendríticos secundários são mostradas na Tabela 2.



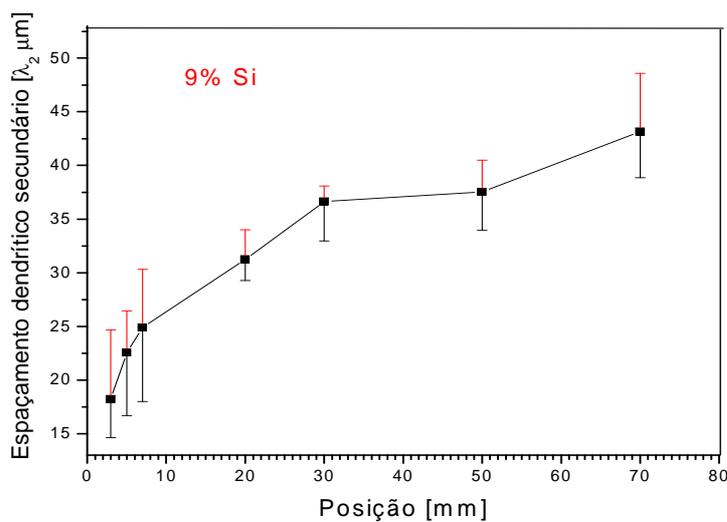
**Tabela 2.** Valores médios dos EDS ( $\lambda_2$ )

Posições (mm)	$\lambda_2$ ( $\mu\text{m}$ )	
	Al - 5%Si	Al - 9%Si
3	19,11	18,21
5	25,23	22,56
7	28,76	24,89
20	35,97	31,25
30	38,68	36,65
50	47,26	37,54
70	46,21	43,16

Os gráficos das Figuras 6 e 7 mostram os EDS respectivamente para as ligas Al-5 e 9%Si ao longo do lingote para a solidificação direcional ascendente.



**Figura 6.** Espaçamentos dendríticos secundários para as posições 3 mm, 5 mm, 7 mm, 20 mm, 30 mm, 50 mm e 70 mm em relação à base do lingote liga Al-5%Si.



**Figura 7.** Espaçamentos dendríticos secundários para as posições 3 mm, 5 mm, 7 mm, 20 mm, 30 mm, 50 mm e 70 mm em relação à base do lingote liga Al-9%Si.



A Tabela 3 mostra os resultados obtidos por meio de ensaio de dureza HLD.

**Tabela 3.** Valores médios para o ensaio de dureza.

Posições (mm)	Dureza HLD	
	Al - 5%Si	Al - 9%Si
3	193	209
5	185	197
7	186	188
20	84	110
30	80	97
50	75	83
70	67	85

Ocorreu ao longo do lingote nas posições especificadas uma redução na dureza conforme se aproximava do topo do lingote, as posições 3, 5 e 7 apresentaram dureza elevada em relação as outras posições devido a extração de calor quase instantânea.

#### 4 DISCUSSÃO

As macroestruturas reveladas apresentaram predominância da zona colunar ao longo da superfície, com uma região de transição colunar/equiaxial bastante definida. Não foi verificada variação significativa, na posição de transição colunar/equiaxial, estando de acordo com a literatura. Segundo Gandin,<sup>(7)</sup> não há interferência do teor de Si na posição da TCE para ligas do sistema Al-Si, o que foi confirmado por estudos anteriores, conduzidos por Peres.<sup>(5)</sup>

Foi verificado que os espaçamentos dendríticos secundários se tornam maiores à medida que se avança na solidificação. Isso ocorre devido à gradativa diminuição da extração de calor ao longo do lingote, pois à medida que a interface sólido/líquido avança a região já solidificada, a mesma opera como uma barreira à extração de calor, o que gera velocidades de solidificação cada vez menores para posições mais afastadas da base do lingote, onde o calor está sendo extraído. Essa diminuição na velocidade de solidificação permite que as estruturas tenham tempo suficiente para crescerem, gerando espaçamentos dendríticos maiores. Estes resultados estão de acordo com estudos realizados por Peres,<sup>(5)</sup> mostrando que os espaçamentos dendríticos secundários diminuem com o aumento da velocidade da isoterma *liquidus* ( $V_L$ ) e aumentam com a diminuição do tempo local de solidificação ( $T_{SL}$ ).

A liga mais diluída, Al-5%Si, apresentou espaçamentos dendríticos secundários maiores do que na liga Al-9%Si para todas as posições estudadas, de acordo com a literatura, os EDS tendem a diminuir com o aumento do teor de silício para as ligas hipoeutéticas do sistema Al-Si.

A dureza mostrou-se muito coerente com os estudos realizados e comparados com outros trabalhos, a dureza é decrescente da posição 3 mm para a posição 70 mm da base do lingote e aumenta conforme o aumento do teor de Si.

#### 5 CONCLUSÃO

Os espaçamentos dendríticos secundários em condições de solidificação transitória diminuem com o aumento da taxa de resfriamento causado pela refrigeração na base da lingoteira. Os espaçamentos dendríticos secundários

apresentam uma redução com o aumento do teor de silício. A dureza é decrescente da posição 3 mm para a posição 70 mm da base do lingote e aumenta conforme o aumento do teor de Si.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem a Universidade Federal do Pará pelo incentivo aos alunos.

### **REFERÊNCIAS**

- 1 E. L. ROOY, Aluminum and aluminum alloys, **American Society for Metals**. Metals Handbook, 19<sup>th</sup> ed. Ohio, v. 15, pp. 743-769. 1988.
- 2 PEREIRA, G. S.; BOLFARINI, C.; KIMINAMI, C. S.; BOTTA FILHO, W. J. A influência da composição química e da taxa de resfriamento na microestrutura da liga Al-Si A380. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E ENGENHARIA DOS MATERIAIS, 15., 2002, Natal. Rio Grande do Norte: **CBECIMAT, 2002**. p. 2920-2926.
- 3 GARCIA, A.; Solidificação: Fundamentos e Aplicações, **Editora da UNICAMP**, São Paulo 2001. cap. 8, p. 281-294.
- 4 FLOOD, S.C., HUNT, J. D. Columnar and equiaxed growth I. A model of a columnar front with a temperatura dependent velocity. **Journal of Cristal Growth**, v. 82, p. 543-551. 1987.
- 5 PERES, M.D. Desenvolvimento da macroestrutura e da microestrutura na solidificação unidirecional transitória de ligas Al-Si, **Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP**, Campinas – São Paulo. 2005.
- 6 SIQUEIRA, C.A.; CHEUNG, N.; GARCIA, A., 2003, Solidification Thermal Parameters Affecting the Colunar-to-Equiaxed Transition. **Metallurgical and Materials transactions A**, v. 33A, pp.2107-2118.
- 7 GANDIN CH. –A.. From constrained to unconstrained growth during directional solidification, **Acta Materialia**, v. 48, pp. 2483-2501, 2000.