



# CORRELAÇÃO ENTRE ESTRUTURAS DE SOLIDIFICAÇÃO E TRATAMENTOS TÉRMICOS DA LIGA AL-4%CU<sup>1</sup>

Bernardo Reis<sup>2</sup>  
Carlos Alexandre dos Santos<sup>3</sup>

## Resumo

Neste trabalho analisou-se a influência da estrutura bruta de solidificação nas condições de tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento natural da liga Al-4,0%Cu. Esta liga foi fundida a 720°C em lingoteira em aço inoxidável AISI 304 resfriado na base, permitindo condições de solidificação unidirecional vertical ascendente. Termopares tipo K foram posicionados ao longo da altura do lingote. Amostras longitudinais e transversais foram analisadas quanto à macroestrutura e microestrutura e correlacionadas com as condições de solidificação. Posteriormente, as mesmas foram submetidas a tratamentos térmicos de solubilização em temperatura de 540°C em diferentes tempos: 7h, 8h e 9h, seguidos por resfriamento em água a 25°C e envelhecidas naturalmente. Após a solubilização e durante o envelhecimento natural, as amostras foram caracterizadas por análises metalográficas e medições de dureza Brinell. Os tratamentos térmicos realizados demonstraram a influência da estrutura bruta de fusão sobre as características estruturais nas condições analisadas, onde estruturas colunares mais refinadas e com menores espaçamentos dendríticos apresentaram valores de dureza maiores durante as primeiras etapas do envelhecimento, atingindo até 50% de aumento em relação à condição fundida.

**Palavras-chave:** Liga Al-4,0%Cu fundida; Tratamento térmico de solubilização; Envelhecimento natural.

## CORRELATION OF AS-CAST STRUCTURE IN THE SOLUTIONING CONDITIONS OF THE AL-4.0WT%CU ALLOY

### Abstract

This work focused on the study of the influence of the as-cast structure with the conditions of the heat treatment of solutioning and natural ageing of the Al-4,0wt%Cu alloy. This alloy was melted at 720°C in a stainless steel AISI 304 ingot mould which is cooled in the base, allowing upward unidirectional solidification. Thermocouples type K were positioned in specific positions in the mold and along the height of the ingot. Longitudinal and transverse samples were analyzed in relation to macrostructure and microstructure, and these were correlated with the solidification conditions determined according to the thermal profiles obtained during the solidification. After that, the same samples were submitted to heat treatments of solutioning at the temperature of 540°C at different times, followed by cooling in water at 25°C, and aged naturally. After the heat treatments of solutioning and during natural ageing, the samples were characterized by means of metallographic analyses and hardness measurements. The heat treatments performed have demonstrated the influence of the as-cast structure on the solutioning conditions.

**Key-words:** As-Cast Al-4,0wt%Cu alloy; Solutioning; Natural ageing.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 41º Seminário de Aciaria – Internacional, 23 a 26 de maio de 2010, Resende, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> MSc, Centro de Excelência em Tecnologias Avançadas SENAI – CETA – RS

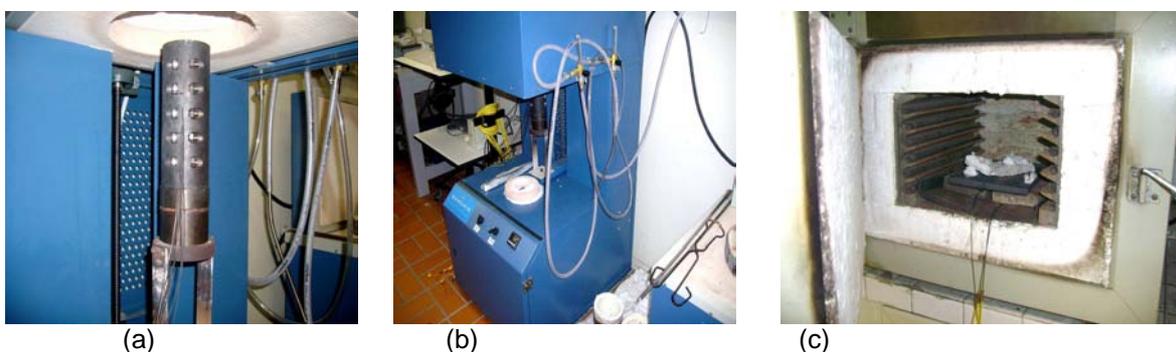
<sup>3</sup> Professor, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Faculdade de Engenharia

## 1 INTRODUÇÃO

O estudo dos processos de solidificação dos metais na formação de ligas, e em especial da liga fundida Al-4,0%Cu, é de grande importante por sua aplicação em diversos campos da engenharia tais como na indústria aeronáutica e automobilística.<sup>(1,2)</sup> Para atender às exigências de projeto, a peça sólida deverá apresentar aspectos estruturais e geométricos próprios. Especificamente no campo da metalurgia, estes são evidentes dadas a sua importância já que, com exceção de peças sinterizadas, todos os metais passam, em alguma etapa de seu processamento, por um processo de fusão e solidificação, seja na fabricação de peças fundidas em moldes com a forma desejada ou na produção de lingotes para posterior conformação.<sup>(3,4)</sup> O objetivo principal deste trabalho foi analisar a influência da estrutura bruta de solidificação nas condições de tratamentos térmicos de solubilização e posterior envelhecimento natural da liga Al-4%Cu. A carência de trabalhos com esta liga fundida, diferente para com as conformadas, foi o que nos motivou para a realização deste trabalho. Todas as figuras e tabelas que complementam este trabalho foram extraídas da dissertação do autor.<sup>(3)</sup>

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A liga de alumínio utilizada nos experimentos deste trabalho é similar a liga a AA 201.2, (na classificação da NBR 6834:2000) com 95,60% de alumínio, 4,04% de cobre, 0,02% de magnésio, 0,01% de manganês, 0,10% de silício, 0,21% de ferro e 0,01% de Ti. Esta liga caracteriza-se por apresentar boa usinabilidade, média fluidez, baixa resistência à corrosão, bom acabamento com polimento, média soldabilidade e média resistência mecânica. Esta foi solidificada unidirecionalmente em forno tubular vertical e tratada termicamente por solubilização a 540°C, resfriada em água a 25°C e envelhecida naturalmente. Foram utilizados os seguintes equipamentos/ dispositivos / processos: Forno de Fusão/Solidificação Unidirecional; Lingoteira de Aço Inoxidável AISI 304; Termopares Tipo K; Sistema de Resfriamento; Sistema Computacional de Aquisição de Dados; Medidores de Vazão; equipamentos para Metalografia; Microscópio Óptico e Eletrônico; Durômetro Brinell e Forno para Tratamento Térmico (ver detalhes na Figura 1).



**Figura 1.** Lingoteira (a), Forno de Fusão/Solidificação (b), Forno para TT (c).

O procedimento experimental deste trabalho segue no fluxograma da Figura 2.

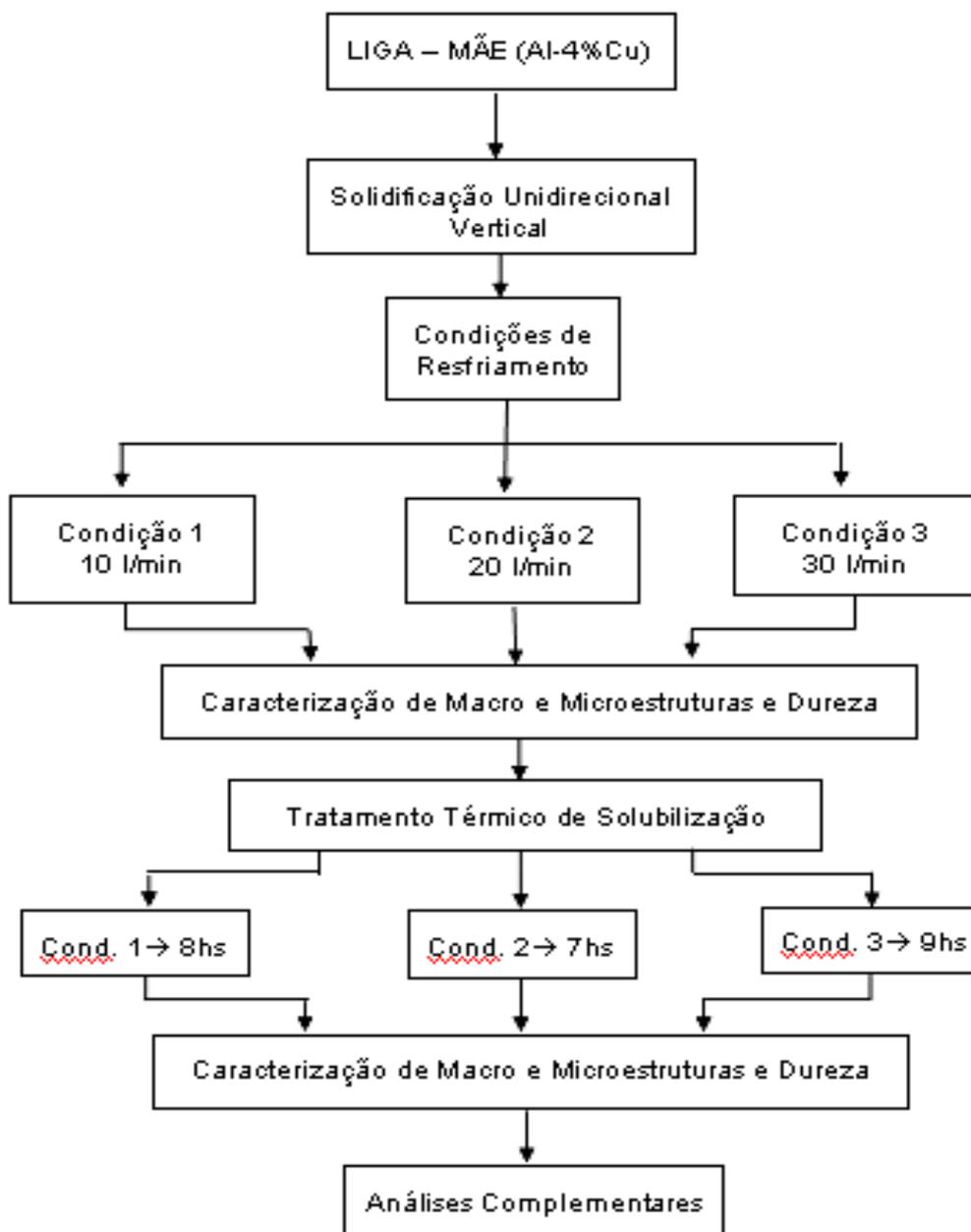


Figura 2. Fluxograma do procedimento experimental.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados a seguir mostram as curvas de resfriamento, os parâmetros de solidificação, as microestruturas e as durezas da Liga Al-4%Cu solidificada e solubilizada para a primeira condição deste trabalho.

#### 3.1 Condição 1

Para a etapa de solidificação, a temperatura média do banho líquido ficou em torno de 720°C, a temperatura da chapa-molde, que recebeu diretamente o fluido de resfriamento, iniciou em 625°C, e o gradiente de temperatura entre os termopares (TPs) ficou em aproximadamente 35°C, diminuindo que se que de maneira constante



ao longo do processo de solidificação, conforme Figura 3. Pode-se constatar que houve uma coerência nas curvas de resfriamento durante a solidificação, com uma taxa de resfriamento decrescente. O gráfico apresenta as curvas de resfriamento obtidas, e as linhas pontilhadas correspondem às temperaturas liquidus ( $T_L - 645^\circ\text{C}$ ) e solidus ( $T_S - 548^\circ\text{C}$ ).

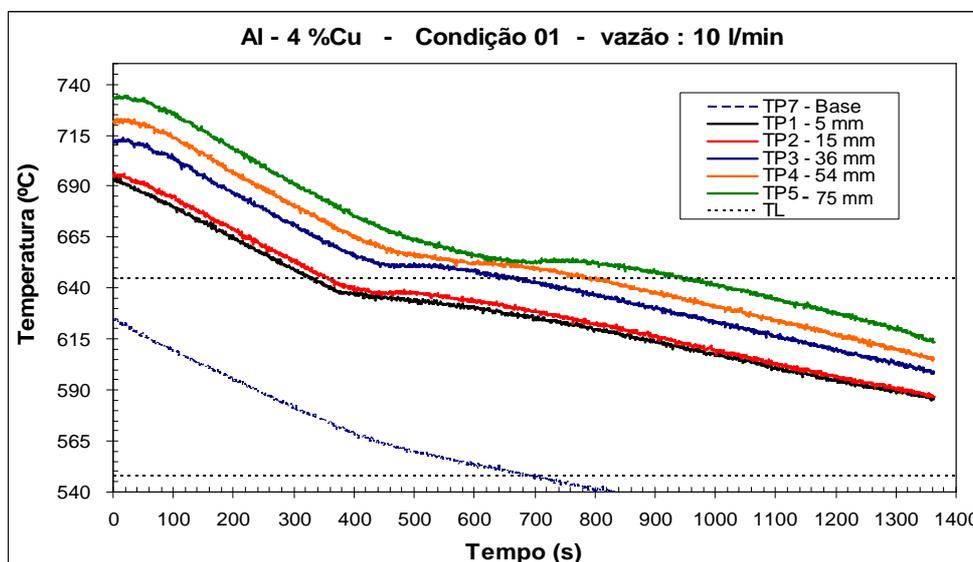


Figura 3. Curva de Resfriamento - Experimento 01 - Vazão 10 l/min.

A Tabela 1 mostra os principais parâmetros térmicos de solidificação determinados a partir das curvas de resfriamento  $T \times t$ .

Tabela 1. Principais parâmetros térmicos de solidificação – Condção 1

Tempo (s)	Posição (mm)	$V_s$ (mm/s)	DT ( $^\circ\text{C}$ )	$G_{TL}$ ( $^\circ\text{C}/\text{mm}$ )	Tr ( $^\circ\text{C}/\text{s}$ )	Início TCE	Final TCE
380	5	0,308	8,00	0,800	0,246	65mm	75mm
435	15	0,269	14,99	0,714	0,192		
482	36	0,243	6,51	0,362	0,088		
601	54	0,195	3,84	0,175	0,034		
701	76	0,167	-	-	-		

A partir dos dados da Tabela 1, foram construídos os gráficos de Tempo de Solidificação, mostrando o tempo de passagem da isoterma liquidus pela posição do termopar, de Velocidade de Solidificação, mostrando a velocidade da isoterma liquidus versus o posicionamento no lingote, assim como de Gradiente Térmico e de Taxa de Resfriamento versus a posição do lingote (Figura 4).

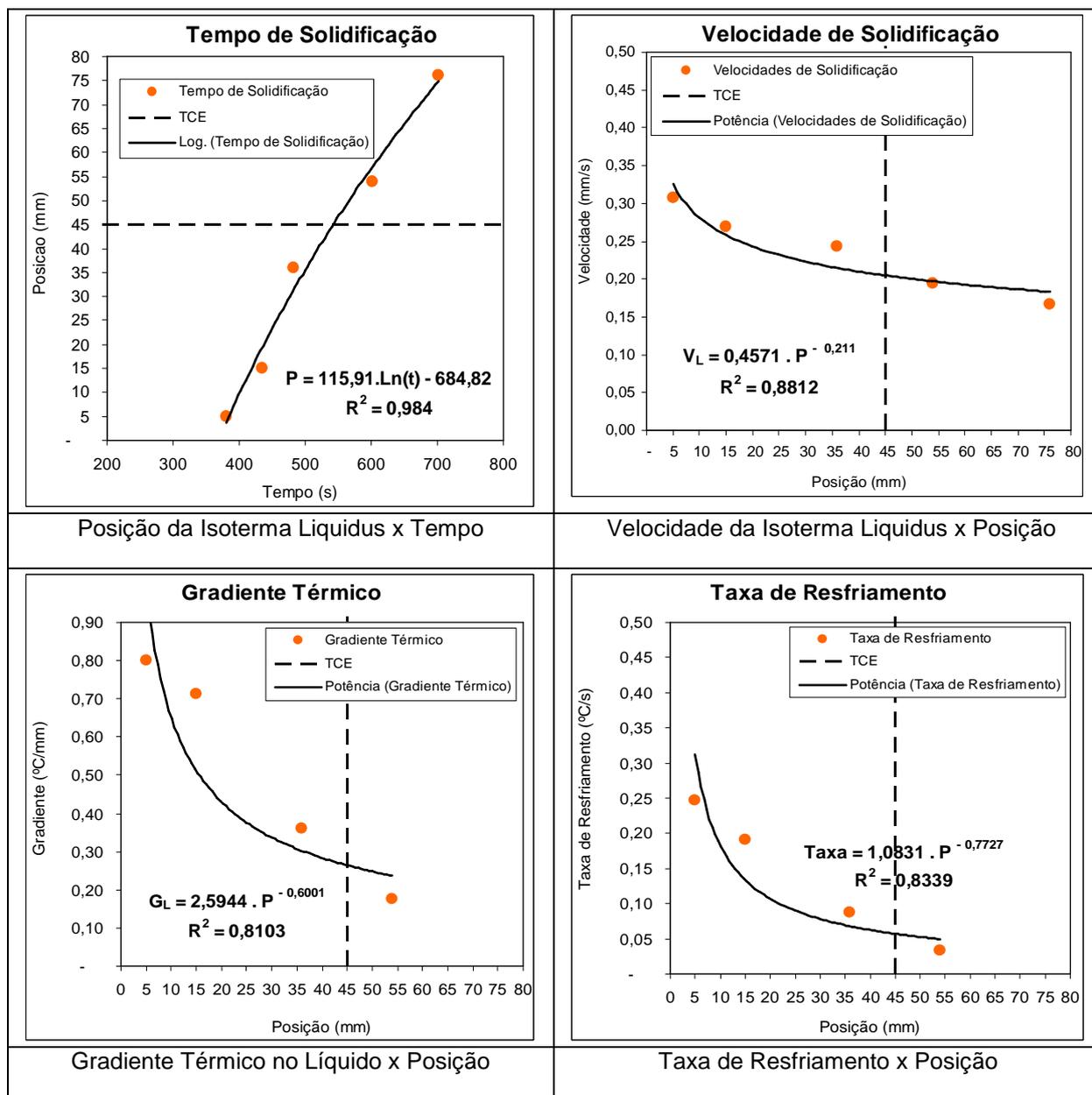


Figura 4. Parâmetros térmicos de solidificação - Condição 1.

Para a análise da macroestrutura de solidificação do lingote para esta condição 1, com dimensões de 160 mm de comprimento e um diâmetro de 50 mm, o mesmo foi cortado na seção longitudinal (Figura 5), sendo uma das metades usada para a análise macroestrutural e a outra, após ser cortada em seções transversais, foi preparada para a análise de microestrutura. A amostra longitudinal (Figura 5), depois de lixada e atacada quimicamente com Água Régia Fluorada, mostrou uma região aproximada de 50% de grãos colunares grosseiros e bem visíveis, e uma outra metade de grãos equiaxiais com uma TCE bem definida e próxima a posição do termopar nº5 (TP5). Conforme Tabela 1, a TCE teve início a aproximadamente 65 mm da base e prolongou-se até aproximadamente 75 mm, tendo um intervalo de 10 mm.

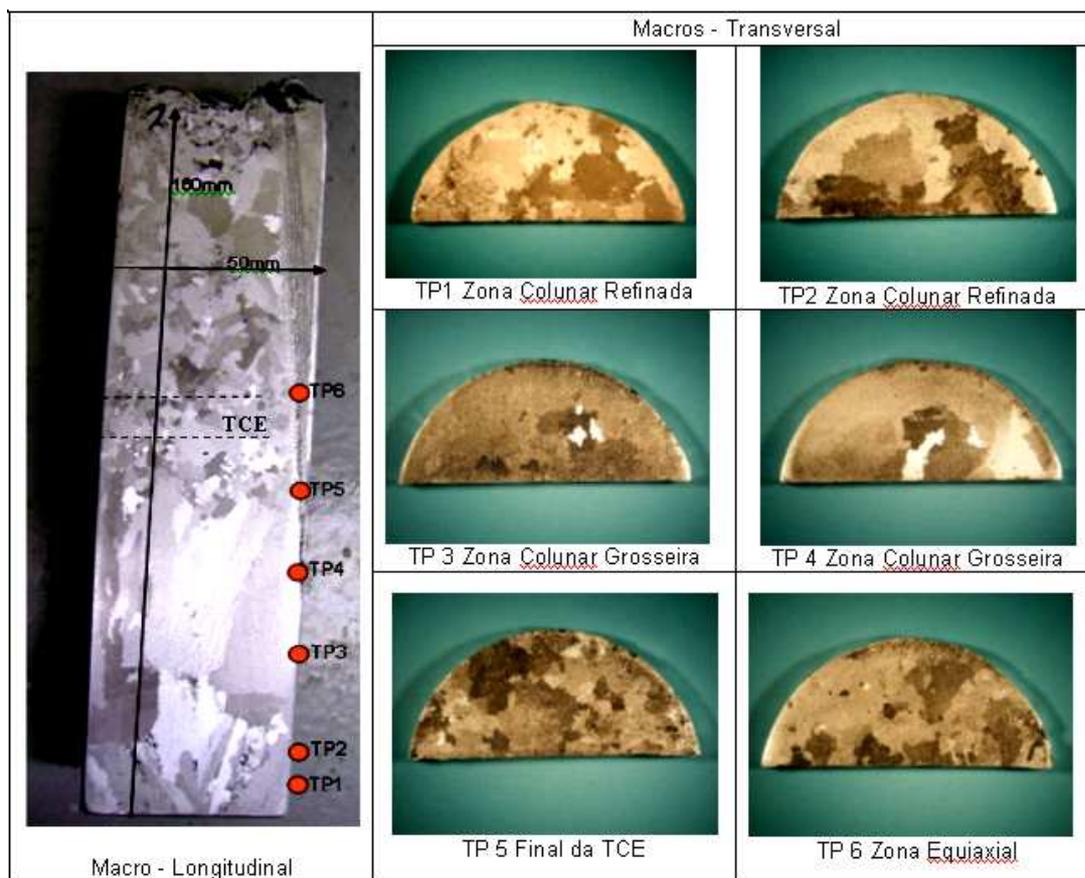


Figura 5. Macroestruturas do lingote – secção longitudinal e transversal - Condição 1.

Analisando as microestruturas nas amostras transversais, observa-se uma matriz dendrítica de Al- $\alpha$  e regiões interdendríticas de Al<sub>2</sub>Cu, vistas em ampliações de 50x e 200x nas seis posições correspondentes ao posicionamento dos termopares no lingote solidificado. Foi possível identificar que o tamanho das dendritas grosseiras se deu devido a uma taxa de resfriamento relativamente baixa em relação às outras condições analisadas neste trabalho. Em todas as posições observa-se uma pequena quantidade de microporosidades (Figura 7), aumentando à medida que se afasta da base do lingote, principalmente nas posições 4, 5 e 6.

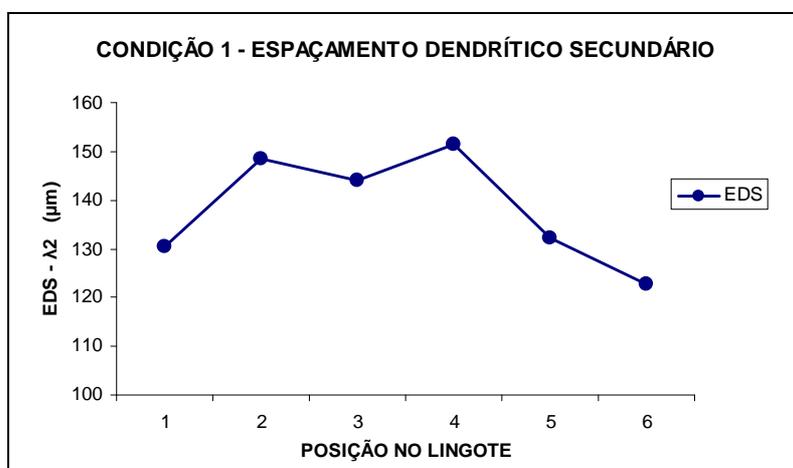


Figura 6. Variação dos espaçamentos dendríticos secundários em função da posição a partir da base do lingote – Condição 1.

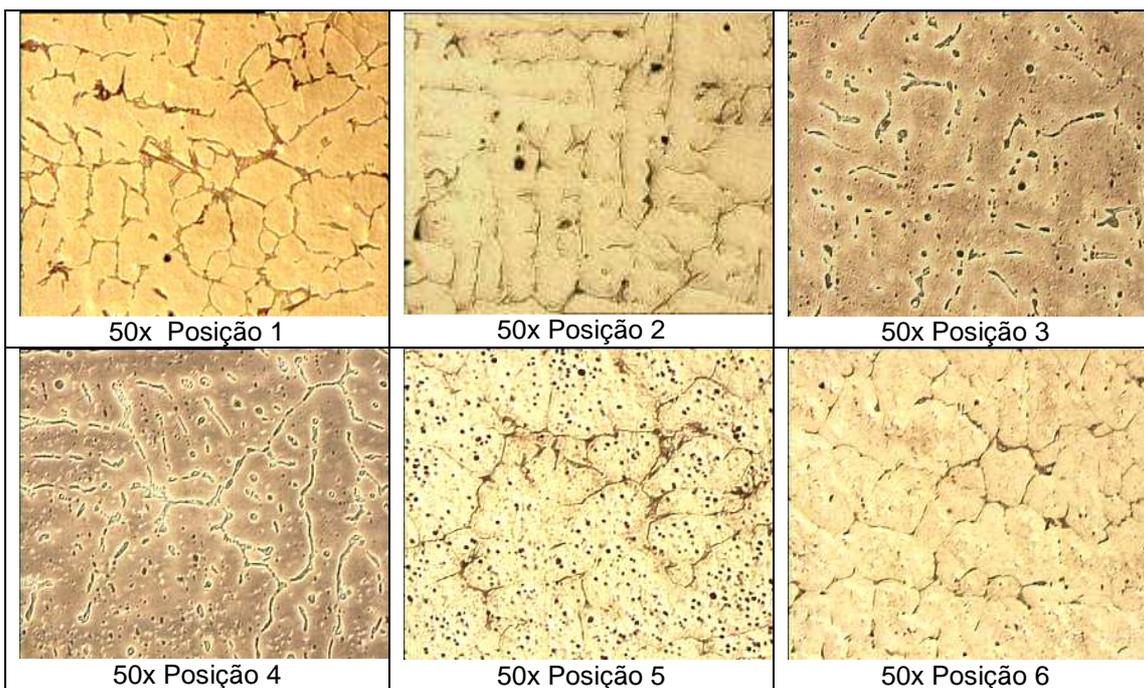


Figura 7. Microestruturas das seções transversais. Ataque: HF 5%. Condição 1.

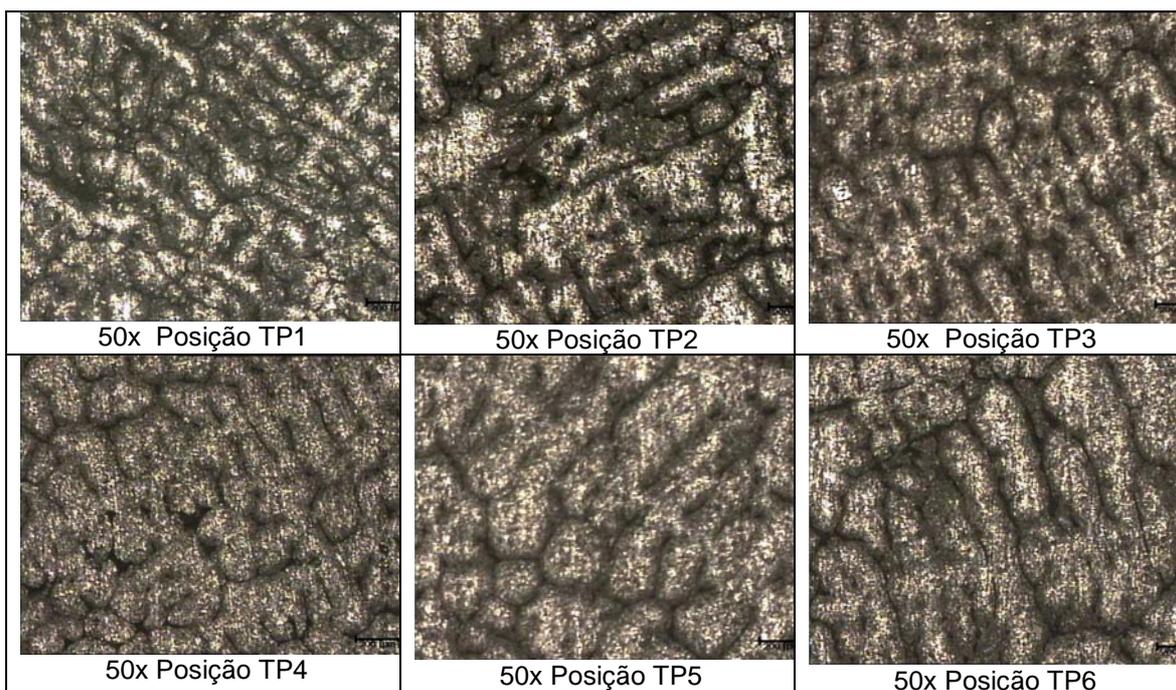


Figura 8. Estruturas dendríticas das seções transversais -Condição 1.

Nas análises dos espaçamentos dendríticos secundários na seção longitudinal (Figura 6), foram realizadas de 20 a 24 medições por posição da amostra. Exemplos de imagens das diferentes regiões podem ser vistas na Figura 8. Nota-se que para as posições 1 e 2 existem vários grãos nucleados, com direções de crescimento aleatórias. Já para as posições 3 e 4, os grãos alinhados crescem preferencialmente na forma colunar. As posições 5 e 6 voltam a apresentar grãos com direções aleatórias.

A variação dos espaçamentos dendríticos secundários ( $\lambda_2$ ) em função das posições também é mostrada no gráfico da Figura 6. Observa-se que as posições 1,



2, 3 e 4 encontram-se na região de grãos colunares, com um pequeno aumento destes espaçamentos. A posição 5 encontra-se no final da TCE e resultou em um espaçamento menor, enquanto que a posição 6 que encontra-se na região de grãos equiaxiais, este espaçamento retorna um pouco abaixo do patamar inicial das posições 1 e 2.

Os resultados dos ensaios de dureza Brinell foram realizados com um penetrador com esfera de aço com 5mm de diâmetro com uma carga de 250 kgf/cm<sup>2</sup>, segundo norma ASTM E-10. Os resultados revelam a dureza média das amostras transversais do lingote solidificado para a condição 1, relacionando a posição do termopar que monitorou a solidificação dentro do forno de fusão unidirecional e a condição do tratamento térmico.

Observa-se que a dureza elevada da posição 1 tem relação com o alto percentual de cobre nesta região, bem como uma maior quantidade de grãos devido a nucleação nos instantes iniciais da solidificação. Acredita-se também que a baixa dureza encontrada na posição 2 deve-se a maior quantidade de porosidade, conforme Figura 7.

Com os resultados obtidos logo após o tratamento térmico de solubilização realizado com temperatura média de 540°C por um tempo de 8 horas no forno, pode-se observar que a dureza na posição 1 diminuiu após a solubilização, em virtude da maior concentração de cobre nessa região, ultrapassando o limite de solubilidade máxima do cobre no alumínio. Todas as demais posições apresentaram aumento de dureza em relação à condição bruta de solidificação.

Após o envelhecimento natural, estando as amostras sob temperatura média de 25°C, nota-se que após 23 dias de envelhecimento natural, a região do TCE começou a apresentar um aumento na dureza em relação aos ensaios anteriores, ficando com uma dureza um pouco maior que a observada na região de grãos equiaxiais. Em 90 dias de envelhecimento natural, pode-se notar que houve um aumento na dureza da região de grãos colunares mais significativa do que observada na região de grãos equiaxiais quando comparadas ao observado no EBF.

A Tabela 2 mostra uma relação entre a variação de dureza com a variação de tempo sofrida pelas amostras da liga na condição 1.

**Tabela 2.** Variação da dureza em função do tempo para cada posição – Condição 1

Condição 1 - Variação Dureza x Tempo						
Posição	EBF	Solub.	9 dias	16 dias	23 dias	90 dias
1	71	67	75	76	76	79
2	64	75	87	91	63	87
3	51	63	67	66	71	78
4	53	62	66	72	74	68
5	47	66	59	62	73	67
6	53	66	68	72	71	64

### 3.2 Condição 2

As curvas de resfriamento da condição 2, solidificada unidirecionalmente com vazão de ar de 20 l/min, apresentam uma temperatura média no líquido de 720°C, sendo que os termopares mais distantes da base apresentaram temperaturas pouco acima.



**Tabela 3.** Resumo dos principais parâmetros térmicos de solidificação – Condição 2

Tempo (s)	Posição (mm)	V <sub>S</sub> (mm/s)	DT (°C)	G <sub>TL</sub> (°C/mm)	Tr (°C/s)	Início TCE	Final TCE
268	5	0,314	14,46	1,446	0,454	55mm	65mm
378	15	0,222	13,85	0,660	0,147		
460	36	0,183	4,44	0,247	0,045		
547	54	0,154	3,10	0,141	0,022		
608	76	0,138	-	-	-		

Comparando os parâmetros da Tabela 3 com os dados da condição 1, observa-se que na condição 2 os valores das velocidades e taxas de resfriamento foram maiores, resultando em uma estrutura mais refinada. Mesmo com a utilização de uma vazão de ar de 20 l/min, o dobro em relação à condição anterior, a extração de calor maior ocorreu para os instantes iniciais da solidificação, diminuindo e igualando-se a condição à medida que a solidificação avança e a resistência térmica a passagem de calor aumenta.

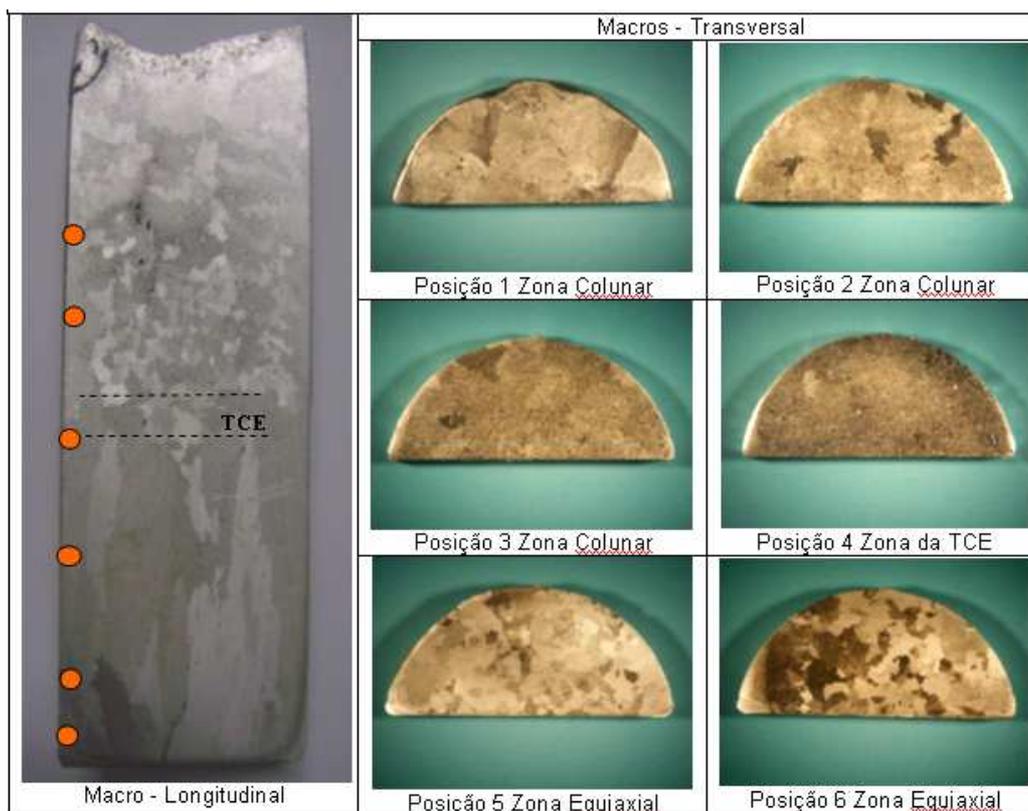
A macroestrutura bruta de solidificação do lingote utilizado nesta condição 2 com o comprimento de 130mm e diâmetro de 50mm, é mostrado na Figura 9 com fotos das macrografias longitudinais e transversais, destacando o posicionamento seqüencial dos termopares.

A revelação mostrou uma região aproximada de 40% de grãos colunares grosseiros e bem visíveis e 60% de grãos equiaxiais com uma zona de TCE bem definida pouco acima da posição de instalação do termopar nº4 (TP4). As macroestruturas transversais mostraram grãos grosseiros e, conforme observa-se na Figura 9, a TCE teve seu início aproximadamente a 55mm a partir da base do lingote e terminou em 65mm.

A análise da microestrutura bruta de solidificação mostrou grande formação dendrítica, originando grãos ainda grosseiros e uma quantidade de soluto no interior e nos contornos dos grãos.

Observando a formação dendrítica desta condição 2, nota-se uma maior direcionalidade das ramificações dendríticas primárias quando comparada com a condição 01, principalmente para as posições de 1 a 3 localizadas na região colunar.

Os espaçamentos dendríticos secundários ( $\lambda_2$ ) também se apresentaram menores a partir da base na região colunar do lingote quando comparados com a condição 1.



**Figura 9.** Macroestruturas do lingote – secção longitudinal e transversal - Condição 2.

Seguindo a mesma rotina laboratorial dos ensaios da condição 1, a Tabela 4 mostra uma relação entre a variação de dureza com a variação de tempo sofrida pelas amostras da liga usada na condição 2.

É possível identificar neste gráfico uma tendência de aumento de dureza na região dos grãos colunares e uma tendência de diminuição desta dureza na região de grãos equiaxiais. A diminuição da dureza nesta região de grãos equiaxiais pode ter ocorrido em decorrência da formação de uma maior quantidade de porosidade no lingote, o que pode ser observado a olho nu.

**Tabela 4.** Variação da dureza em função do tempo para cada posição – Condição 2

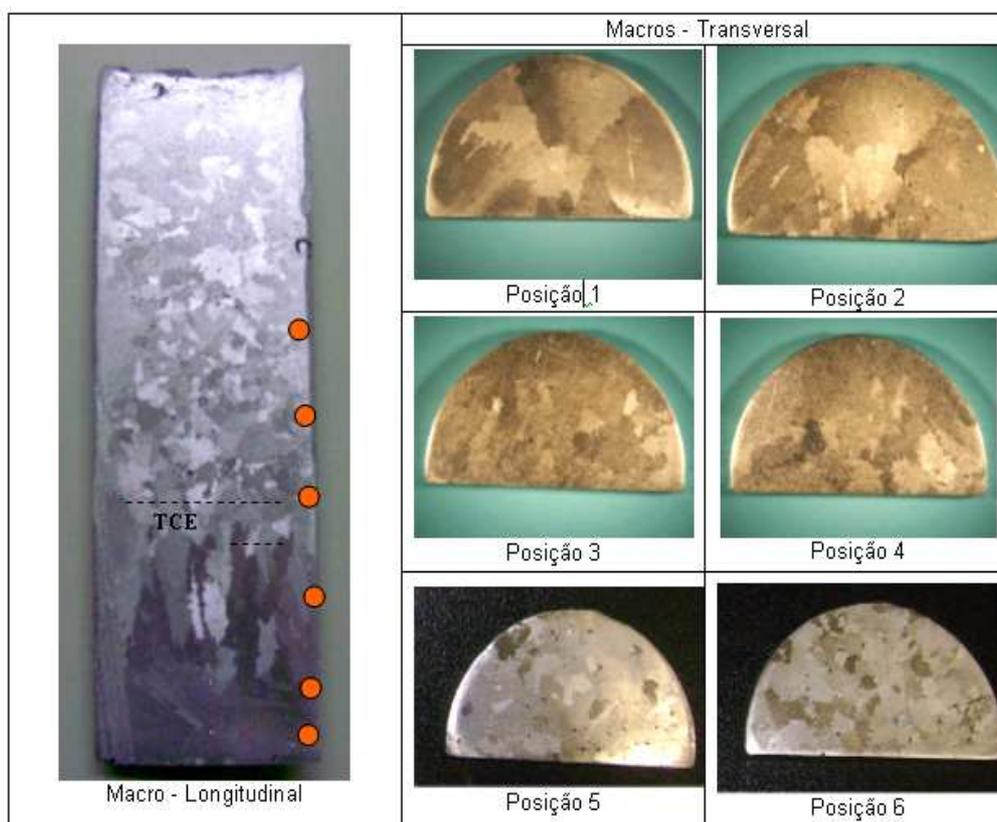
Condição 2 - Variação Dureza x Tempo					
Posição	EBF	Solub.	19 dias	33 dias	47 dias
1	57	63	75	78	82
2	58	61	74	74	79
3	59	61	71	72	79
4	57	63	69	72	79
5	54	63	69	71	75
6	52	64	67	67	68

Nesta condição, o comportamento de dureza se manteve mais estável, com valores sempre crescentes para cada etapa dos tratamentos térmicos e decrescentes à medida que se caminha a partir da base em direção ao topo do lingote. Para estruturas mais refinadas, o ganho de dureza durante o envelhecimento natural foi mais significativo (posições 1 a 4), aumentando aproximadamente 25 HB, enquanto que as posições mais afastadas aumentaram apenas no início do envelhecimento.

### 3.3 Condição 3

Para essa condição foi utilizada uma vazão de ar comprimido de 30 l/min para resfriamento da base do molde, e objetivou-se uma temperatura média do metal líquido de 720°C. Pode-se constatar, de acordo com a Figura 10, que houve uma maior extração de calor, refletindo em curvas de resfriamento mais inclinadas em relação às duas primeiras condições.

Para a análise da macroestrutura bruta de solidificação do lingote da condição 3, com comprimento de 150 mm e diâmetro de 50 mm, seguiram-se as mesmas rotinas laboratoriais das condições anteriores. A revelação nos mostrou uma região aproximada de 30% de grãos colunares grosseiros e bem visíveis e 70% de grãos equiaxiais com uma zona de TCE (transição colunar/equiaxial) bem definida pouco abaixo da posição de instalação do termopar nº4 (TP4), como mostrado na Figura 10. A transição teve início a aproximadamente 45 mm da base do lingote e teve seu término a 53 mm.



**Figura 10.** Macroestruturas do lingote – seção longitudinal e transversal - Condição 3.

As macrografias transversais mostraram grãos grosseiros, porém menores que as duas condições anteriores, principalmente nas posições de 1 a 3. Na análise da microestrutura é possível observar que a direcionalidade das ramificações dendríticas se mantém somente até a posição 3 (zona colunar), tornando-se aleatória para as demais posições na zona equiaxial.

A Tabela 5 mostra uma relação entre a variação de dureza com a variação de tempo sofrida pelas amostras e na Figura 3.18 tem-se um gráfico dos resultados desta tabela.



Tabela 5. Variação Dureza x Tempo – Condição 3

Condição 3 - Variação Dureza x Tempo					
Posição	EBF	Sol	18 dias	32 dias	46 dias
1	67	75	82	91	93
2	61	72	80	86	79
3	60	69	79	81	79
4	54	63	78	79	71
5	52	59	70	66	67
6	48	58	61	60	62

A posição 1 foi a que apresentou o maior acréscimo de dureza (aproximadamente 50%) ao fim do período, seguido pelas posições 2 e 3. A posição 6 apresentou um pequeno aumento na solubilização e uma constância durante o envelhecimento.

### 3.4 Comparativos das Condições

As Figuras 11 e 12 mostram uma síntese dos comparativos dos resultados obtidos.

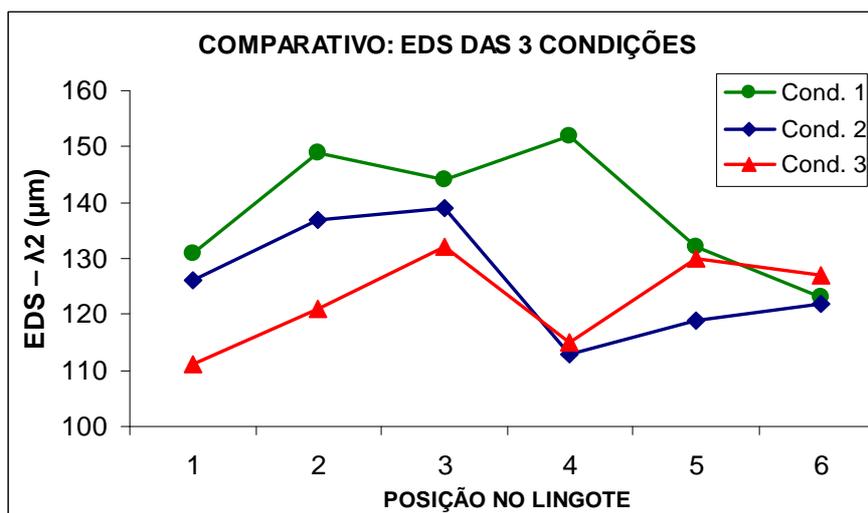


Figura 11. Comparativo das 3 condições.

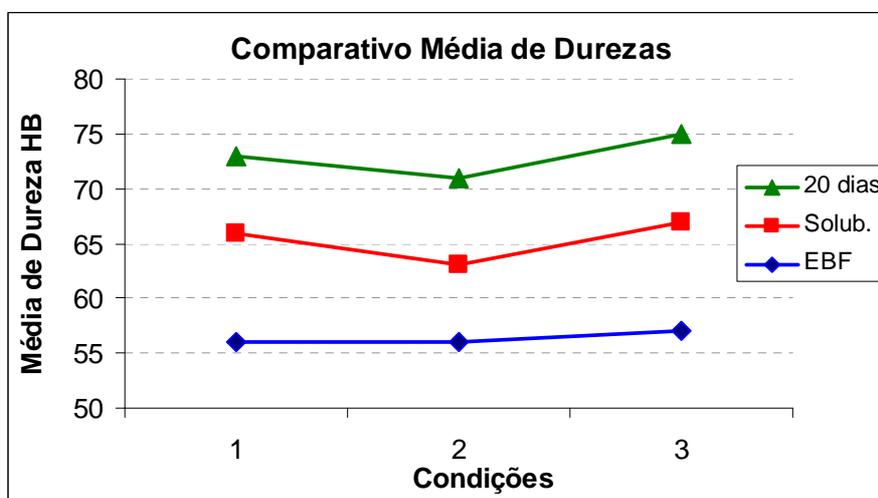


Figura 12. Comparativo das durezas nas 3 condições.



## 4 CONCLUSÃO

Observou-se que a condição 3 apresentou os melhores resultados em relação a dureza final em todas as regiões. A condição 2 apresentou-se mais estável nas regiões colunar e equiaxial enquanto que a condição 1 apresentou-se melhor apenas na região de grãos equiaxiais, sendo um pouco mais estável no período pós-solubilização. A condição 3, com maiores taxas de resfriamento, mostrou-se mais adequada para a obtenção de uma estrutura mais refinada e melhores durezas com o tratamento térmico de solubilização e posterior envelhecimento natural. As Figuras 3.9 e 3.10 mostram gráficos comparativos dos resultados médios das 3 condições avaliadas neste trabalho.

## Agradecimentos

Agradeço aos colegas do NUCLEMAT – PUCRS pelo apoio dado nas tarefas práticas realizadas para este trabalho.

## REFERÊNCIAS

- 1 BOEIRA, A. P. ; FERREIRA, I. L. ; GARCIA, A. . Modeling of Macrosegregation and Microporosity Formation During Transient Directional Solidification of Aluminium Alloys. **Materials Science & Engineering. A, Structural Materials: properties, microstructure and processing**, v. 435-36, p. 150-157, 2006.
- 2 GARCIA, A. Influência das variáveis térmicas de solidificação na formação da macroestrutura e da microestrutura e correlação com propriedades decorrentes. **Projeções**, v. 23, p. 13-32, dez. 2005.
- 3 QUARESMA, J.; SANTOS C.A.; GARCIA A. Correlation between Unsteady-State Solidification Conditions, Dendrite Spacings, and Mechanical Properties of Al-Cu Alloys. **Metallurgical and Materials Transactions A**, vol. 31A, 2000.
- 4 REIS, Bernardo Póras. **Influência da estrutura de solidificação nas condições de solubilização da liga Al-4,0%Cu**. Porto Alegre, 2009. 119 p. Dissertação (Mestrado em Eng<sup>a</sup> de Materiais). Programa de Pós Graduação em Eng<sup>a</sup> e Tecnologia de Materiais, PUCRS.
- 5 SILVA, J. N. S.; MOUTINHO, D. J. C.; MOREIRA, A. L. S.; ROCHA, O. F. L. Construção e aferição de um dispositivo de solidificação unidirecional horizontal refrigerado à água, in: **17º CBECIMat**, Foz do Iguaçu, PR, 2006.