

OTIMIZAÇÃO DOS TEMPOS DE SOLUBILIZAÇÃO EM FUNÇÃO DOS ESPAÇAMENTOS DENTRÍTICOS PARA AUMENTO DE DUREZA EM LIGAS AL-4%CU FUNDIDAS¹

Bernardo Reis²

Carlos Alexandre dos Santos³

Resumo

O objetivo do presente trabalho consiste na determinação dos melhores tempos de solubilização em função dos espaçamentos dentríticos da liga Al-4%Cu para a obtenção de melhores durezas. A liga Al-4%Cu foi fundida a 720°C em lingoteira de aço inoxidável AISI 304, resfriada na base com ar comprimido e instrumentada com termopares tipo K posicionados no molde e ao longo da altura do lingote. Amostras foram analisadas quanto à macro e microestrutura, e correlacionadas com as condições de solidificação, determinadas a partir dos perfis térmicos experimentais. As amostras foram posteriormente submetidas a tratamentos térmicos de solubilização em temperatura de 540°C em diferentes tempos, seguidos por resfriamento em água, e envelhecidas naturalmente. Após os tratamentos térmicos, as amostras foram caracterizadas por análises metalográficas e medições de dureza. Os resultados permitiram determinar os melhores tempos de tratamento térmico. Observou-se que o espaçamento dentrítico e a morfologia estrutural influenciam no tempo de solubilização, bem como no aumento de dureza durante envelhecimento natural.

Palavras-chave: Liga Al-4,0%Cu fundida; Solubilização; Envelhecimento natural.

OPTIMIZATION OF SOLUBILIZATION TIMES RELATED TO DIFFERENT DENTRITIC SPACINGS FOR INCREASED HARDNESS IN CAST AL-4.0WT%CU ALLOY

Abstract

This work is focused on the study of the influence of the as-cast structure with the conditions of the heat treatment of solubilization and natural ageing of the Al-4,0wt%Cu alloy. The Al-4%Cu 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 points in the mold and along the height of the ingot. 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 solubilization 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 solubilization 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 solubilization conditions.

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

¹ Contribuição técnica ao 12º Seminário de Metais Não-ferrosos, 31 de outubro a 1 de novembro de 2011, São Paulo, SP.

² MSc. Eng., Coord. Projetos, Centro de Excelência em Tecnologias Avançadas SENAI – CETA – RS.

³ Dr. Eng., Prof., Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Faculdade de Engenharia.

1 INTRODUÇÃO

Os processos de manufatura de peças e componentes metálicos, com exceção dos artigos produzidos por técnicas de metalurgia do pó, passam pelo processo de solidificação. A solidificação de um metal é um fenômeno de transformação de fases e a estrutura que se forma imediatamente após a solidificação determina as propriedades do produto final.⁽¹⁾ Os defeitos de estrutura bruta de solidificação não são totalmente eliminados durante a conformação dos lingotes, sendo mantidos no produto final. O controle da solidificação vai determinar o tamanho de grão, o espaçamento dendrítico, espaçamento lamelar, composição química, distribuição dos precipitados, distribuição das inclusões e distribuição das porosidades.⁽²⁾ O estudo dos processos de solidificação dos metais na formação de ligas, e em especial das ligas de alumínio, é de grande importância por sua aplicação em diversos campos da engenharia, tais como aeronáutica e automobilística.⁽³⁾ O objetivo principal deste trabalho foi analisar os melhores tempos de solidificação nas condições de tratamentos térmicos de solubilização e posterior envelhecimento natural da liga Al-4%Cu. Ao contrário das ligas conformadas, há carência de trabalhos para esta liga fundida, o que motivou a realização deste trabalho.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A liga de alumínio utilizada nas análises experimentais é similar à liga AA 201.2, de acordo com a classificação da ABNT NBR ISO 209:2010,⁽⁴⁾ com 95,60% de alumínio, 4,04% de cobre, 0,01% de magnésio, 0,02% de manganês, 0,05% de silício, 0,27% de ferro e 0,005% de Ti. O processo de solidificação unidirecional⁽⁵⁾ foi realizado em lingoteira de aço inoxidável AISI 304 composta de três partes básicas: molde, chapa-molde e sistema de resfriamento (Figura 1a). A liga em estudo foi fundida em forno resistivo específico para solidificação unidirecional ascendente a temperatura de 720°C (Figura 1b). Após solidificado, o lingote foi cortado longitudinalmente para análise da macroestrutura, e na outra metade foram realizados cortes transversais próximos às posições dos termopares, para análise da microestrutura. Para análise da microestrutura foi utilizado um conjunto de seis amostras de cada lingote. As mesmas foram embutidas em resina, lixadas com sequências #220, 320, 400, 600 e 1.200 e polidas com abrasivos de alumina em suspensão com granulometria de 1 µm e 0,25 µm. Após o polimento, as amostras foram atacadas com Água Régia Fluorada por aproximadamente 10 segundos e neutralizadas em água. Para realização das medidas dos espaçamentos dendríticos foi utilizado um microscópio óptico com câmara digital.⁽⁶⁾ Foram realizadas vinte medições por amostra e, posteriormente estabelecida uma média dos espaçamentos dendríticos por posição de cada experimento, e em seguida foram medidas as durezas. Para os ensaios de dureza Brinell, foi utilizado durômetro segundo a norma ASTM E-10.⁽⁷⁾ Depois de medidas as durezas, as amostras foram submetidas a tratamento térmico de solubilização e envelhecimento natural.

Para os tratamentos térmicos de solubilização das amostras, foi utilizado um forno tipo mufla resistivo (Figura 1c). O forno foi pré-aquecido durante 1 hora, para homogeneização da temperatura interna, obtendo-se uma variação entre 530°C e 540°C. O conjunto de cada um dos três experimentos foi colocado no forno com um arranjo preparado para separar e acondicionar as amostras para tratamento térmico de solubilização a 540°C por três diferentes tempos de tratamento térmico, 8 h, 9 h e 10 horas, e logo após a retirada do forno, foi feito o resfriamento em água.⁽⁸⁾

Em seguida, estas amostras foram submetidas a procedimentos de medidas de dureza Brinell e acompanhamento da evolução das durezas durante envelhecimento natural.⁽⁸⁾

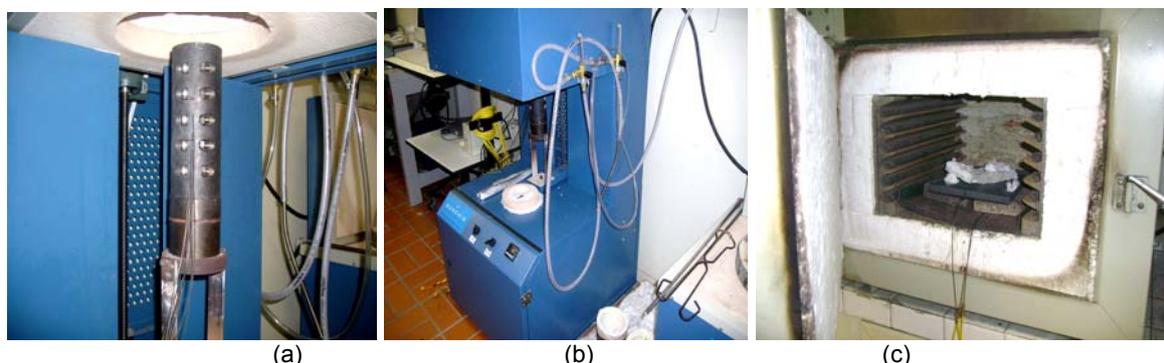


Figura 1. (a) Lingoteira; (b) Forno de fusão/solidificação; e (c) Forno tipo mufla.

O procedimento experimental segue o fluxograma da Figura 2.

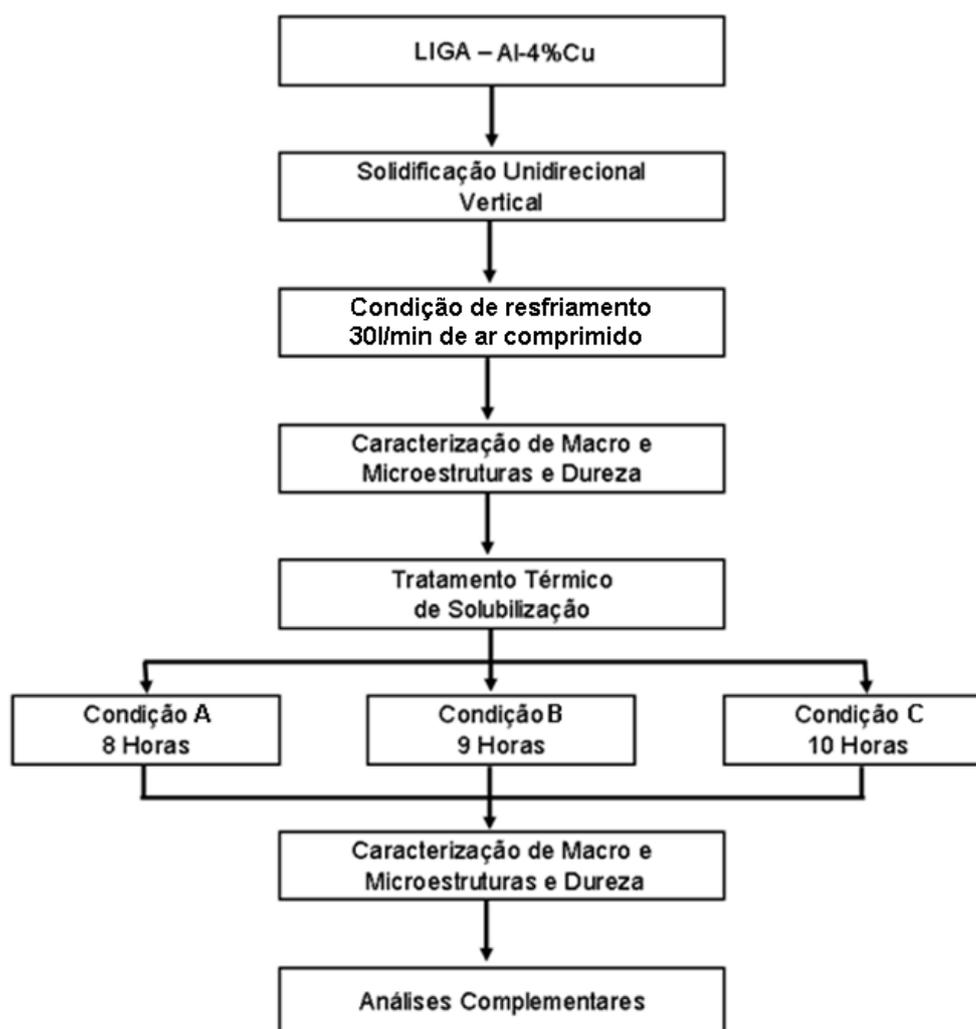


Figura 2. Fluxograma do procedimento experimental.

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, denominada Condição A.

3.1 Condição A

A condição A apresentou uma temperatura média, no líquido, de 715°C, e temperatura da chapa-molde de 698°C. A Figura 3 apresenta as curvas de resfriamento obtidas, e as linhas pontilhadas correspondem às temperaturas *liquidus* (TL – 645°C) e *solidus* (TS– 548°C).

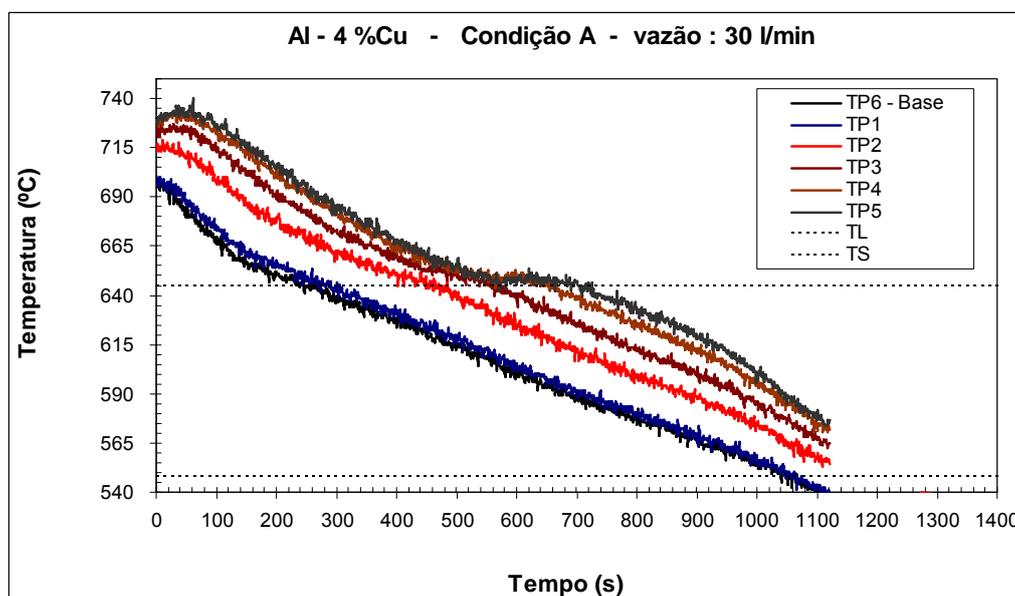


Figura 3. Curvas de resfriamento - Vazão 30 l/min - Condição A.

A macroestrutura mostrou uma região de aproximadamente 55% com grãos colunares grosseiros e 45% de grãos equiaxiais, com uma zona de transição colunar/equiaxial (TCE) bem definida, próxima à posição do termopar nº 5 (Figura 4).



Figura 4. Macroestrutura da condição A.

A transição teve início a aproximadamente 75 mm da base do lingote, e término aos 85 mm. Na análise microestrutural (Figura 5), é possível observar que a direcionalidade das ramificações dendríticas se mantém até a posição 5 (zona colunar), tornando-se aleatória para as demais posições na zona equiaxial.

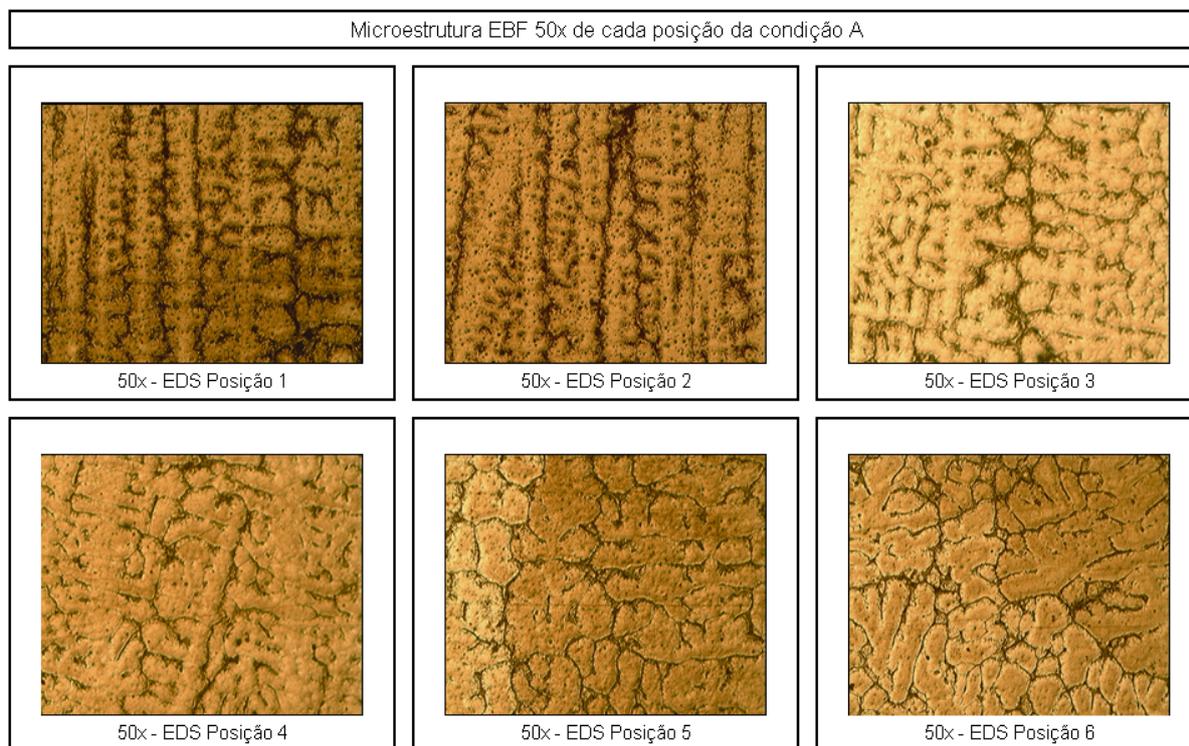


Figura 5. Estruturas dendríticas por posição da condição A, com 50x de aumento.

A Figura 6 mostra os valores médios dos espaçamentos dendríticos secundários (λ_2) por posição.

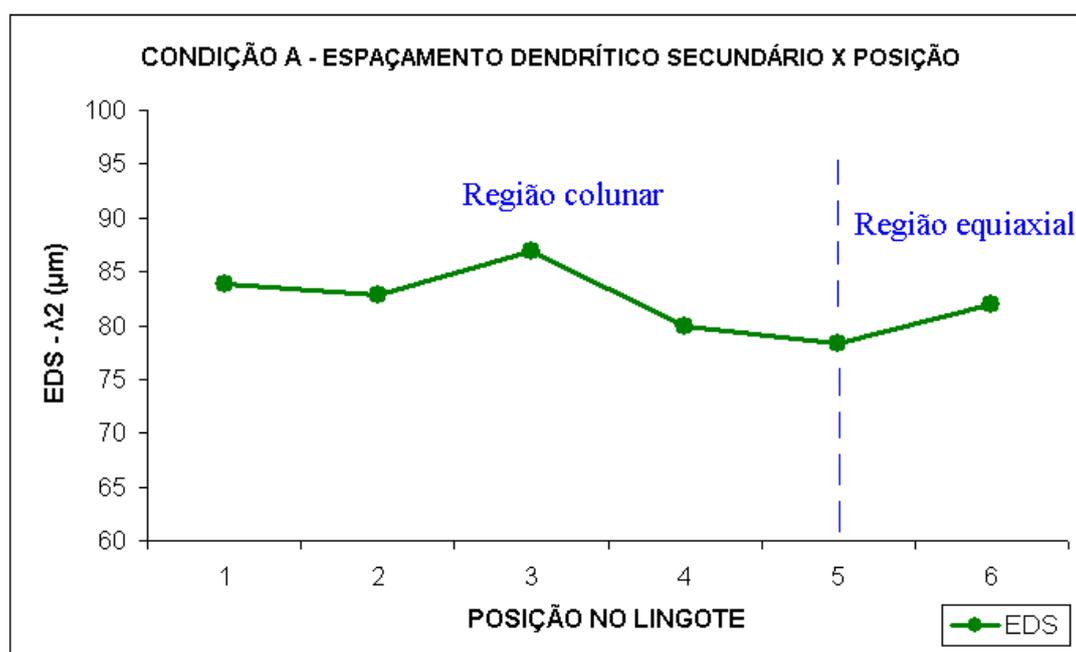


Figura 6. Variação dos espaçamentos dendríticos secundários em função da posição, a partir da base do lingote – Condição A.

A Tabela 1 mostra os resultados dos ensaios de dureza Brinell, nos quais foi usado um penetrador com esfera de aço com 5 mm de diâmetro e carga de 250 kgf, segundo a norma ASTM E-10. Os resultados mostram a dureza média das amostras transversais do lingote solidificado (EBF), relacionando com a posição de cada termopar. A Tabela 1 mostra também os resultados de dureza obtidos a partir da solubilização (Sol.) e posterior envelhecimento natural durante 35 dias.

Tabela 1. Variação de dureza x tempo – Condição A

CONDIÇÃO A - VARIAÇÃO DE DUREZA x TEMPO							
Posição	EBF	Sol	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	35 dias
1	54	72	85	76	85	96	94
2	54	66	83	79	90	91	94
3	51	76	89	78	90	92	99
4	51	72	92	81	84	100	88
5	52	73	88	84	84	96	96
6	47	65	80	76	80	91	89

A posição 3 foi a que apresentou o maior acréscimo de dureza, cerca de 50% de aumento ao fim do período analisado, seguida pelas posições 5, 2 e 1. A posição 6 apresentou um considerável aumento na solubilização e uma constância durante o envelhecimento. Com os dados da Tabela 1, foi construído o gráfico da Figura 7.

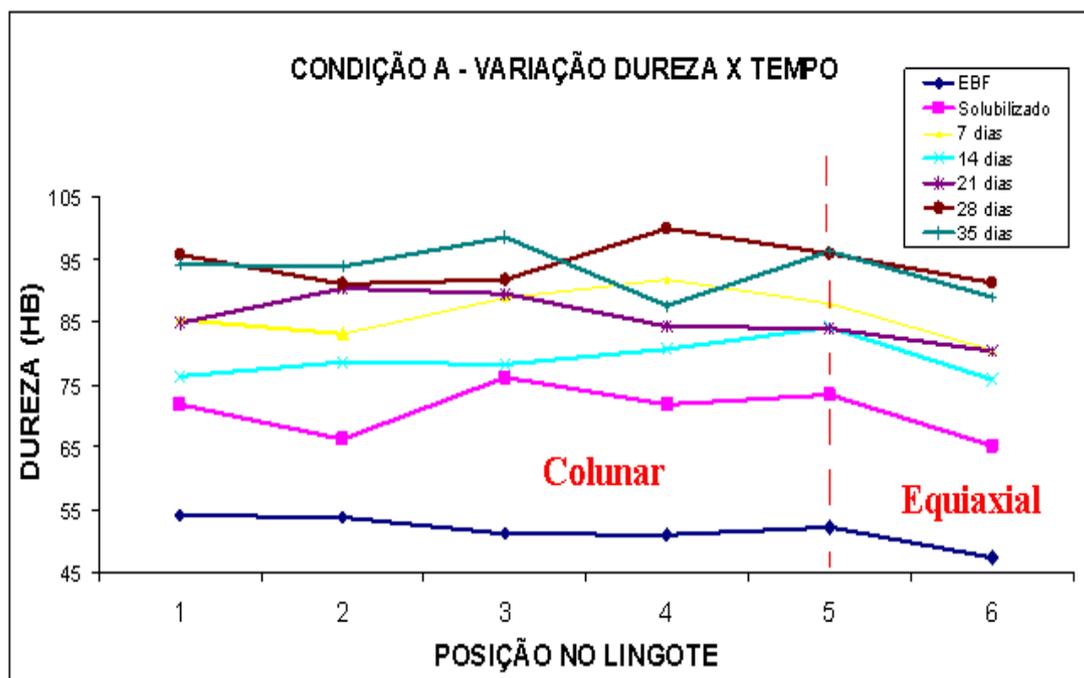


Figura 7. Variação da dureza Brinell em função do tempo e posição – Condição A.

3.2 Condição B

Foi considerada a condição B como a condição 3 dos experimentos realizados no trabalho da dissertação de mestrado de Bernardo Póras Reis ⁽⁴⁾, no qual também foi

utilizada uma vazão de 30 l/min, porém com superaquecimento maior no metal líquido. O tratamento térmico de solubilização teve a duração de 9 horas, seguindo a mesma metodologia adotada para as condições A e C.

3.3 Condição C

A temperatura do metal líquido da condição C situou-se próxima a 714°C, a temperatura da chapa-molde iniciou em 684°C e recebeu fluido de resfriamento diretamente em sua interface (Figura 8), sendo que os termopares mais afastados da base apresentaram uma temperatura mais elevada que a da condição A, mas um pouco abaixo que a da condição B.

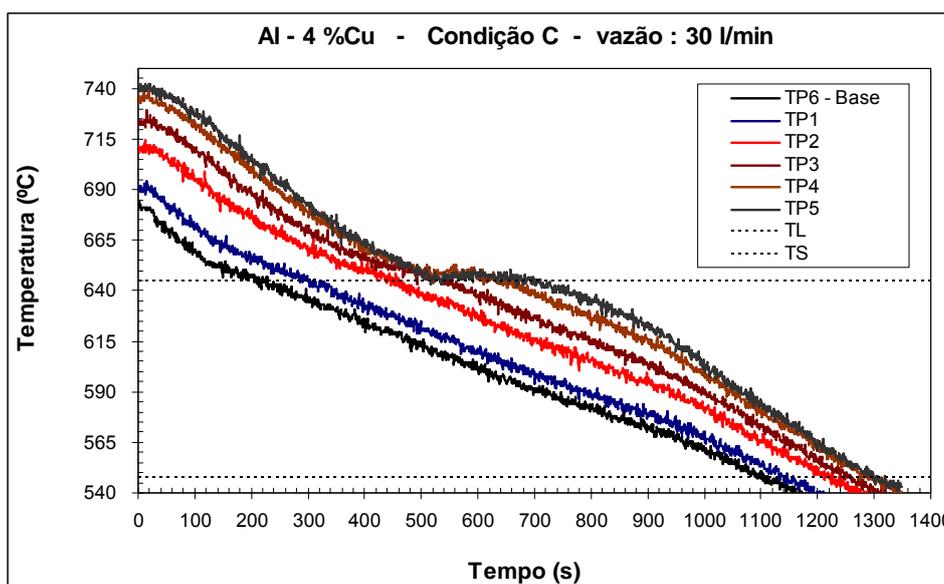


Figura 8. Curvas de resfriamento - Vazão 30 l/min - Condição C

A macroestrutura mostrou uma região de aproximadamente 48% de grãos colunares grosseiros e 52% de grãos equiaxiais, com uma zona de transição colunar/equiaxial (TCE) bem definida, pouco abaixo da posição do termopar nº 5 (Figura 9). A transição teve início a aproximadamente 65 mm da base do lingote, e término aos 75 mm.



Figura 9. Macroestrutura da condição C.

Na análise microestrutural (Figura 10) é possível observar que a direcionalidade das ramificações dendríticas se mantém somente até a posição 4 (zona colunar), tornando-se aleatória para as demais posições na zona equiaxial.

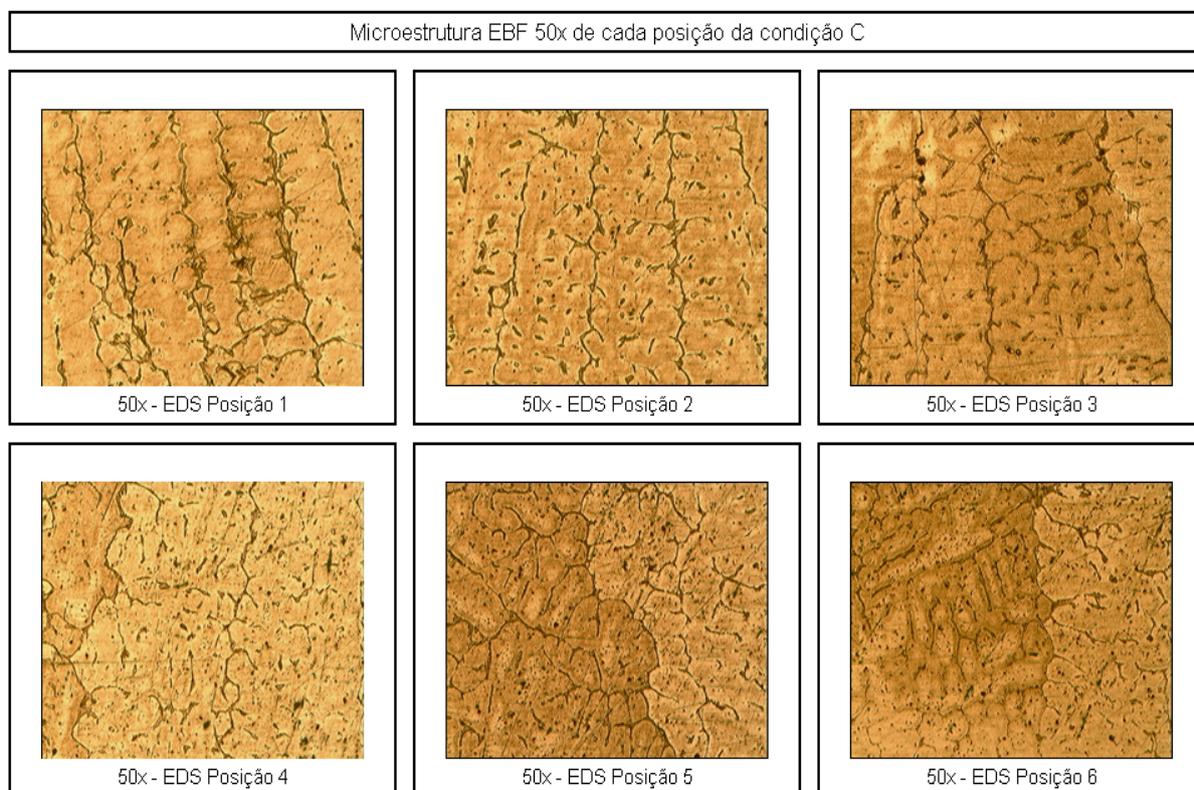


Figura 10. Estruturas dendríticas por posição da condição C com 50x de aumento.

A Figura 11 mostra os valores médios dos espaçamentos dendríticos secundários de cada posição.

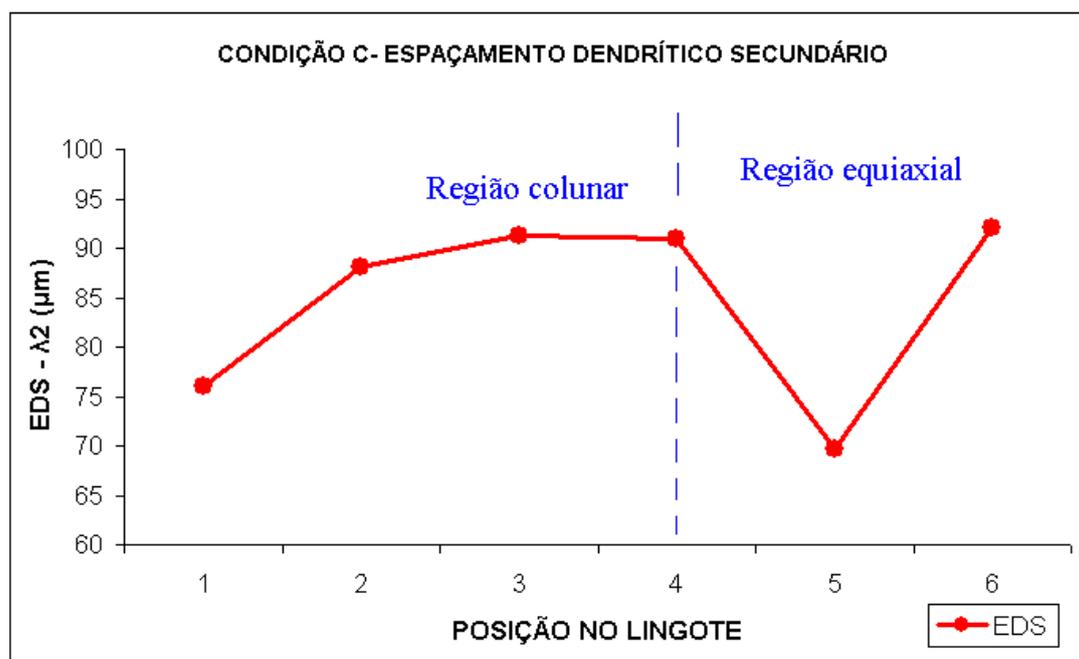


Figura 11 - Variação dos espaçamentos dendríticos secundários em função da posição a partir da base do lingote – Condição C.

A Tabela 2 mostra uma relação entre a variação de dureza com a variação de tempo sofrida pelas amostras. Na Figura 12 tem-se um gráfico dos resultados desta tabela.

Tabela 2. Variação de dureza x tempo – Condição C

CONDIÇÃO C - VARIAÇÃO DE DUREZA x TEMPO							
Posição	EBF	Solubilizado	07 dias	14 dias	21 dias	28 dias	35 dias
1	52	67	87	89	84	94	88
2	53	68	75	83	84	86	91
3	51	67	86	78	87	92	86
4	51	74	78	79	96	93	87
5	48	64	72	73	75	87	83
6	44	59	69	80	80	85	80

A posição 2 foi a que apresentou o maior acréscimo de dureza, seguida pelas posições 1, 3 e 4, região colunar. A posição 6 apresentou um pequeno aumento na solubilização e uma constância durante o envelhecimento.

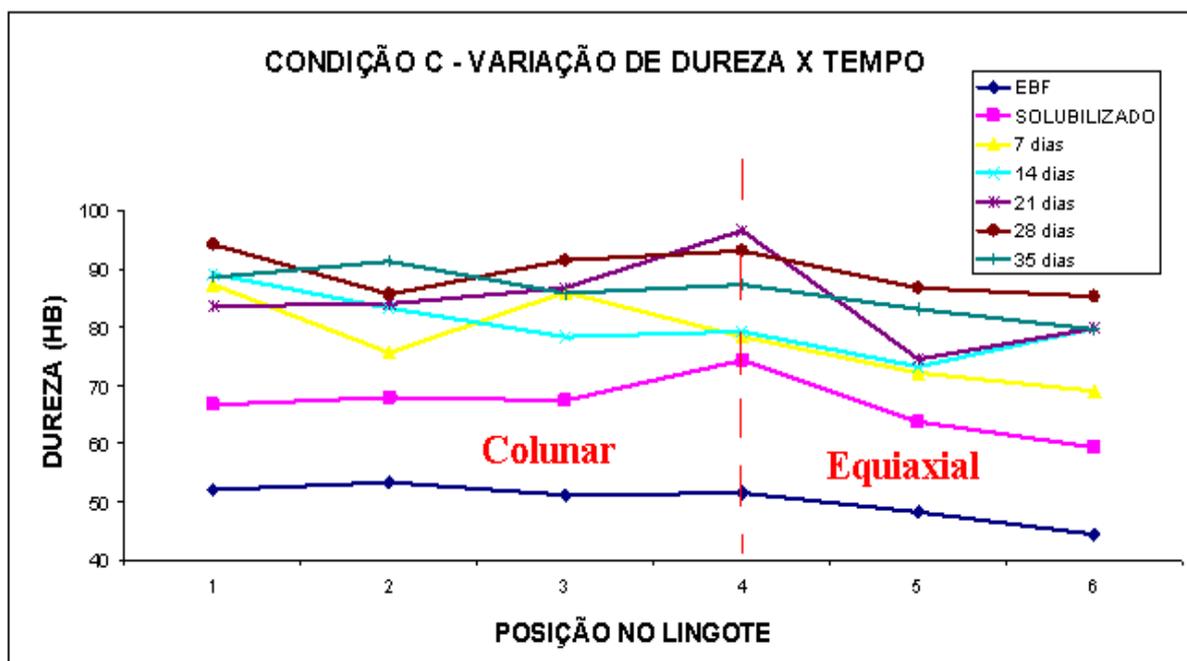


Figura 12. Variação da dureza Brinell em função do tempo e posição – Condição C.

A seguir apresentam-se a Tabela 3 e os gráficos comparativos entre as principais características estruturais (Figura 13) e mecânicas (Figura 14) nos lingotes obtidos e os comportamentos das amostras após tratamentos térmicos.

Tabela 3. Comparação dos espaçamentos dendríticos x posição (condições A, B, C)

Posição x Espaçamento dendrítico secundário (μm)			
Posição	Condição A	Condição B	Condição C
1	84	111	76
2	83	121	88
3	87	132	91
4	80	115	91
5	78	130	70
6	82	127	92
Média	82	123	85
Desvio Padrão	2,89	8,14	8,52

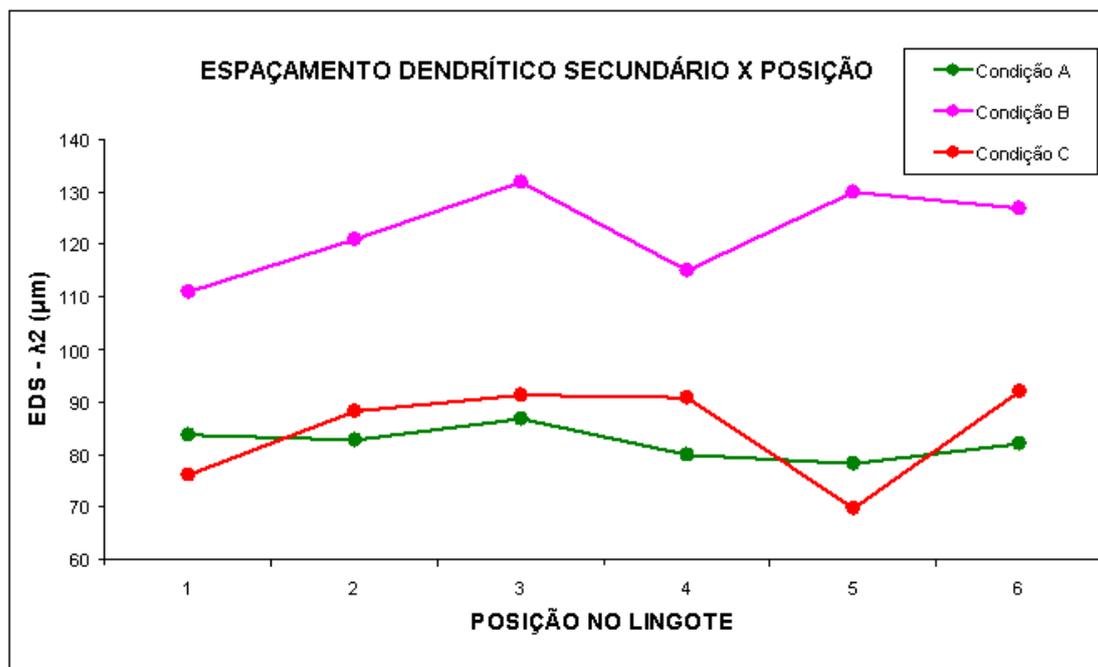


Figura 13. Comportamento dos espaçamentos dendríticos secundários.

No gráfico da Figura 14 observa-se que, na condição bruta de solidificação, a condição B apresentou maior dureza devido à menor presença de porosidade. Pode-se observar que, à medida que os espaçamentos dendríticos secundários diminuem, há uma tendência de aumento da resistência mecânica. Ao comparar os experimentos, a condição A proporcionou maior homogeneidade em todo o lingote.

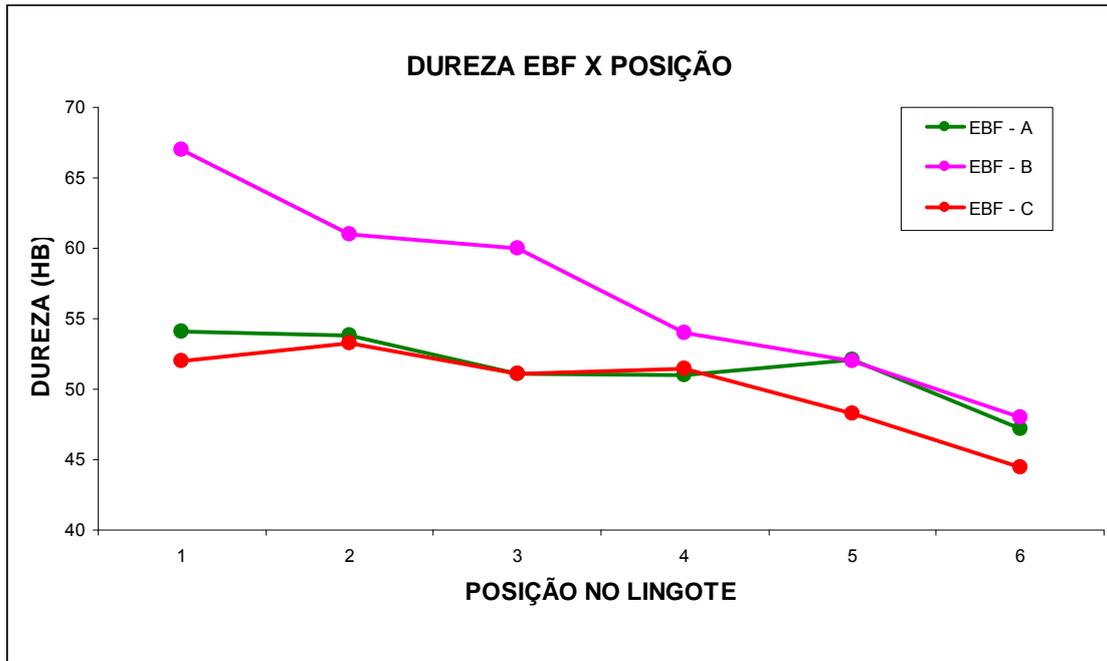


Figura 14. Comparação das medidas de dureza EBF x Posição.

Logo após os tratamentos térmicos de solubilização, foram feitas medidas de dureza, nas quais constata-se que as amostras com a estrutura mais refinada apresentam tendência de maior dureza (Figura 15).

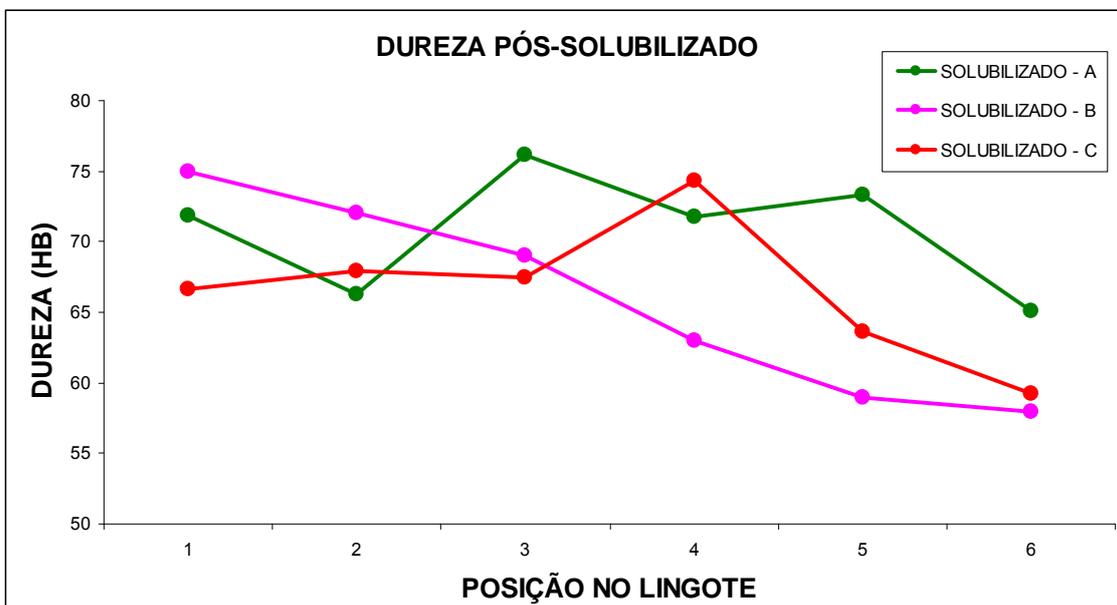


Figura 15. Comparação das medidas de dureza x posição pós-solubilizado.

4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos a partir dos experimentos de solidificação e dos tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento natural permitiram que fossem extraídas as seguintes conclusões:

- objetivou-se uma mesma condição de fusão e solidificação da liga para as três amostras (720°C e 30 l/min), mas mesmo assim observaram-se pequenas diferenças de altura da zona de transição colunar/equiaxial;
- nos tratamentos de solubilização, as estruturas mais refinadas apresentam tendência a atingir maiores durezas;
- o tempo de solubilização no experimento B, no qual as amostras foram submetidas ao tratamento térmico de solubilização por 9 horas, obteve melhores resultados de dureza, pois apresentou pouca porosidade, mas com precipitados grosseiros;
- os precipitados na condição C foram mais refinados, mas não houve um aumento de dureza devido à grande presença de porosidade; e
- quanto mais refinada a estrutura, menor deve ser o tempo de solubilização, ou seja, o tratamento de solubilização fica mais econômico.

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 ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 209:2010** Alumínio e suas ligas – Composição química, ABNT/CB-35 Alumínio: Rio de Janeiro, 2010.
- 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.
- 6 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.
- 7 ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **ASTM E10**, Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials.: 10 de Fevereiro de 2001.
- 8 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^a de Materiais). Programa de Pós Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PUCRS.