

INFLUÊNCIA DO RESFRIAMENTO E DA CENTRIFUGAÇÃO NA FUNDIÇÃO DE LIGA Al-7%Si¹

João Ricardo Ortega Alves²
Taylor Mac Intyer Fonseca Junior³
Marcelo de Aquino Martorano⁴

Resumo

O objetivo deste trabalho compreende o estudo dos efeitos ocasionados pela influência do resfriamento e da centrifugação sobre a estrutura de uma liga comercial Al-7%Si. A liga em estudo foi solidificada de forma estática e dinâmica com uma rotação correspondente a 50 vezes a aceleração da gravidade (50 G), seguida de refrigeração por injeção de água. Após a análise metalográfica das amostras, estática e dinâmica, verificou-se o refinamento microestrutural, a redução da porosidade e dos espaçamentos dos braços dendríticos secundários induzidos pelo efeito da força centrífuga. Para esta velocidade de rotação e refrigeração a água não foi observado o fenômeno da macrossegregação do silício.

Palavras-chaves: Fundição sob centrifugação; Macrossegregação; Liga hipoeutética; Sistema alumínio-silício.

INFLUENCE OF COOLING AND CENTRIFUGATION IN THE Al-7Si ALLOY

Abstract

This paper aimed to study of the effects caused by influence cooling and centrifugation on the structure of a commercial alloy Al-7% Si. The study was solidified alloy statically and dynamically with a speed corresponding to 50 times the acceleration of gravity (50 g), followed by injection of cooling water. After metallographic analysis of the samples, static and dynamic, it was found microstructural refinement, the reduction in porosity and secondary dendrite arm spacing of the effect induced by the centrifugal force. However, for this rotation speed and water cooling was not observed the phenomenon of macrosegregation in the samples studied.

Key words: Centrifugal casting; Macrosegregation; Hipoeutetic alloy; Aluminium-silicon system.

¹ Contribuição técnica ao 67^o Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Graduando, Eng. de Materiais, Centro Universitário da FEI, Brasil; joaoricardo.ortega@gmail.com.

³ Prof. MSc., Depto. de Eng. Metalúrgica e de Materiais, FEI, SP Brasil; taylor@fei.edu.br.

⁴ Prof. Dr., Depto. de Eng. Metalúrgica, Escola Politécnica, USP, Brasil; martoran@usp.br.

1 INTRODUÇÃO

O processo de fundição sob centrifugação é o processo de fabricação de cilindros bimetalicos para laminação mais amplamente utilizado no mundo. No processo de fundição de peças metálicas por centrifugação, a solidificação ocorre sob a ação da força centrífuga em um molde em rotação^[1]. Esta força centrífuga causada pela rotação provoca a alteração significativa da estrutura metalúrgica e na homogeneidade química do produto final^[2]. Entretanto nota-se a existência de estudos pouco esclarecedores sobre os mecanismos de macrossegregação em algumas ligas de grande importância como aquelas do sistema Al-Si.

Chirita, et al.^[3] estudaram o efeito da centrifugação comparada à fundição convencional das ligas Al-7%Si, Al-12%Si e Al-18%Si, relacionando as propriedades mecânicas obtidas com as microestruturas resultantes. Para a realização dos ensaios foi utilizada uma centrífuga vertical sob rotação de 450 rpm. Foram quantificadas as fases presentes e a fração volumétrica de poros e posteriormente foi efetuada a medição da dureza das amostras nas regiões externa, central e interna. Estes autores verificaram a tendência da diminuição da fração volumétrica das dendritas da região externa para a região interna em todos os ensaios realizados. Conseqüentemente, a fração volumétrica de eutético possui um comportamento inverso aumentando da região externa para a região interna. Por fim, a fração de poros foi pequena não apresentando nenhuma evolução durante o processo de solidificação.

Alves, Fonseca Jr. e Martorano^[4] também realizaram estudos decorrentes do efeito da centrifugação em uma liga comercial Al-7%Si. As amostras em forma de tubos foram obtidas utilizando-se uma rotação correspondente a 50 vezes a aceleração da gravidade (50G) e resfriadas através da injeção de ar-comprimido na parede externa do molde. A análise das micrografias demonstrou um maior refinamento das microestruturas obtidas por centrifugação. A taxa de resfriamento contribuiu para reduzir o tamanho das dendritas impedindo seu crescimento, enquanto que a força centrífuga imposta promoveu a quebra das dendritas intensificando o refinamento microestrutural. No entanto, o fenômeno da macrossegregação não foi observado mediante as condições dos ensaios.

Deste modo, este trabalho tem como objetivo o estudo dos efeitos ocasionados pela centrifugação sobre a estrutura de uma liga comercial Al-7%Si utilizando uma rotação correspondente a 50G e refrigeração à água.

2 METODOLOGIA

O material em estudo foi uma liga comercial Al-7%Si cuja composição química encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química da liga comercial Al-7%Si

| Fe | Mg | Zn | Ti | Si | Al |
|-------|------|-------|------|------|---------|
| 0,078 | 0,22 | 0,018 | 0,16 | 6,44 | Balanço |

As amostras obtidas em forma de tubos possuem como dimensões, 80 mm de diâmetro externo e 20 mm de espessura. A Figura 1 apresenta a comparação entre o tubo com resfriamento a água obtido pelo método estático e dinâmico (centrifugado). Foram utilizadas aproximadamente 600 g da liga por amostra. Utilizou-se um forno Carbolite BLF1800 para fundição das cargas a temperatura de

700°C. A centrífuga laboratorial do Centro de Desenvolvimento de Materiais Metálicos da FEI (CDMatM-FEI), Figura 2, está equipada com forno bipartido que garante que a carga não irá se solidificar durante o vazamento.

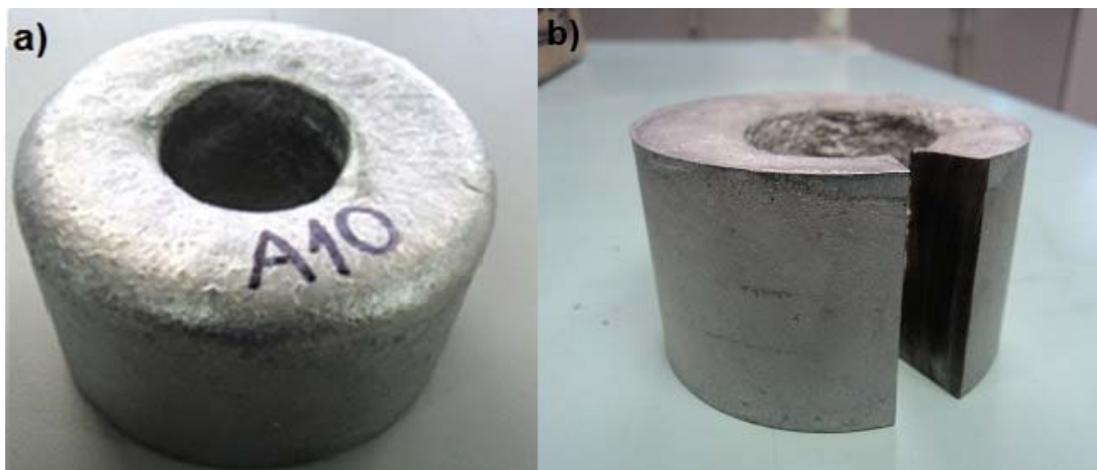


Figura 1. Comparação entre os tubos obtidos; (a) estático e (b) centrifugado.

O sistema camisa-coquilha foi aquecido a temperatura de 700°C, com uma frequência de rotação de 3,3 Hz para garantir a uniformidade do processo de aquecimento. Após vazamento para obtenção da amostra centrifugada, o sistema camisa-coquilha foi ajustado à frequência de rotação de 50G e, a partir da formação de uma película de líquido uniforme, o sistema de refrigeração a água foi acionado. A carga solidificada de forma estática utilizou o mesmo procedimento de refrigeração porém foi introduzido um macho metálico. Os tubos obtidos foram cortados em três amostras diferentes para análise, embutidas em baquelite seguido de lixamento e polimento em politriz automática Abramim Struers, Figura 3. Ensaios de dureza Brinell foram realizados para cada região selecionada, indicadas na Figura 4, utilizando um penetrador com esfera de diâmetro igual a 2,5 mm e uma carga de 31,25 kgf.



Figura 2. Representação da centrífuga laboratorial do Centro de Desenvolvimento de Materiais Metálicos da FEI (CDMatM – FEI).

Para a análise microestrutural, as amostras foram caracterizadas por microscopia óptica e metalografia quantitativa. A partir destas análises foram identificadas as fases eutética e α -pró-eutética bem como quantificada a fração de poros, utilizando o microscópio óptico LEICA modelo DMLM, acoplado ao sistema digital de análise de imagens Q500/W.

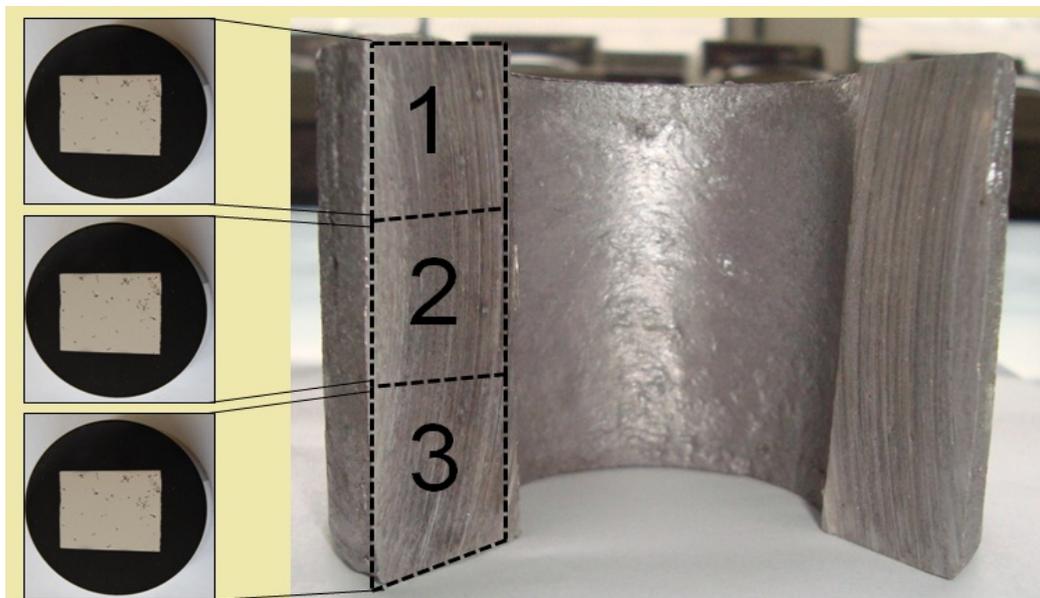


Figura 3. Amostras selecionadas e preparadas metalograficamente. As amostras 1, 2 e 3 correspondem às regiões retiradas da peça para as análises.

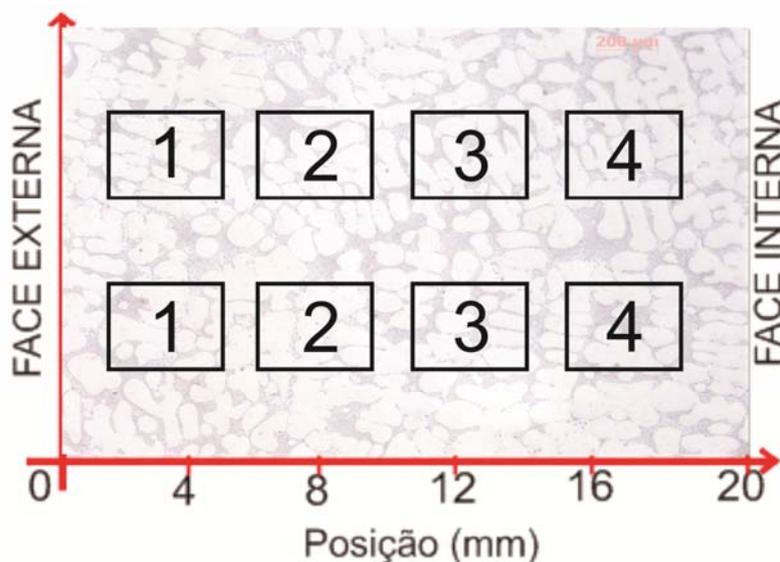


Figura 4. Representação esquemática das regiões em que foram realizados os ensaios de dureza Brinell para a 3 amostras obtidas.

3 RESULTADOS

3.1 Caracterização Microestrutural

Foram observadas as microestruturas da liga Al-7%Si, formadas por dendritas de alumínio (α -pró) envoltas por uma estrutura eutética, para as diferentes condições de solidificação realizadas durante a fundição. As microestruturas obtidas com

resfriamento por injeção de água na parede da coquilha e fundidas estaticamente, são apresentadas pela Figuras 5. Utilizando a fundição sob centrifugação, com resfriamento a água e rotação de 50G foram obtidas as microestruturas observadas na Figura 6.

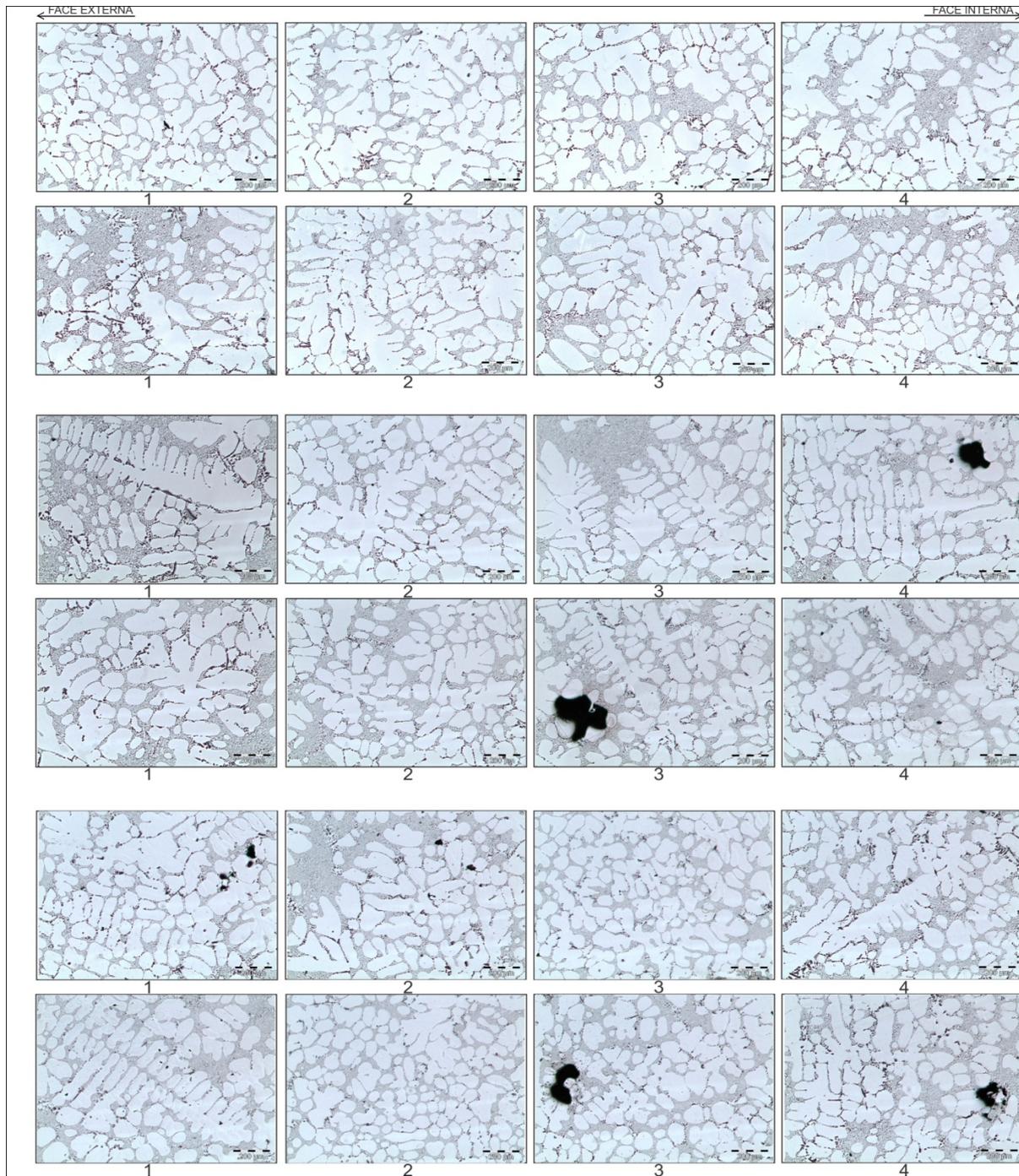


Figura 5. Microestruturas com morfologia dendrítica obtidas por fundição sob centrifugação, resfriamento com água e 50G. A posição 1 corresponde à região externa localizada a aproximadamente a 4 mm conforme representação esquemática das Figuras 3 e 4. A posição 2 e 3 referem-se a região central localizadas entre 8 e 12 mm. Por fim, a posição 4 corresponde a região interna localizada a aproximadamente 16 mm.

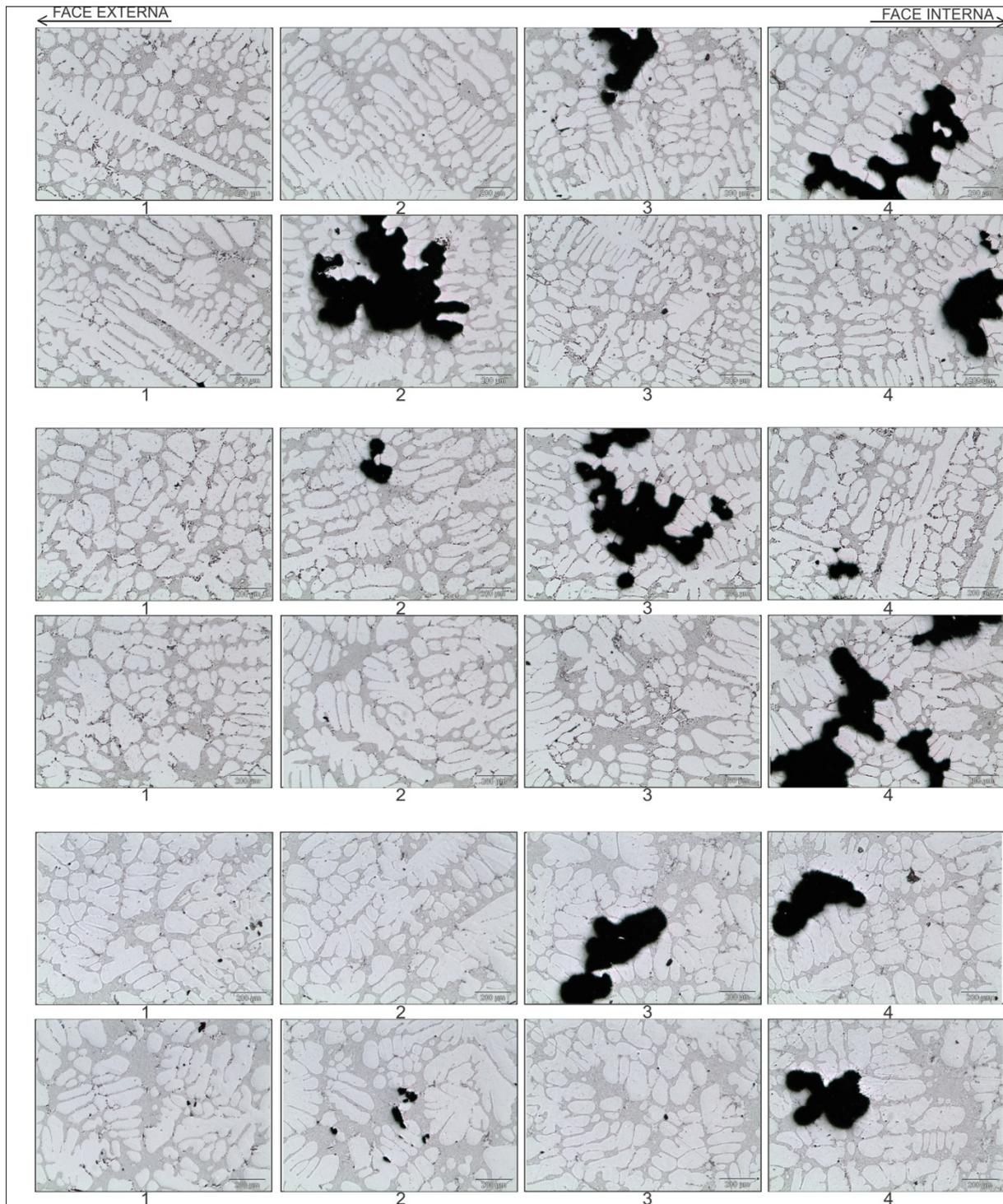


Figura 6. Microestruturas com morfologia dendrítica obtidas por fundição por gravidade e resfriamento com água. A posição 1 corresponde á região externa localizada a aproximadamente a 4 mm conforme representação esquemática das Figuras 3 e 4. A posição 2 e 3 referem-se a região central localizadas entre 8 e 12 mm. Por fim, a posição 4 corresponde a região interna localizada a aproximadamente 16 mm.

3.2 Quantificação das Fases

Foram realizadas 24 medições em cada uma das regiões externa, central e interna das amostras 1, 2 e 3 apresentadas esquematicamente pela Figura 3, garantindo a reprodutibilidade destas regiões, obtendo-se uma média dos resultados para ambas

as amostras obtidas, conforme a Tabela 2. Estes resultados foram comparados com estudos realizados anteriormente por estes mesmo autores.

Tabela 2. Quantificação das fases sob diferentes métodos de resfriamento e rotação. Os dados apresentados abaixo também realizam a comparação com resultados obtidos em trabalho anterior realizados por estes mesmos autores^[4]

| | Amostra obtida por centrifugação (50 G) | | | | | |
|------------------------------|---|------------|------------------|------------|---------------|------------|
| Resfriamento | Externa (1) | | Centro (2) e (3) | | Interna (4) | |
| | α -pró | Eutético | α -pró | Eutético | α -pró | Eutético |
| Água | 69,5 ± 9,1 | 28,1 ± 5,9 | 68,4 ± 9,3 | 28,6 ± 5,3 | 65,1 ± 11,7 | 30,1 ± 4,9 |
| Ar-comprimido ^[4] | 68,2 ± 1,6 | 31,8 ± 1,6 | 66,4 ± 1,1 | 33,6 ± 1,1 | 68,9 ± 2,3 | 31,1 ± 2,3 |
| | Poros (%) | | | | | |
| Água | 3,04 ± 7,5 | | | | | |
| Ar-comprimido ^[4] | 2,30 ± 6,5 | | | | | |
| | Amostra obtida estaticamente | | | | | |
| | Externa (1) | | Centro (2) e (3) | | Interna (4) | |
| | α -pró | Eutético | α -pró | Eutético | α -pró | Eutético |
| Água | 69,6 ± 7,7 | 28,5 ± 4,3 | 63,8 ± 11,9 | 30,2 ± 4,2 | 63,0 ± 13,0 | 29,8 ± 4,9 |
| Ar-comprimido ^[4] | 76,5 ± 4,4 | 23,5 ± 4,4 | 60,5 ± 7,1 | 39,5 ± 7,1 | 66,2 ± 4,5 | 33,8 ± 4,5 |
| | Poros (%) | | | | | |
| Água | 5,03 ± 9,4 | | | | | |
| Ar-comprimido ^[4] | 6,26 ± 10,8 | | | | | |

3.3 Espaçamentos dos Braços Dendríticos Secundários (λ_2)

Foram realizadas 20 medições nas regiões externa, central e interna, em cada uma das amostras 1, 2 e 3 apresentadas esquematicamente pela Figura 3, obtendo-se uma média dos resultados. Estes são apresentados na Figura 7 através de um gráfico de espaçamento dos braços dendríticos secundários (λ_2) em função da posição nas amostras. Estes resultados foram comparados com estudos realizados anteriormente por estes mesmo autores.

3.4 Dureza Brinell

Foram realizadas 27 medições nas regiões externa, central e interna, em cada uma das amostras 1, 2 e 3 apresentadas esquematicamente pela Figura 3, obtendo-se uma média dos resultados. A Figura 8 apresenta os resultados obtidos num gráfico de dureza Brinell (HB) em função da posição nas amostras. Estes resultados foram comparados com estudos realizados anteriormente por estes mesmo autores.

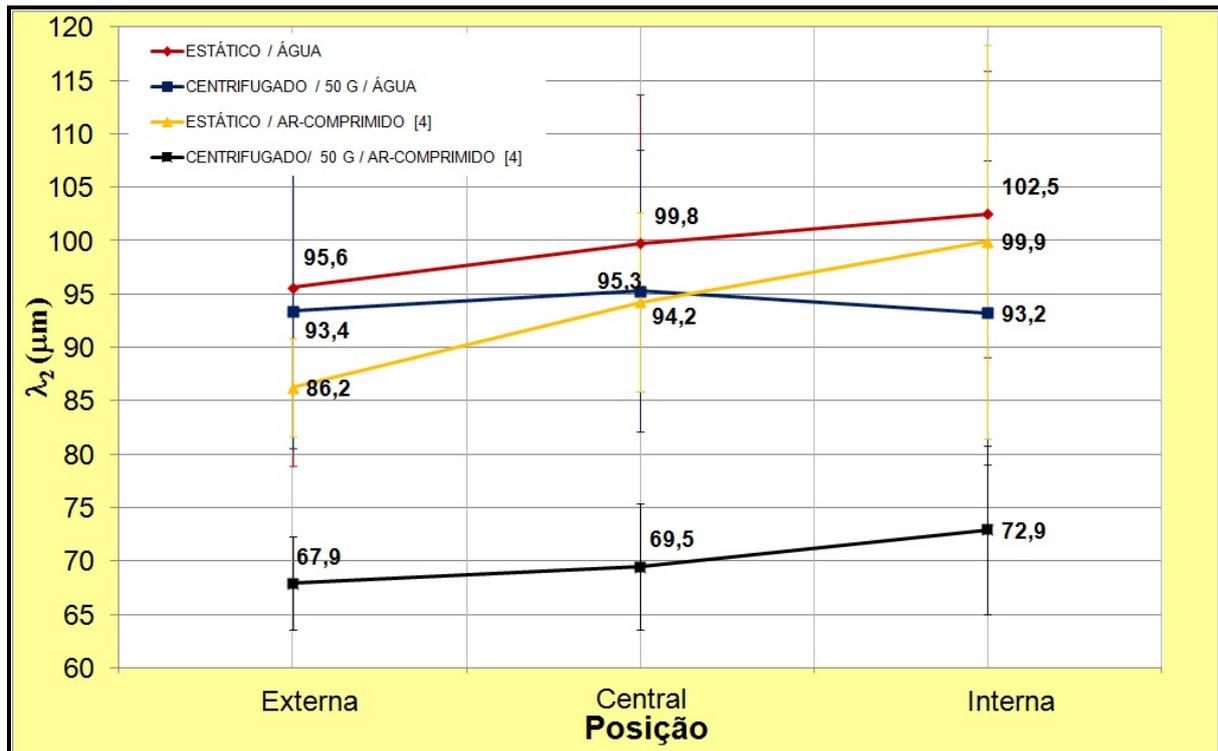


Figura 7. Espaçamento dendrítico secundário (λ_2) em função das regiões analisadas. Neste gráfico ocorre a comparação do efeito da centrifugação e o meio de resfriamento com resultados obtidos em trabalho anterior realizados por estes mesmos autores ^[4] verificando o efeito de refino microestrutural.

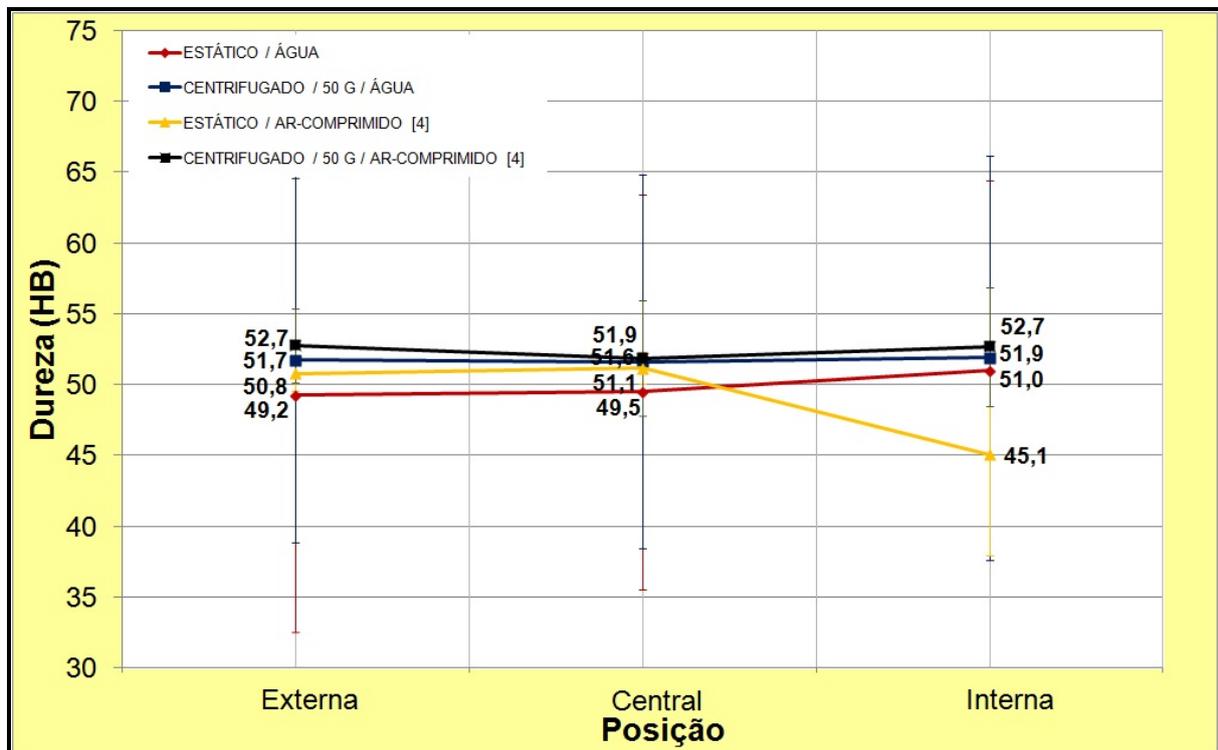


Figura 8. Dureza Brinell (HB) em função das regiões analisadas. Neste gráfico ocorre a comparação do efeito da centrifugação e o meio de resfriamento com resultados obtidos em trabalho anterior realizados por estes mesmos autores ^[4] verificando o efeito na dureza do material

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A taxa de resfriamento à água imposta no processo de centrifugação associada à força centrífuga promoveu o refino microestrutural, porém não contribuiu efetivamente para uma macrossegregação do silício em direção à região interna das amostras. Não se verificou uma tendência de diminuição da fração volumétrica das dendritas em direção a região interna das amostras e conseqüentemente o aumento da fase eutética como apresentado nos estudos de Chirita et al.^[3] Porém, Chirita et al.^[3] não apresentaram as dimensões da coquilha utilizada nos ensaios, sendo somente informado a rotação de 450 rpm imposta ao processo de centrifugação. Logo, não é possível estabelecer uma relação para que seja determinado o fator G correspondente a essa rotação. Portanto, não é possível afirmar se existem diferenças relevantes em ambos os estudos que expliquem a tendência de diminuição ou o aumento das frações volumétricas das fases nas diferentes regiões das amostras.

Face aos resultados obtidos em trabalho anterior^[4], foi possível comparar o comportamento microestrutural sob diferentes meios de resfriamento verificando o efeito da centrifugação. Nas curvas apresentadas pela Figura 7 verificou-se a redução dos espaçamentos dos braços dendríticos secundários (λ_2) nas amostras centrifugadas em ambos os meios de resfriamento utilizados comprovando o refino microestrutural. Em estudos realizados por estes mesmo autores^[4], mas utilizando refrigeração a ar-comprimido, as amostras centrifugadas também apresentaram menor espaçamento dendrítico secundário correspondentes a 67,9 μm e 72,9 μm para as regiões externa e interna respectivamente, contra 86,2 μm e 99,9 μm para as amostras estáticas. No entanto, utilizando resfriamento à água os valores de espaçamento dendrítico mantiveram-se aproximadamente constantes correspondendo a 93 μm nas amostras centrifugadas enquanto que nas amostras estáticas obteve-se 95,6 μm na região externa e 102,5 μm na região interna. Embora a centrifugação tenha mostrando um pequeno refino microestrutural em ambos os casos, estes resultados não foram significativos com relação aos valores de dureza mensurados como esperado.

Por fim, a Tabela 2 apresenta um comparativo demonstrando a redução da fração de poros DAS amostras centrifugadas em relação as amostras estáticas. Notou-se valores de aproximadamente 3% contra 5% das amostras estáticas nas amostras resfriadas a água e 2% contra 6% nas amostras resfriadas a ar-comprimido. Porém, a taxa de resfriamento imposta pela água é maior que o ar-comprimido e, portanto, esperava-se que o refino microestrutural das amostras refrigeradas com água fosse maior do que aquele obtido com ar comprimido o que não foi encontrado no presente estudo. A explicação para este fato pode estar na diferença de vazões entre os dois tipos de refrigeração, ocasionando uma maior extração de calor no caso do ar-comprimido e conseqüentemente acarretando a maior redução dos espaçamentos dendríticos secundária e menor fração de poros resultando, portanto, em um refinamento microestrutural mais intenso.

5 CONCLUSÃO

Os resultados experimentais do presente trabalho permitiram a análise da influência do resfriamento e da centrifugação sobre a microestrutura de liga comercial Al-7%Si. Verificou-se o refino da microestrutura nas amostras centrifugadas através da diminuição dos espaçamentos dos braços dendríticos secundários e a redução da

fração de poros das amostras centrifugadas em relação às amostras estáticas. No entanto, para esta liga comercial Al-7%Si, utilizando uma aceleração correspondente a 50G e resfriamento a água, não foi possível verificar o fenômeno da macrossegregação do silício.

REFERÊNCIAS

- 1 BEELEY, P.R.; Foundry Technology, London: London Butterworks. 1972.
- 2 ROYER, A.; VASSEUR, S. Centrifugal Casting, Metals Handbook, vol. 15 Casting, p.296-307, 1992.
- 3 CHIRITA, G. et al; Sensitivity of different Al–Si alloys to centrifugal casting effect, Materials and Design 31 (2010) 2867–2877, 2010.
- 4 ALVES, J.R.O; FONSECA JR, T. M. I.; MARTORANO, M. A.; Fundição centrífuga de liga comercial Al-7%Si, 11° Encontro Nacional do Estudantes de Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas – ENEMET, São Paulo – SP, Brasil, 17 a 21 de Julho de 2011.