



FUNDIÇÃO CENTRÍFUGA DE LIGA COMERCIAL Al-7%Si¹

João Ricardo Ortega Alves²

Taylor Mac Intyer Fonseca Junior³

Marcelo Aquino Martorano⁴

Resumo

Este trabalho teve como principal objetivo estudar a formação da macrosegregação durante a solidificação centrífuga de uma liga comercial Al-7%Si. A liga foi solidificada de forma estática e com uma rotação correspondente a uma aceleração centrífuga de 50 vezes a aceleração da gravidade. As duas amostras foram refrigeradas através da injeção de ar comprimido na parede externa da coquilha, provocando solidificação unidirecional da porção externa para a interna das amostras. Para a análise microestrutural e da macrosegregação, as amostras foram caracterizadas por microscopia óptica e metalografia qualitativa da distribuição das partículas de Si e das dendritas primárias de Al. Foram realizados ensaios de dureza Brinell para verificar a influência da centrifugação nas propriedades mecânicas da liga. Notou-se uma baixa macrosegregação do silício e pequeno refino das microestruturas induzidas pela força centrífuga, verificados pela uniformidade de concentração de fase eutética ao longo das amostras e pela redução do espaçamento dos braços dendríticos secundários, respectivamente. Assim, não foi suficiente para provocar diferenças consideráveis de dureza da amostra centrifugada em relação à amostra obtida estaticamente.

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

CENTRIFUGAL CASTING COMMERCIAL ALLOY Al-7%Si

Abstract

This paper aimed to study the formation of macrosegregation during solidification of an alloy centrifugal commercial Al-7% Si. The alloy was solidified in a static and with a rotation corresponding to a centrifugal acceleration of 50 times the acceleration of gravity. The two samples were cooled by injecting air into the outside wall of the tube material, causing unidirectional solidification of the outer to the inner portion of the samples. For the analysis of the microstructure and macrosegregation, the samples were characterized by optical metallography of particles of Si and Al primary dendrites. Were performed test Brinell hardness tests to verify the influence of spin on the properties mechanical alloy. Noticed a low macrosegregation and and small silicon refining the microstructure induced by centrifugal force, verified by the uniformity of concentration of the eutectic phase along the samples and reducing the secondary dendrite arm spacing, respectively. Thus, it was not enough to cause considerable differences in the hardness of the sample centrifuged for the sample obtained statically.

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

¹ Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

² Aluno do curso de Engenharia de Materiais do Centro Universitário da FEI, joaricardo.ortega@hotmail.com

³ Prof. Me. do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais do Centro Universitário da FEI. tmacintyer@fei.edu.br

⁴ Engenheiro Metalúrgico. Prof. Associado. POLIUSP.

1 INTRODUÇÃO

No processo de fundição de peças metálicas por centrifugação, a solidificação ocorre sob a ação da força centrífuga em um molde em rotação. Conseqüentemente, a força centrífuga causada pela rotação pode alterar significativamente a estrutura metalúrgica e a homogeneidade química do produto final.⁽¹⁾ O resultado da ação da força centrífuga é observado no preenchimento do molde, no modo de solidificação e na movimentação de massa durante a solidificação, propiciando algumas vantagens importantes, porém também resultando em defeitos de fundição característicos. Alguns defeitos de fundição observados, como a macrossegregação, resultam do transporte de massa acentuado pela ação da força centrífuga durante a solidificação. O processo industrial de fundição sob centrifugação é largamente utilizado para a produção de peças metálicas que possuem um eixo de revolução, como cilindros e tubos.⁽¹⁾ 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. Johnston e Parr⁽²⁾ estudaram a solidificação de uma liga Pb-85%Sn utilizando rotações de $10^{-4}G$ até $5G$ ($G = 9,8 \text{ m/s}^2$) sob diferentes taxas de resfriamento. Constataram que o aumento da força da aceleração da gravidade aumenta a fragmentação das dendritas através do direcionamento do fluxo de fluido. Esse mesmo fluxo também afeta o espaçamento e a uniformidade dos braços dendríticos secundários. Durante a solidificação, dendritas primárias ricas em Sn formaram-se inicialmente e o líquido interdendrítico, enriquecido em Pb, finalmente sofreu a reação eutética. Dendritas primárias de Pb não foram observadas. O aumento da velocidade de rotação e a diminuição da taxa de resfriamento resultaram em uma maior diferença entre a fração volumétrica de dendritas primárias ricas em Sn presentes em cada extremo da amostra. Os autores concluíram que o aumento da velocidade de rotação aumentou a velocidade de movimentação das dendritas primárias e a menor taxa de resfriamento permitiu um maior deslocamento das mesmas, resultando em uma maior segregação. Como nos processos de fundição a estrutura é tipicamente dendrítica, não havendo alterações significativas ao longo da peça, exceto pelos espaçamentos dos braços dendríticos, torna-se importante estudos que envolvam parâmetros de processos com o tamanho dos espaçamentos interdendríticos devido sua alta relevância tecnológica.⁽³⁾ Deste modo, este trabalho tem como objetivo o estudo dos efeitos ocasionados pelo processo de fundição centrífuga sobre a estrutura de uma liga comercial Al-7%Si através de observações metalográficas verificando a macrossegregação do silício e sua influência sobre as propriedades mecânicas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

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

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

Liga comercial Al-7%Si	ELEMENTOS (%)					
	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 60 mm de altura, 80 mm de diâmetro externo e 20 mm de espessura, apresentados na Figura 1. 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), Figura 2, está equipada com forno bipartido que garante que a carga não irá se solidificar durante o vazamento.

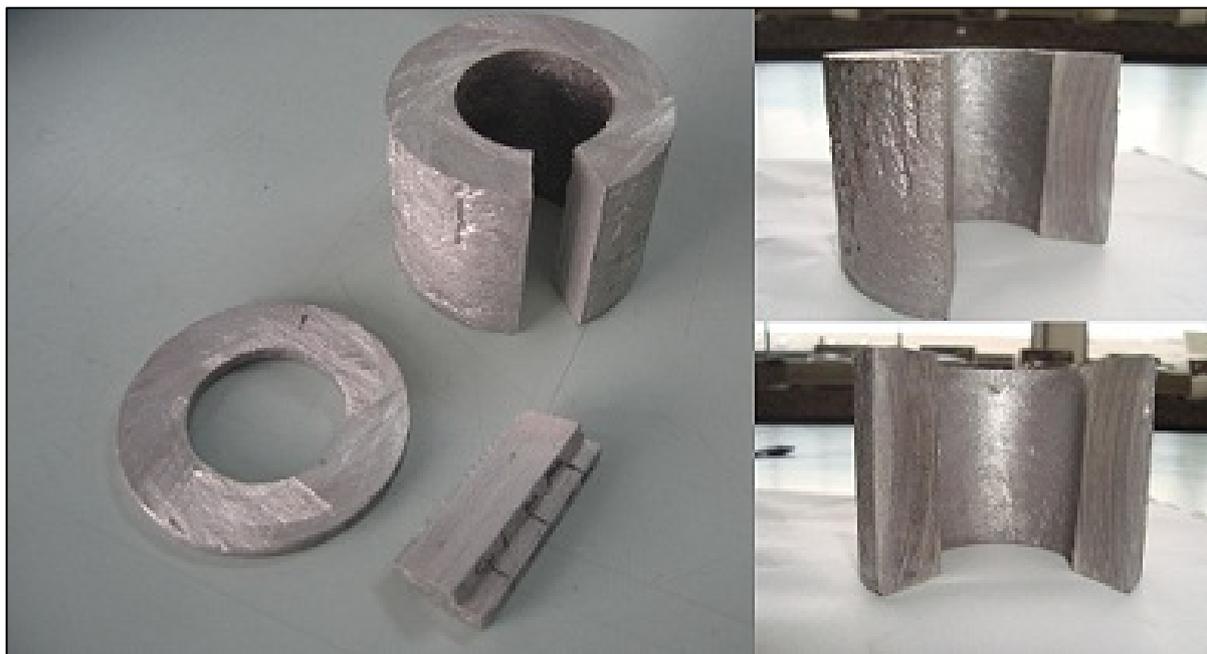


Figura 1: Tubo metálico obtido após o processo de centrifugação.

O sistema camisa-coquilha foi aquecido a temperatura de 700°C, com uma frequência de rotação de 3,3 Hz que garante 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 ar comprimido foi acionado. A carga solidificada de forma estática utilizou o mesmo procedimento de refrigeração. O copo obtido por centrifugação foi cortado em três amostras diferentes para análise como mostra a Figura 3(a); embutidas em baquelite seguido de lixamento e polimento em politriz automática Abramim Struers. Ensaios de dureza Brinell foram realizados para cada região selecionada, indicadas na Figura 3(b), 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).

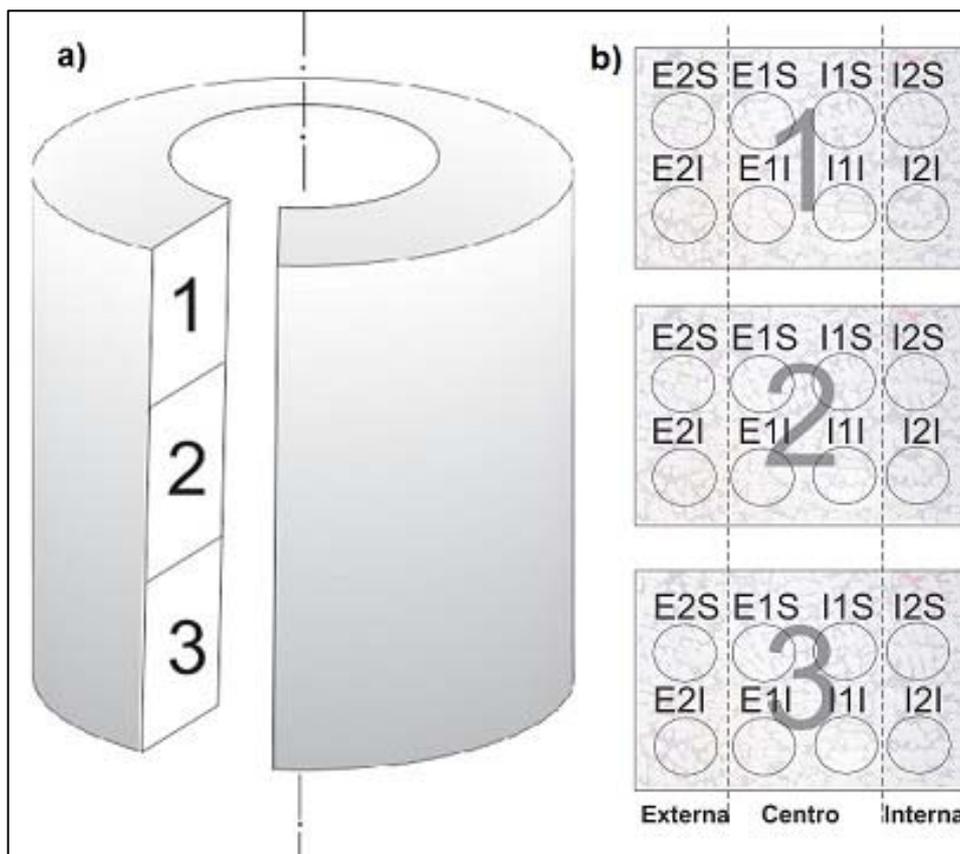


Figura 3: Esquema de corte das amostras para análise metalográfica e de dureza (a) e regiões selecionadas (b). Para definição das regiões selecionadas foi adotado a seguinte nomenclatura: (I) para regiões internas e (E) regiões externas no primeiro dígito, e (S) para regiões superiores e (I) para regiões inferiores no terceiro dígito das amostras. Exemplo: E2I corresponde a região externa da posição 2 na superfície inferior da amostra.

Para verificar a possível segregação do silício presente na fase eutética, as fases encontradas na liga Al-7%Si foram quantificadas utilizando o microscópio óptico LEICA modelo DMLM, apresentado pela Figura 4, acoplado ao sistema digital de análise de imagens Q500/W a fim de tentar comprovar o fenômeno da macrosseguração. Foi estabelecido um método de análise através das regiões indicadas na Figura 3(b), com intuito de garantir a reprodutibilidade dos resultados.



Figura 4: Microscópio Óptico do Centro de Desenvolvimento de Materiais Metálicos da FEI (CDMatM – FEI).

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. Observou-se também uma baixa macrosseguração de silício em direção à região interna das amostras. As microestruturas obtidas com resfriamento à ar comprimido e fundidas estaticamente, são apresentadas pela Figuras 5. Utilizando a fundição sob centrifugação, com resfriamento a ar e 50G foram obtidas as microestruturas observadas na Figuras 6.

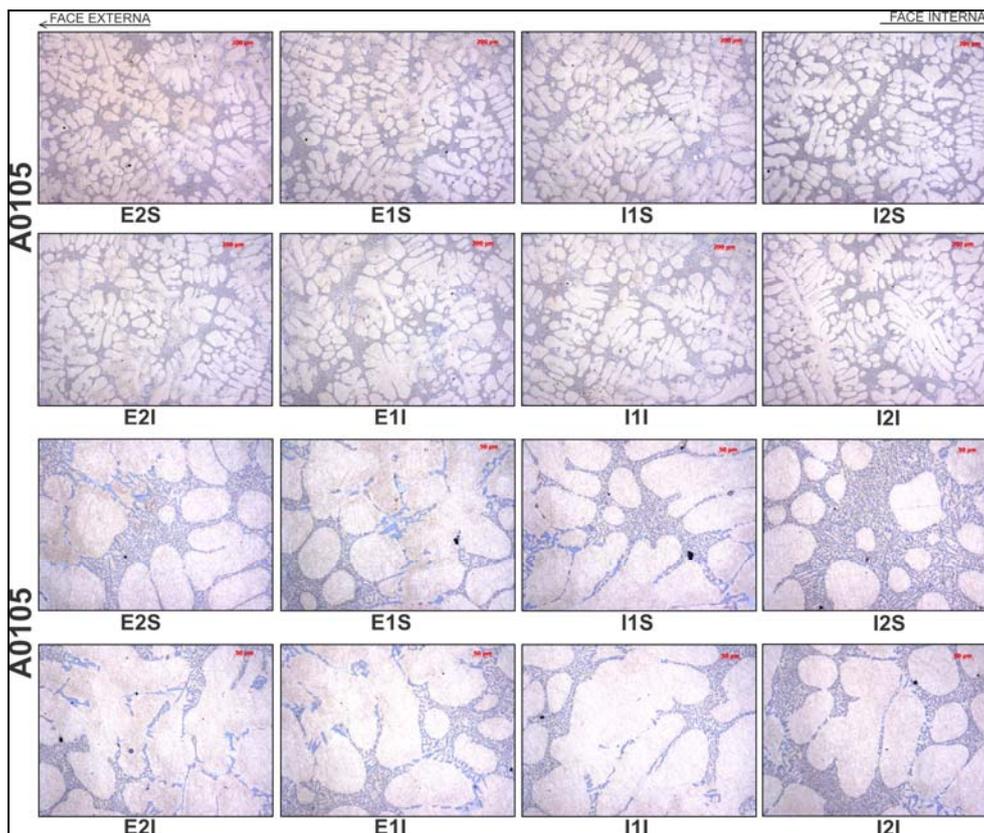


Figura 5: Microestruturas com morfologia dendrítica obtidas com resfriamento a ar e coquilha estática correspondente à seção longitudinal com os aumentos de 50X e 200X respectivamente.

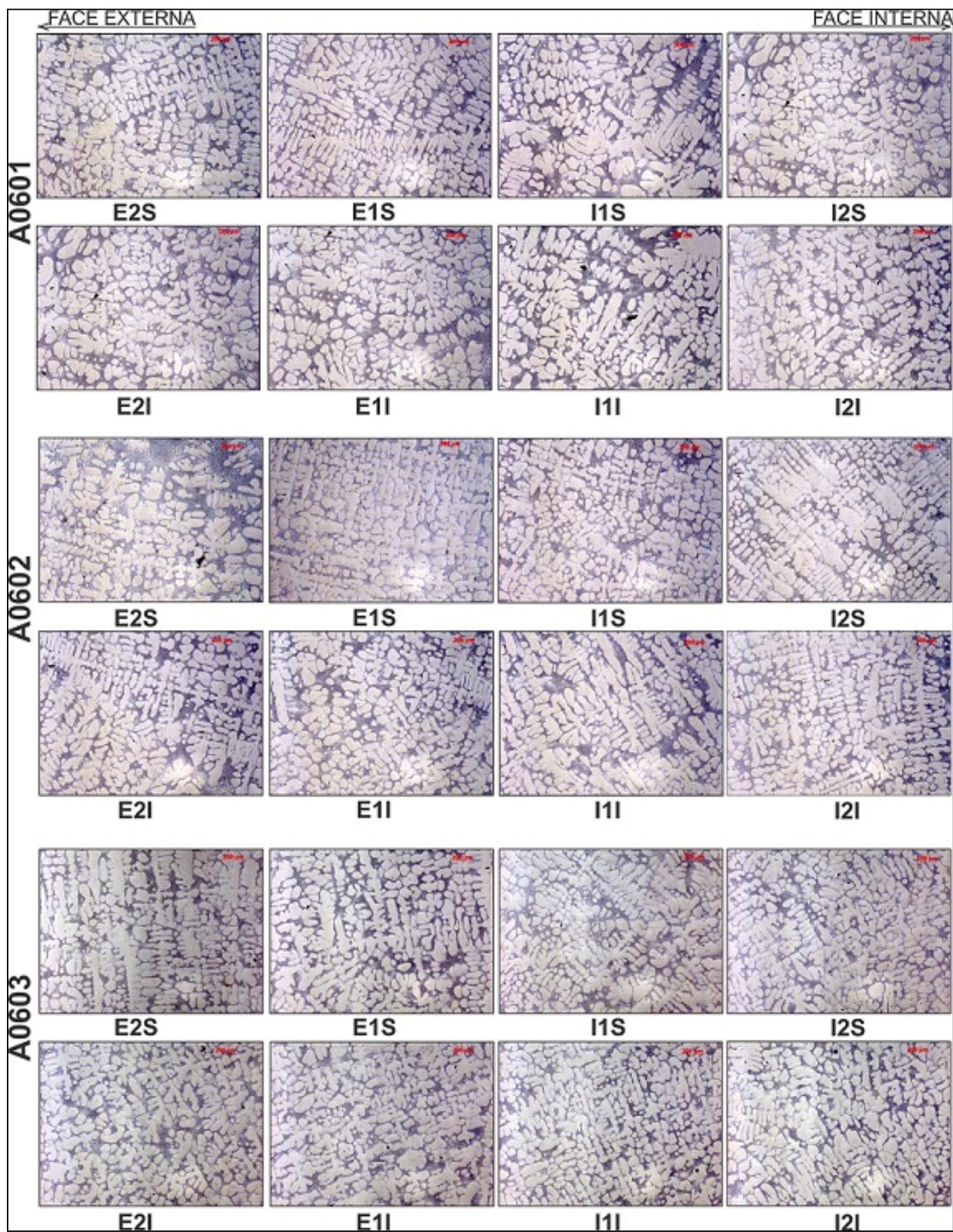


Figura 6: Microestruturas com morfologia dendrítica obtidas por fundição sob centrifugação, resfriamento a ar, 50G, seção longitudinal; aumento de 50X.

3.2 Quantificação das Fases

Foram realizadas 14 medições em cada região das amostras 1, 2 e 3 apresentada esquematicamente pela Figura 3(b), garantindo a reprodutibilidade destas regiões, obtendo-se uma média dos resultados para ambas as amostras obtidas, conforme a Tabela 2.

Tabela 2: Média dos resultados das regiões externa, central e interna das amostras 1, 2 e 3 referentes às porcentagens das fases quantificadas

	Amostra obtida por centrifugação					
	Externa		Centro		Interna	
	Alfa-pró	Eutético	Alfa-pró	Eutético	Alfa-pró	Eutético
Média (%)	68,21	31,79	66,37	33,63	68,87	31,13
DesvPad	1,65		1,07		2,32	
	Amostra obtida estaticamente					
	Externa		Centro		Interna	
	Alfa-pró	Eutético	Alfa-pró	Eutético	Alfa-pró	Eutético
Média (%)	76,47	23,53	60,48	39,52	66,25	33,75
DesvPad	4,37		7,06		4,49	

3.3 Medição da Distância dos Braços Secundários

Como citado anteriormente, o estudo dos espaçamentos interdendríticos possui relevância tecnológica principalmente em aspectos que envolvam o aumento das propriedades mecânicas através do refinamento da microestrutura implicando na diminuição da distância dos braços dendríticos secundários. Foram efetuadas 8 medições destes espaçamentos nas amostras 1, 2 e 3, em cada região analisada, conforme Figura 3(b), e plotado um gráfico (Figura 7). A Tabela 3 apresenta os valores médios encontrados.

Tabela 3: Média dos resultados das regiões externa, central (E1 e I1) e interna das amostras 1, 2 e 3 referentes à distância dos braços dendríticos secundários

	Amostra obtida por centrifugação			
	E2	E1	I1	I2
Média (μm)	67,9	68,5	70,4	72,9
DesvPad	4,37	3,63	7,89	8,88
	Amostra obtida estaticamente			
	E2	E1	I1	I2
Média (μm)	86,2	95,0	93,5	99,9
DesvPad	4,58	2,57	14,28	18,42

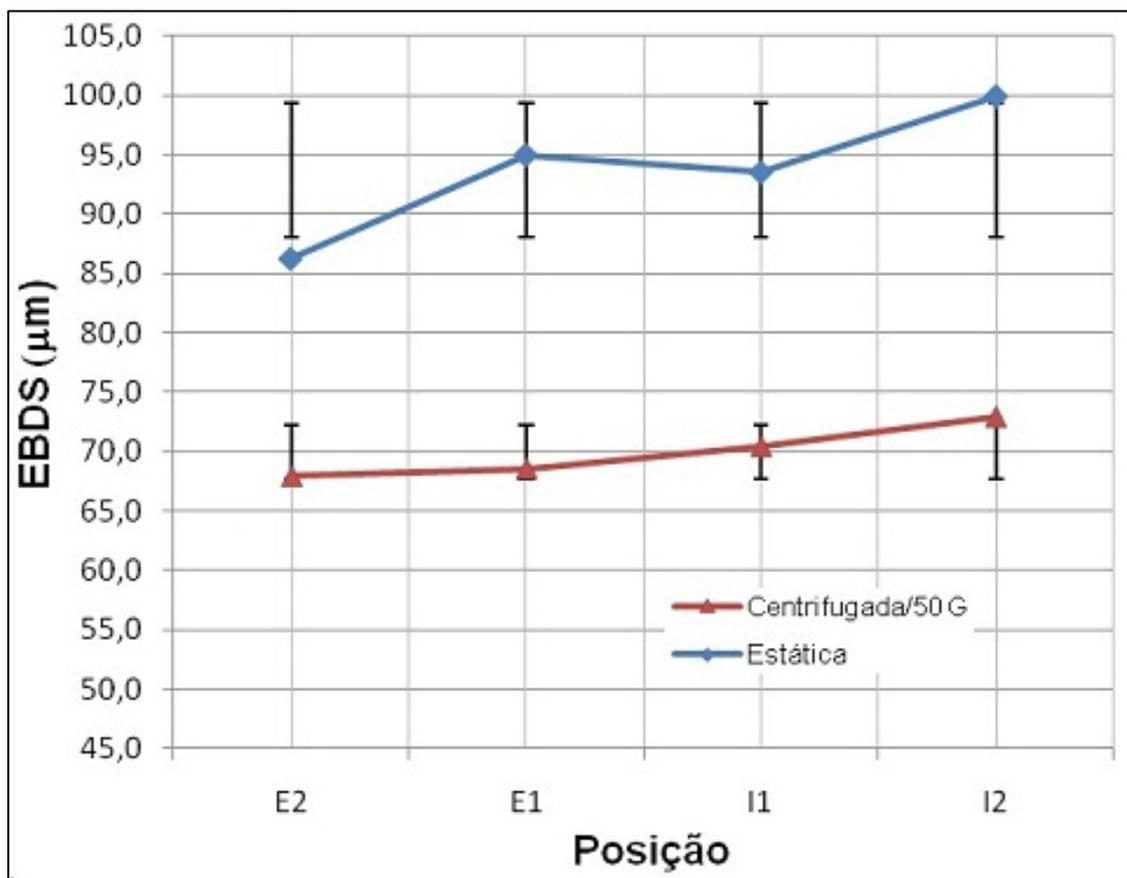


Figura 7: Espaços dos braços dendríticos secundários correspondentes às regiões analisadas conforme representação esquemática da Figura 3(b). As regiões E2, E1, I1 e I2 correspondem às médias dos valores encontrados nessas regiões, ou seja, regiões externa, central e interna.

3.4 Ensaio de Dureza Brinell

Foram realizados três ensaios de dureza para cada região selecionada das amostras 1, 2 e 3 e comparado os valores de dureza entre as peças obtidas estaticamente e centrifugadas. As regiões analisadas se encontram aproximadamente nas posições esquematizadas pela Figura 8. Os valores encontrados foram plotados em função da posição ao longo da peça e são apresentados pelo gráfico da Figura 9.

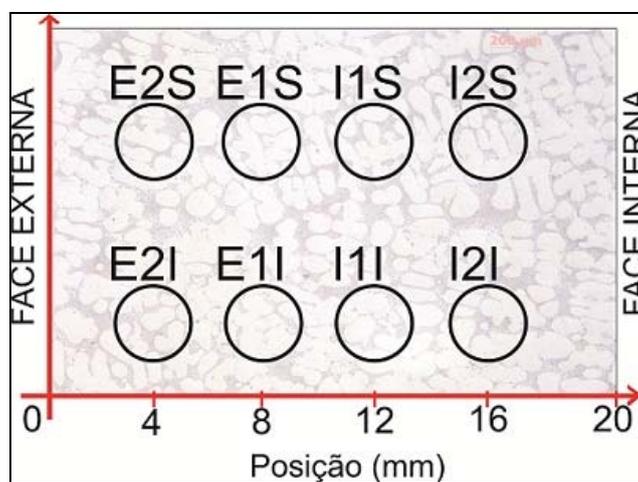


Figura 8: Posição das regiões analisadas no ensaio de dureza Brinell ao longo da amostra.

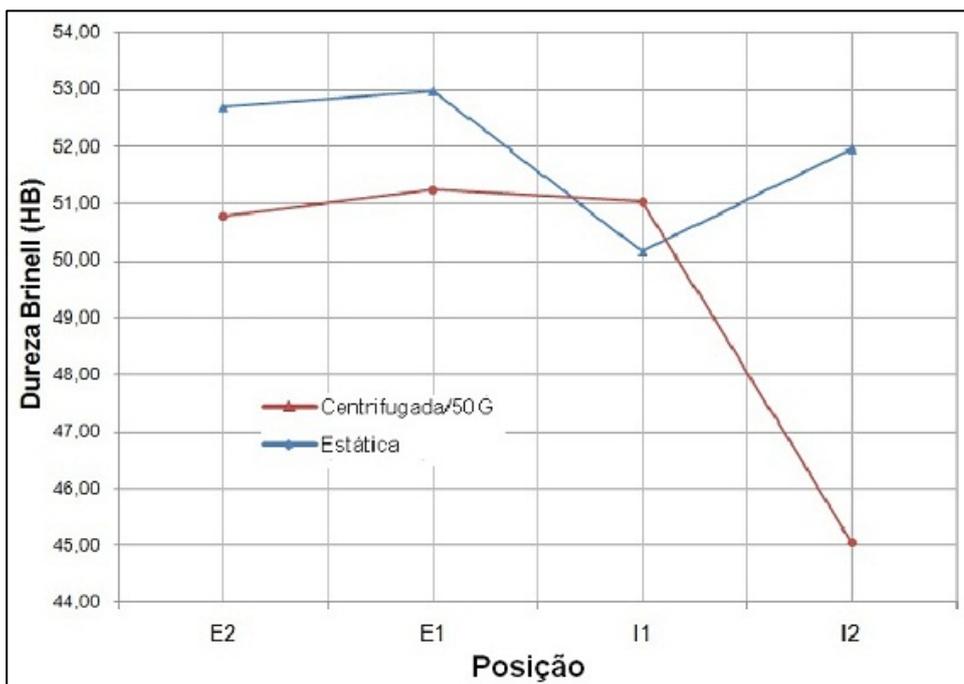


Figura 9: Gráfico da dureza em função da posição correspondente às regiões analisadas conforme representação esquemática da Figura 3(b). As regiões E2, E1, I1 e I2 correspondem às médias dos valores encontrados nessas regiões, ou seja, regiões externa, central e interna.

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

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, correspondente a 50G, promoveu a quebra das dendritas intensificando o refinamento microestrutural. A Figura 10 apresenta uma comparação entre quatro micrografias correspondentes à mesma região para as amostras obtidas por centrifugação e estaticamente.

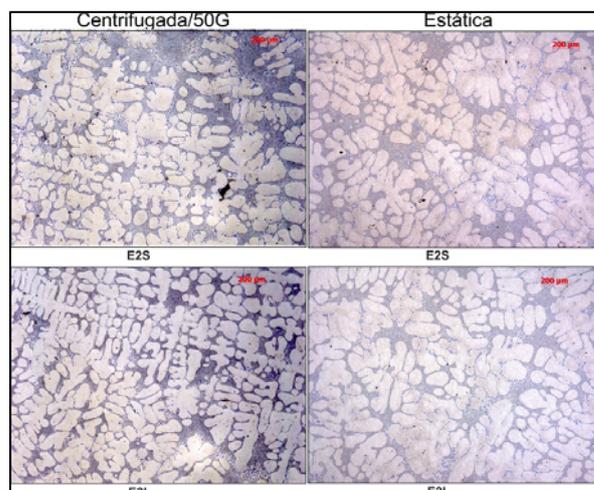


Figura 10: Comparação entre as microestruturas obtidas por centrifugação e pelo método estático, onde E2S corresponde a região externa e superior da posição 2 e E2I a região externa e inferior da posição 2 (conforme Figura 3).



É possível observar, portanto, a redução do tamanho das dendritas implicando em estruturas mais refinadas. No entanto, os resultados encontrados na Tabela 2, demonstraram valores relativamente constantes das fases α -pró e eutética. A região externa, central e interna permaneceu com valores semelhantes para ambas as amostras em estudo. Logo, a força centrífuga imposta no processo foi suficiente para promover o refinamento da microestrutura, porém não contribuiu para a macrosegregação do silício, presente na fase eutética, em direção a região interna da peça. Com relação aos valores dos espaçamentos dos braços dendríticos secundários (EBDS) apresentados pelo gráfico da Figura 8, comprovou-se o refinamento da microestrutura nas amostras solidificadas por centrifugação verificando a redução da distância entre os braços secundários. A amostra obtida pelo método estático apresentou na região externa valores de EBDS igual a 86,2 μm e na região interna 99,9 μm , enquanto que a amostra centrifugada obteve valores na região externa e interna iguais a 67,9 μm e 72,9 μm , respectivamente. Os menores valores de EBDS na região externa de ambas as amostras é justificado pela versatilidade que as dendritas possuem de se ramificar o necessário no sentido de reduzir o super-resfriamento, induzindo uma região mais refinada. O fluxo de líquido à frente da interface sólido/líquido flui em direção à região interna da peça reduzindo a troca de calor e, portanto, diminui a velocidade de solidificação possibilitando o crescimento dos braços dendríticos. No entanto, foram encontrados valores relativamente altos de desvio padrão. A justificativa para essa ocorrência foi a ausência de uma uniformidade microestrutural promovido pela baixa taxa de resfriamento, não induzindo a um padrão dos espaçamentos dos braços dendríticos secundários. Talvez a mudança do meio de resfriamento para água aumente a taxa de resfriamento ocasionando um maior refinamento da microestrutura; obtendo-se braços dendríticos mais uniformes. Além disso, o gráfico apresentado pela Figura 10 apresentou valores de dureza levemente superiores para as amostras obtidas por centrifugação. Porém, os pontos I1 da amostra centrifugada e I2 para amostra obtida pelo método estático, divergiram dos demais apresentando valores de dureza abaixo do esperado. A explicação para tal acontecimento se deve provavelmente à presença de uma fase mais dútil, ou seja, a fase alumínio primário, correspondente às dendritas observadas nas microestruturas.

5 CONCLUSÕES

Os resultados experimentais do presente trabalho e a discussão destes permitiram a análise da influência da força centrífuga associada à taxa de resfriamento sobre as peças obtidas por centrifugação e com coquilha estática. Verificou-se a o refino da microestrutura na peça centrifugada através da diminuição dos braços dendríticos e os valores de dureza encontrados foram relativamente superiores às amostras obtidas estaticamente. No entanto, a força centrífuga imposta induziu a baixa macrosegregação do silício em direção à região interna da amostra.

Agradecimentos

Ao Centro Universitário da FEI pelo patrocínio do projeto e concessão da bolsa de iniciação científica.

Ao amigo e orientador Prof. Me. Taylor Mac Intyer Fonseca Jr pelo apoio e intenso incentivo ao longo do desenvolvimento do projeto.



Aos técnicos do Centro de Desenvolvimento de Materiais Metálicos da FEI (CDMatM-FEI), pela paciência e suporte durante os trabalhos no laboratório de materiais.

REFERÊNCIAS

- 1 ROYER, A.; VASSEUR, S. Centrifugal Casting, Metals Handbook, vol. 15 Casting, p.296-307, 1992.
- 2 JONHSTON, M.H.; PAR, R.A. The influence of acceleration forces on dendritic growth and grain structure. Metallurgical Transactions B, v.13B, p.85-90, 1982.
- 3 GARCIA, A. Solidificação: Fundamentos e Aplicações. Editora Unicamp, 2001.