

## **CARACTERIZAÇÃO DE LIGAS Al-Si EUTÉTICA E HIPEREUTÉTICA FUNDIDAS POR CENTRIFUGAÇÃO PARA APLICAÇÕES AUTOMOTIVAS**

A. A. Couto<sup>1,2</sup>; D. M. Marreco<sup>1</sup>; A. Cabral Neto<sup>1</sup>; J. Vatavuk<sup>1</sup>; M. A. Nava<sup>3</sup>  
Av. Prof. Lineu Prestes, 2.242, CEP: 05508-000, São Paulo, SP, [acouto@ipen.br](mailto:acouto@ipen.br)  
(1) Mackenzie; (2) IPEN; (3) Magneti Marelli Cofap

### **RESUMO**

*Em componentes de motor, como a camisa de cilindro automotiva, é necessário haver uma elevada dureza na parede interna da camisa, a fim de se evitar o rápido desgaste devido à abrasão que os anéis de pistão exercem na superfície interna da camisa quando do funcionamento do motor. Neste trabalho foram investigadas as ligas Al-Si eutética e hipereutética fundidas por centrifugação aplicadas como camisa de cilindro. A centrifugação tende a concentrar a fase de menor densidade (silício) na parede interna da camisa. O perfil de dureza ao longo da espessura da camisa foram determinados em intervalos de 1 mm. O intuito de segregar a fase  $\beta$  para a parede interna da camisa se mostrou eficaz. O aumento da quantidade da fase  $\beta$  na parede interna da camisa foi acompanhado pelo aumento de dureza. O aumento de dureza devido à segregação da fase  $\beta$  mostrou-se mais eficaz na liga hipereutética.*

Palavras-chave: Al-Si; fundição por centrifugação; componente automotivo.

### **INTRODUÇÃO**

As ligas do sistema Al-Si são as mais importantes entre as ligas fundidas de alumínio, principalmente por sua alta fluidez, baixa contração nos fundidos, elevada resistência à corrosão, boa soldabilidade, fácil brasagem e seu baixo coeficiente de expansão térmica <sup>(1)</sup>. As ligas de alumínio com 5-20% de Si (em porcentagem em peso) são as mais comuns e as mais usadas na indústria. A microestrutura destas ligas consiste de uma fase primária de alumínio (fase  $\alpha$ ) ou de silício (fase  $\beta$ ) e de uma estrutura eutética exibindo a fase  $\beta$  com morfologia acicular na forma de grandes plaquetas na matriz de alumínio. A dureza das partículas de silício promove o aumento da resistência ao desgaste destas ligas. Contudo, ligas com grandes

quantidades de silício apresentam uma fragilidade que acaba dificultando a utilização deste material.

Na fundição por centrifugação, um molde permanente é rotacionado sobre seu eixo em altas velocidades (1000 a 1500 rpm) enquanto o metal fundido é vazado. O metal fundido é vazado em movimento de rotação na direção da parede do molde, onde é solidificado após o resfriamento. Com a utilização do processo de fundição por centrifugação é possível se pensar em utilizar ligas Al-Si para fabricação de camisas de cilindro. Camisas de cilindro automotivo são componentes mecânicos com a função de revestir internamente os cilindros dos motores automotivos. Nas superfícies internas das camisas de um motor deslocam-se os pistões e anéis, promovendo um considerável desgaste entre a camisa de cilindro e anéis do pistão em razão do atrito existente.

Neste caso, a centrifugação faria com que ocorresse uma concentração de silício (menor densidade) na parede interna da camisa de cilindro, enquanto que o restante do componente teria teor de silício mais baixo. Nestas condições estariam atendidos os requisitos de resistência ao desgaste na superfície interna da camisa devido ao alto teor de silício segregado e ao mesmo tempo o componente não fragilizaria, pois o restante da camisa teria baixo teor de silício. Diante do citado anteriormente, o objetivo deste estudo foi avaliar a distribuição de silício e a dureza ao longo da espessura da camisa de cilindro fundida por centrifugação. As ligas Al-Si escolhidas neste trabalho foram a liga com 12,6% de silício (eutética) e a liga com 14,7% de silício (hipereutética).

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

Uma representação esquemática da centrífuga horizontal, utilizada neste trabalho, é mostrada na fig 1. Neste trabalho foram fundidos por centrifugação tubos (camisas) da liga Al-12,6 %Si e da liga Al-14,7 %Si. Na fundição das ligas foi utilizado um forno a indução ao ar e as temperaturas de vazamento variaram entre 720 e 770°C. Em todas as fusões foram utilizados escorificante e desgaseificante à base de hexacloretano. Na fundição por centrifugação, o molde foi pré-aquecido e a velocidade de rotação foi mantida em 1.500 rpm até a solidificação do tubo.

A análise metalográfica foi realizada com a preparação de amostras segundo o esquema apresentado na fig 2. De cada anel foram cortadas quatro amostras de onde foram analisadas quatro vistas. As extremidades do tubo denominadas de

início e final representam as posições de início e fim do vazamento no molde da centrífuga. A preparação das amostras metalográficas foi executada por meio de técnicas convencionais de corte, embutimento, lixamento e polimento. As medidas de dureza Vickers foram executadas com aplicação de carga de 5 kg em intervalos de 1 mm da parede externa até a parede interna do tubo centrifugado.

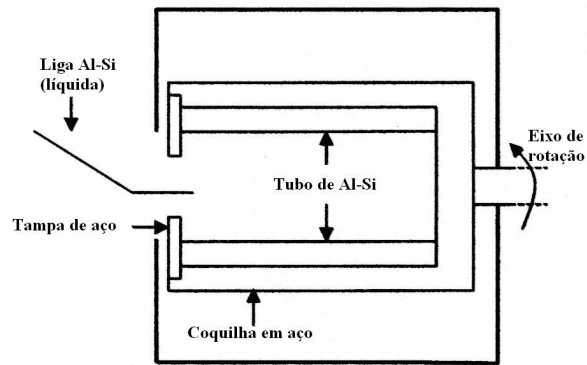


Figura 1: Representação esquemática de uma fundição por centrifugação horizontal com sistema de resfriamento do molde.

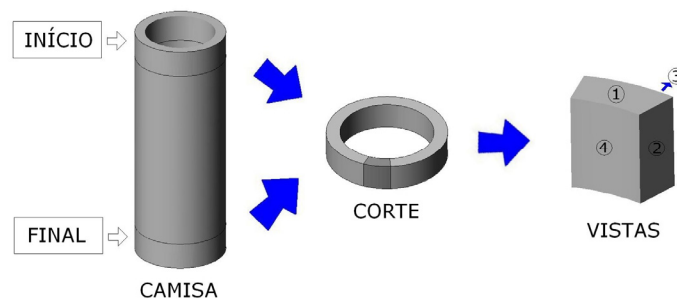


Figura 2: Esquema de corte e de preparação de amostras para análise metalográfica dos tubos (camisas) da liga Al-Si.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na fig 3 é mostrado um dos tubos centrifugados. Na fig 4 são apresentadas micrografias do tubo centrifugado da liga Al-Si hipereutética em algumas posições a partir da parede externa até a parede interna. Em praticamente todos os perfis metalográficos observa-se que numa fina camada próxima à parede externa do tubo há uma quantidade elevada da fase  $\beta$  (silício) primária (fig 4(A)). Esta fase forma-se imediatamente quando o metal líquido entra em contacto com a parede da coquilha. A solidificação quase imediata desta camada não permite que o silício primário

possa deslocar-se em direção da parede interna da camisa devido à força centrífuga. Seguindo-se em direção à parede interna do tubo, até aproximadamente 3 mm (fig 4(B)), nota-se uma região com praticamente somente a microestrutura eutética, com uma matriz de alumínio  $\alpha$  e plaquetas de silício  $\beta$  eutético. À medida que se desloca em direção à parede interna da camisa, o silício primário volta a aparecer (fig 4(C)), atingindo as frações elevadas próximas à parede interna do tubo (fig 4(D)).



Figura 3: Tubo centrifugado da corrida 5.

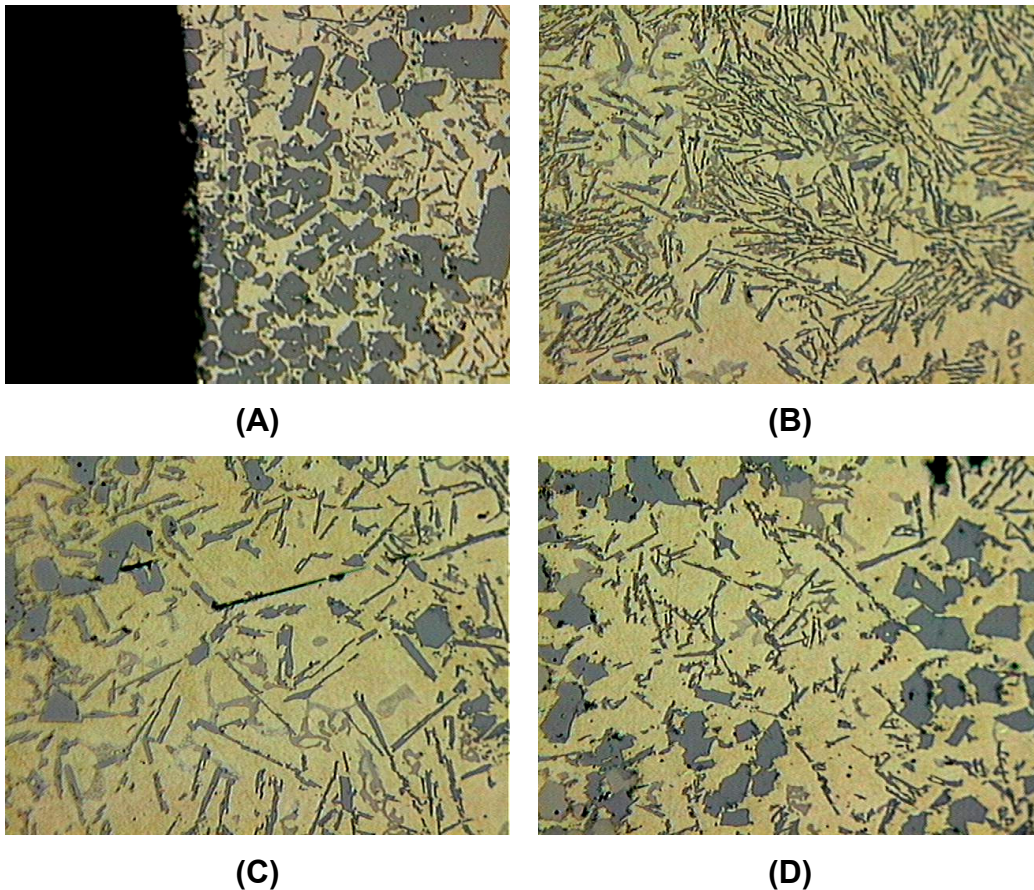


Figura 4: Micrografias ao longo da espessura da parede do tubo da liga Al-14,7%Si fundido por centrifugação a partir da (A) parede externa, a (B) 3 mm, a (C) 4 mm e (D) próximo à parede interna.

Na fig 5 é apresentada a evolução da dureza em função da posição em relação à parede externa do tubo em direção à parede interna em intervalos de 1 mm para um tubo fabricado com a liga Al-14,7 %Si. Como já havia sido observado nas micrografias, nota-se que junto à parede externa ocorre uma fração maior da fase  $\beta$  (silício). Este fato parece confirmar a suposição já discutida anteriormente que o silício primário não tem tempo de migrar em direção à parede interna da camisa devido à solidificação imediata com o metal líquido entra em contato com a parede mais fria da coquilha. A partir de 1 mm da parede externa a quantidade de silício cai bruscamente, voltando a aumentar a partir do meio da seção da parede em direção à parede interna. As regiões com maior concentração da fase  $\beta$  (Si) apresentam valores de dureza mais elevados.

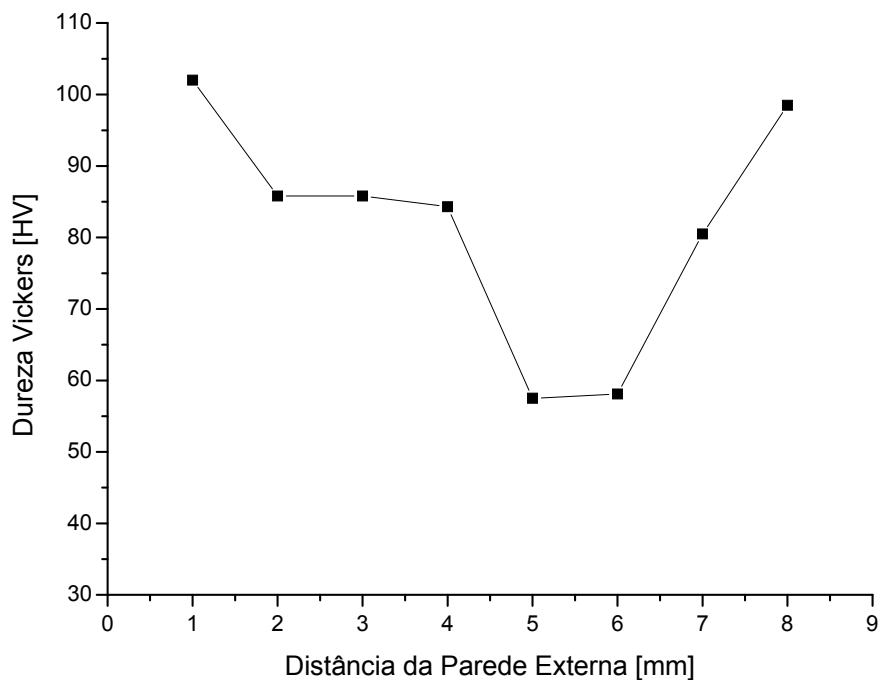


Figura 5: Dureza Vickers (HV) em função da posição em relação à parede externa do tubo (camisa) em direção à parede interna em intervalos de 1 mm para um tubo fabricado com a liga Al-14,7 %Si.

Na fig 6 são apresentadas micrografias do tubo centrifugado da liga Al-Si eutética (12,6%Si) em algumas posições a partir da parede externa até a parede interna. Em praticamente todos os perfis metalográficos observa-se praticamente somente a microestrutura eutética. Na fig 6(A) nota-se a presença de algumas partículas da fase  $\beta$  (silício) primária. A fase  $\beta$  primária está presente numa quantidade muito menor do que na liga hipereutética (14,7%Si). Seguindo-se em

direção à parede interna do tubo (figs 6(B) e 6(C)), nota-se uma região com praticamente somente a microestrutura eutética, com uma matriz de alumínio  $\alpha$  e plaquetas de silício  $\beta$  eutético. À medida que se desloca em direção à parede interna da camisa, o silício primário volta a aparecer (fig 6(D)), mas em quantidade também inferior à presente na liga hipereutética.

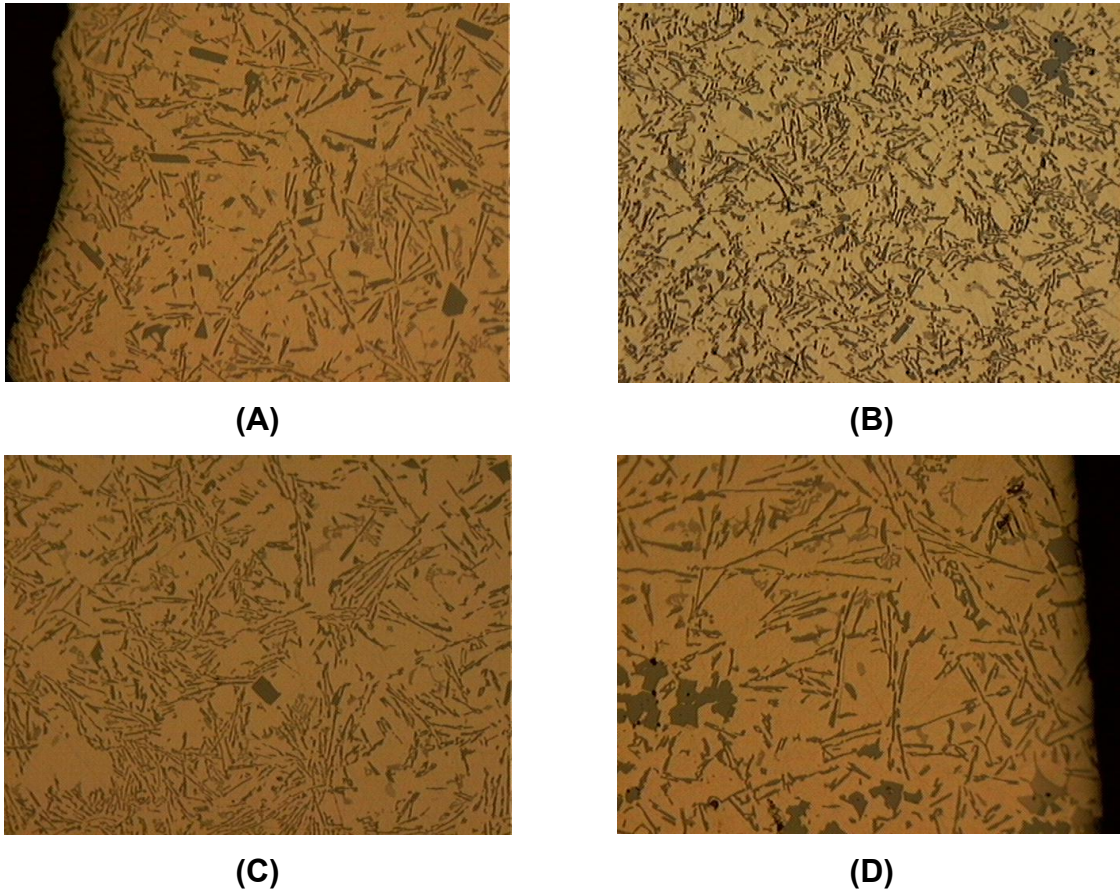


Figura 6: Micrografias ao longo da espessura da parede do tubo da liga Al-12,6%Si fundido por centrifugação a partir da (A) parede externa, a (B) 3 mm, a (C) 4 mm e (D) próximo à parede interna.

Na fig 7 é apresentada a evolução da dureza em função da posição em relação à parede externa do tubo em direção à parede interna em intervalos de 1 mm para um tubo fabricado com a liga Al-12,6 %Si. Como já havia sido observado nas micrografias, nota-se que junto à parede externa ocorre a formação de algumas partículas da fase  $\beta$  primária, porém em quantidade insuficiente para afetar significativamente a dureza. Até aproximadamente 4 mm da parede externa não ocorre grandes variações de dureza na liga eutética. Na região central da parede da

camisa (entre 4 e 7 mm) a dureza cai em decorrência da diminuição de partículas da fase  $\beta$ , voltando a aumentar na região próxima à parede interna da camisa.

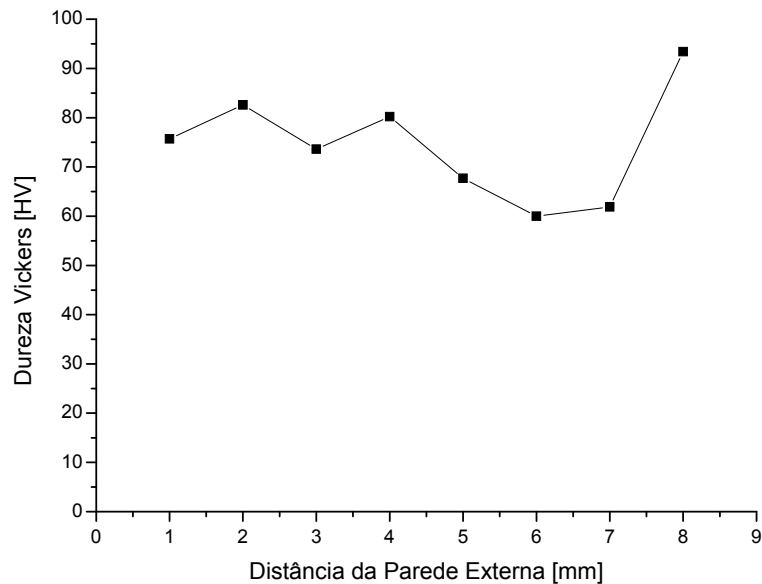


Figura 7: Dureza Vickers (HV) em função da posição em relação à parede externa do tubo (camisa) em direção à parede interna em intervalos de 1 mm para um tubo fabricado com a liga Al-12,6 %Si.

## CONCLUSÕES

A caracterização de ligas Al-Si eutéctica e hipereutéctica fundidas por centrifugação para aplicações automotivas permitiu concluir o intuito de segregar o silício primário, responsável pela melhoria da resistência à abrasão, para a parede interna da camisa por meio da centrifugação se mostrou eficaz. Essa eficácia, obviamente, foi maior na liga hipereutéctica. Contudo, uma fina camada de silício primário também se forma na parede externa da camisa. O aumento da quantidade de silício primário numa fina camada da parede externa da camisa e nas regiões próximas à parede interna induziu a um aumento da dureza do material. Os valores de dureza são maiores ao longo da espessura da camisa à medida que aumenta a quantidade da fase  $\beta$ , principalmente a primária. Existe um grande potencial na utilização de ligas Al-Si fundidas por centrifugação em camisas de cilindro automotivo. Este potencial é mais acentuada em ligas hipereutécticas devido ao efeito endurecedor do silício primário que migra para a parede interna da camisa devido à força de centrifugação.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (Processo nº 475453/2009-3) e ao Fundo Mackenzie de Pesquisa - MackPesquisa pelo apoio financeiro concedido por meio de projeto de pesquisa. Os autores também agradecem à Associação Brasileira do Alumínio – ABAL, à Magneti Marelli Cofap e à Metalur Ltda. pelo apoio, pela centrifuga e pelo material utilizado neste trabalho, respectivamente.

## **REFERÊNCIAS**

1. ASM HANDBOOK: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals. The Ninth Edition of Metals Handbook, v. 2, 1991.

### **CARACTERIZATION OF THE EUTECTIC AND HYPEREUTETIC Al-Si ALLOYS CENTRIFUGAL CASTED FOR AUTOMOTIVE APPLICATIONS**

#### **ABSTRACT**

In engine components such as automotive cylinder liner, there must be a high hardness on the inner wall of the liner, in order to avoid a rapid wear due to abrasion that the piston rings exert on the inner surface of the liner when the operation of engine. In this work it was investigated the alloys Al-Si eutectic and hypereutectic casted by centrifugal for cylinder liner application. Centrifugation process tends to concentrate the  $\beta$  phase of lower density (silicon) on the inner wall of the liner. The hardness profile along the thickness of the liner was determined at intervals of 1 mm. The purpose of segregating the  $\beta$  phase to the inner wall of the liner was efficient. The increase of  $\beta$  phase in the inner wall of the liner was accompanied by increase of hardness. The increase in hardness due to the  $\beta$  phase segregation was more effective in hypereutectic alloy.

Key-words: Al-Si; centrifugal casting; automotive component.