



# ANÁLISE DE FALHA DE UM SIFÃO UTILIZADO NA EXTRAÇÃO DE ALUMÍNIO LÍQUIDO<sup>1</sup>

Danilo Borges Villarino de Castro<sup>2</sup>  
Jeferson Aparecido Moreto<sup>2</sup>  
Luciana Sgarbi Rossino<sup>3</sup>  
Omar Maluf<sup>3</sup>  
Dirceu Spinelli<sup>4</sup>  
José Ricardo Tarpani<sup>4</sup>

## Resumo

O objetivo deste trabalho foi o de investigar as possíveis causas da falha ocorrida em um sifão utilizado na extração de alumínio líquido. A parede do sifão apresentou extensivo trincamento passante na direção axial, numa região de curvatura do componente. O componente é constituído de ferro fundido cinzento. O trabalho seguiu a metodologia usual empregada em análise de falhas, incluindo análise visual do componente, análise química. Os ensaios de dureza na escala Brinell e microdureza Vickers foram efetuados de acordo com as normas ASTM E-10 e ASTM E-384. Superfícies metalograficamente lixadas e polidas, correspondentes a diferentes regiões do componente fraturado foram observadas em um microscópio óptico com o intuito de identificar os microconstituintes do ferro fundido cinzento. A falha por fratura do sifão deveu-se basicamente à massiva presença do microconstituente frágil, rico em carbono, denominado cementita, que facilita a propagação de trincas nucleadas em pontos de concentração de tensão. A elevada concentração de cementita livre na região de trincamento está associada a uma maior velocidade de resfriamento durante o processo de solidificação, devido à menor espessura da parede do componente naquele local. A elevada taxa de resfriamento desenvolvida durante a etapa de solidificação da peça, no processo de fabricação por fundição, inibiu a transformação da cementita em ferrita e veios de grafita. O sifão falhou pelo mecanismo de fadiga termomecânica.

**Palavras-chave:** Sifão; Ferro fundido cinzento; Cementita; Extração de alumínio.

## FAILURE ANALYSIS IN A SIPHON USED ON THE EXTRACTION OF LIQUID ALUMINUM

### Abstract

The present work aimed to investigate the possible causes of failure occurred in a siphon used on the extraction of liquid aluminum. The wall of siphon showed an extensive cracking in the axial direction, a region of curvature of the component. The component is made of gray cast iron. The work followed the usual methodology in failure analysis including visual analysis of the component, chemical analysis, Hardness and macrohardness tests. The hardness in Brinell scale and Vickers macrohardness tests were realized according ASTM E-10 and ASTM E – 384 standards. Metallographic surfaces ground and polished, corresponding to different regions of the fractured component was observed in an optical microscope in order to identify the microconstituents of gray cast iron. The failure by fracture of the siphon was mainly due the massive presence of microconstituent fragile, rich in carbon, called cementite. The high concentration of free cementite in the region of cracking is associated with a high rate during solidification, due to lower wall thickness of the component there. The high rate developed during the solidification stage of the piece in the manufacturing process of casting, inhibited the transformation of cementite into ferrite and graphite subboundary structure. The siphon failed by thermomechanical fatigue mechanism.

**Keywords:** Siphon; Gray cast iron; Cementite; Aluminum extraction.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais – SMM/EESC/USP.

<sup>3</sup> Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais – SMM/EESC/USP.

<sup>4</sup> Professores Titular e Associado, respectivamente, do Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística (SMM) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP).



## 1 INTRODUÇÃO

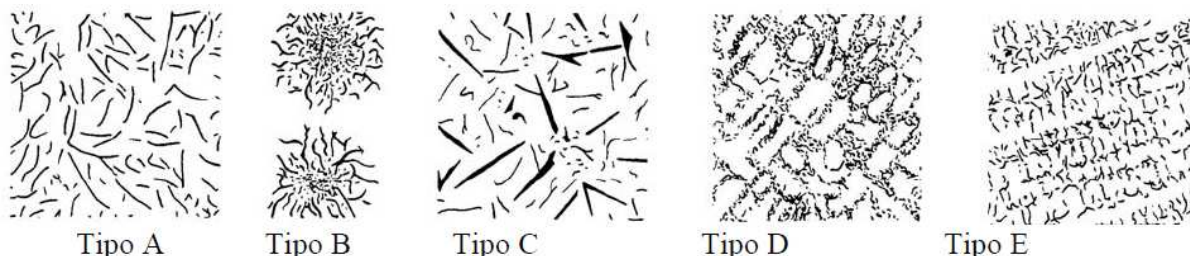
O sifão é um dispositivo utilizado para transportar um líquido de uma altura para outra mais baixa. O componente é constituído de ferro cinzento fundido.

Os ferros cinzentos fundidos são ligas que contêm ferro, carbono e silício como elementos de ligas fundamentais e se caracterizam por apresentarem reação eutética durante sua solidificação.<sup>(1)</sup> Os ferros fundidos apresentam em sua microestrutura carbono livre na forma de lamelas denominada grafita, podendo ainda apresentar carbono combinado com ferro (carboneto de ferro).

As lamelas de grafita presentes no material tornam o ferro fundido cinzento um material de excelente usinabilidade.<sup>(2,3)</sup>

A classificação da grafita é feita quanto à forma, tamanho e o tipo. No caso dos ferros fundidos cinzentos, a forma da grafita é lamelar. A Figura 1 apresenta em ampliação de 100x como as grafitas se classificam:

- Tipo A: lamelas finas e uniformes distribuídas ao acaso;
- Tipo B: conhecida como tipo roseta, sendo o centro do esqueleto formado por grafita fina e as bordas de grafita grosseira;
- Tipo C: conhecida como grafita primária, veios grandes, típica de ferros fundidos hipereutéticos;
- Tipo D: grafita fina e interdendrítica com distribuição ao acaso, típica de solidificação com elevado superesfriamento; e
- Tipo E: veios finos e interdendríticos com orientação definida, típica de ferros fundidos de baixo carbono equivalente e cuja solidificação ocorreu com elevado superesfriamento, ou com a formação de grande quantidade de dendritas de austenita próeutética.



**Figura 1.** Classificação quanto ao tipo de grafita lamelar, segundo a norma ASTM–A247-06.<sup>(4)</sup>

No plano de cisalhamento, a grafita atua como uma região para iniciação e propagação de trinca, tornando o cavaco mais quebradiço.<sup>(2,3)</sup>

Mecanicamente, os ferros fundidos cinzentos são fracos e frágeis quando submetido à tração, devido às extremidades dos flocos de grafita ser pontiagudas e servirem de ponto de concentração de tensão quando uma tensão de tração é aplicada. A resistência e ductilidade são muito maiores sob cargas de compressão. São eficientes no amortecimento de energia vibracional, em que as estruturas de bases de máquinas e equipamentos pesados são construídas destes materiais. Além do mais, possuem alta resistência ao desgaste.<sup>(5,6)</sup>

O objetivo deste trabalho foi o de investigar as possíveis causas da falha ocorrida na parte superior de um sifão utilizado na extração de alumínio líquido.

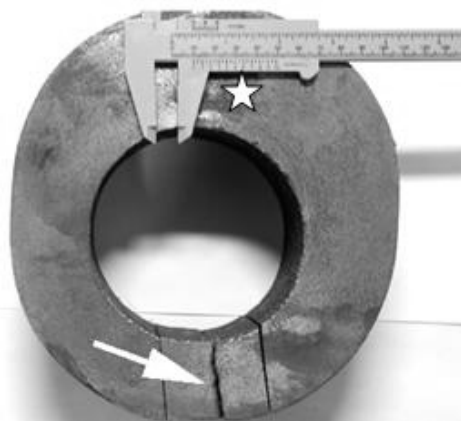
## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A parede do sifão utilizado na extração de alumínio líquido da célula eletrolítica apresentou extensivo trincamento passante na direção axial, numa região de curvatura do componente. O sifão é mostrado na Figura 1, onde a região em que a trinca se desenvolveu é indicada por **A**. Uma amostra de referência foi retirada da posição inferior do sifão, designada **B**, aonde não ocorreu trincamento, e também enviada para auxiliar na análise de falha. Este componente foi confeccionado em ferro fundido cinzento e fabricado através do processo de fundição. Não houve especificação de dureza e microestrutura finais, ou tratamento térmico posterior para o material. Somente a composição química foi especificada em projeto.

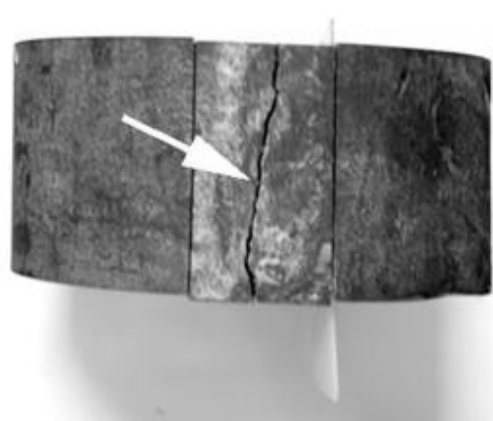


**Figura 1.** Sifonamento do alumínio líquido produzido na célula eletrolítica. **A** e **B** indicam as posições ao longo do sifão, de onde foram extraídas as amostras para a análise de falha do componente.

Na Figura 2, a amostra **A** é apresentada em detalhe. Verifica-se na Figura 2(a), que a seção transversal anular do sifão é aproximadamente circular, apresentando uma furação circular e excêntrica, gerando, portanto, uma variação de espessura da parede do componente. Observa-se que o trincamento, mostrado na Figura 2(b), desenvolve-se exatamente na região de mínima espessura da peça.



(a)



(b)

**Figura 2.** Vistas de (a) topo e (b) frontal do trincamento do sifão (**A**). A seta indica uma parte da trinca. A estrela mostra uma região em que foi medido o teor de carbono.

A seguir, serão apresentados os procedimentos realizados em uma região próxima à que desenvolveu o trincamento, na amostra **A**. Os mesmos experimentos foram reproduzidos, para fins de comparação, numa região simétrica da amostra **B**.

## 2.1 Análise Química

A análise química foi realizada em um espectrômetro de emissão óptica por centelha (ARL 3460), na temperatura de 25°C e com umidade relativa do ar de 46%.

## 2.2 Análise Metalográfica

Para a realização da análise metalográfica, foram cortadas amostras das regiões **A** e **B** do componente estudado. Estas foram embutidas em baquelite condutora e lixadas com lixas d'água com granulometria #80, 120, 220, 400, 600, 800, 1200, e 2000. Em seguida, as superfícies lixadas foram polidas em três etapas: a primeira com dióxido de cromo, a segunda com solução de alumina 0,3 µm e a última com solução de alumina 0,05 µm. Após toda a seqüência prévia de acabamento superficial, foi efetuado um ataque químico sobre cada amostra. O ataque químico foi realizado com o reagente Nital 1% com aproximadamente 30 segundos de tempo de imersão.

## 2.3 Dureza e Microdureza

Medidas de dureza Brinell, HBS 2,5/187,5, foram efetuadas segundo a norma ASTM E-10 nas amostras extraídas das regiões **A** e **B** do sifão, anteriormente ao embutimento das mesmas para análise metalográfica. Foram realizadas cinco medições para cada amostra.

Medidas de microdureza Vickers foram efetuadas segundo a norma ASTM E-384 nos principais microconstituintes do ferro fundido cinzento, em ambas as amostras metalográficas extraídas de **A** e **B**. Foram realizadas cinco medições para cada amostra.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1 Análise Química

A Tabela 1 fornece a composição química especificada em projeto para o material, assim como os resultados determinados em laboratório relativamente aos materiais retirados das regiões acima indicadas, para ambas as amostras **A** e **B**. Conclui-se que as composições químicas determinadas para o material podem ser consideradas em conformidade com a especificada em projeto.

**Tabela 1.** Composição química (% em peso).

|                     | <i>C</i> | <i>Mn</i> | <i>Si</i> | <i>P</i> | <i>S</i> | <i>Cr</i> | <i>Mo</i> |
|---------------------|----------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|
| <b>Especificado</b> | 3,3-3,8  | 0,5-0,8   | 1,4-2,0   | 0,15máx  | 0,15máx  | 0,5-0,9   | 0,2-0,4   |
| <b>A</b>            | 3,42     | 0,81      | 1,90      | 0,102    | 0,048    | 0,71      | 0,25      |
| <b>B</b>            | 3,21     | 0,55      | 1,95      | 0,096    | 0,050    | 0,56      | 0,33      |

A análise de carbono de material retirado da amostra **A**, na região de máxima espessura de parede, indicada com uma estrela na Figura 2(a), indicou um valor em torno de 3% em massa, portanto abaixo do valor determinado na posição de mínima espessura da parede, fornecido na Tabela 1. O trincamento na amostra **A** ocorreu, portanto, numa região de maior teor de carbono.

### 3.2 Dureza e Microdureza

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de dureza Brinell efetuados sobre as amostras **A** e **B** do componente estudado.

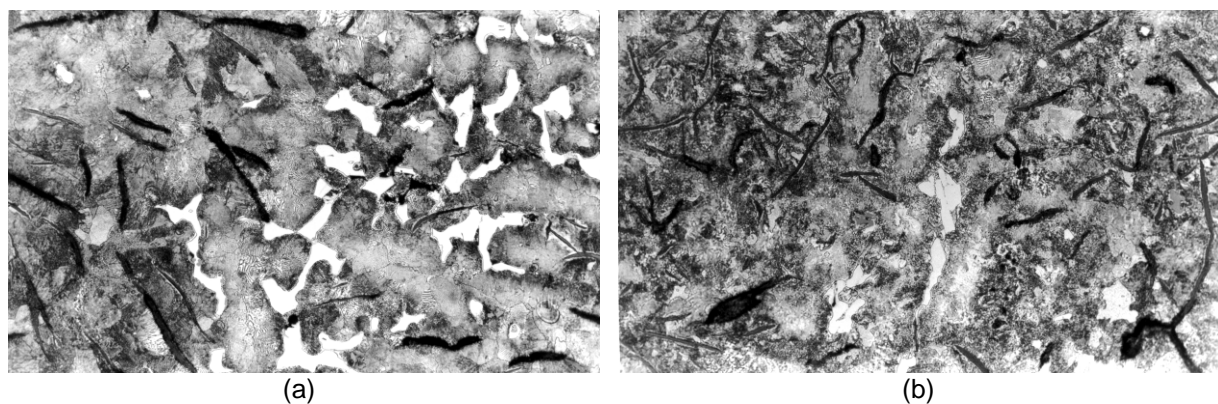
**Tabela 2.** Medidas de dureza Brinell.

| <i>Amostras</i>             | <i>A</i>    | <i>B</i>    |
|-----------------------------|-------------|-------------|
| <b>Dureza Brinell (HBS)</b> | $214 \pm 2$ | $194 \pm 2$ |

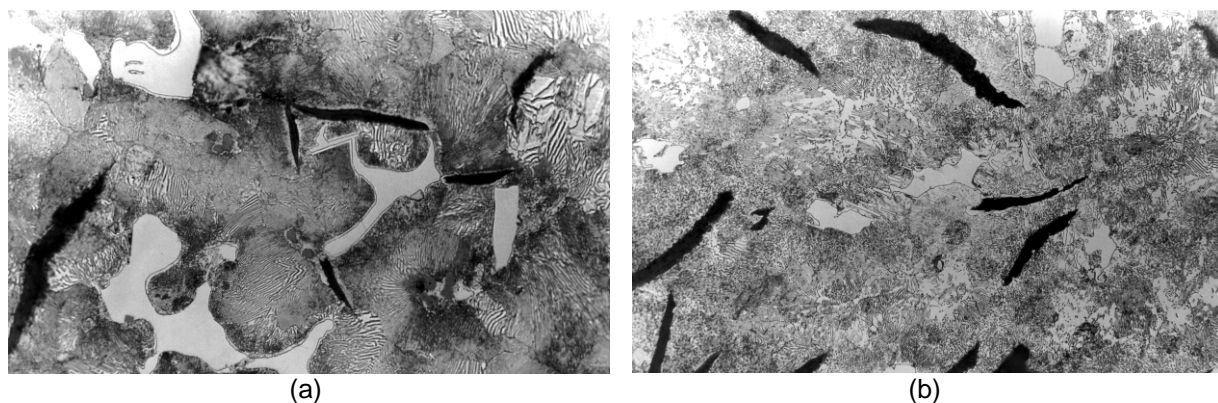
Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos por intermédio dos ensaios de microdureza de microconstituintes, efetuados sobre as áreas claras e a perlita, exibidos nas Figuras 3 e 4. A região clara se trata do microconstituente cementita, pois apresentou um valor médio de 997 HV100grf, ou 67,8 HRC, por meio de conversão para a escala de dureza Rockwell C.

**Tabela 3.** Medidas de dureza dos microconstituintes.

| <i>Microconstituintes</i>      | <i>Perlita</i> | <i>Região clara</i> |
|--------------------------------|----------------|---------------------|
| <b>Dureza Rockwell C (HRC)</b> | $33,5 \pm 0,9$ | $67,8 \pm 1,2$      |



**Figura 3.** Microestruturas das amostras (a) **A** e (b) **B**, atacadas com Nital 1%. Aumento de 150x.



**Figura 4.** Microestruturas das amostras (a) **A** e (b) **B**, atacadas com Nital 1%. Aumento de 375x.

### 3.3 Análise Metalográfica

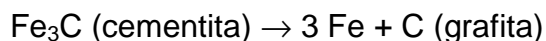
As Figuras 3 e 4 mostraram as micrografias das amostras **A** e **B**, observadas em microscopia óptica. Na Figura 3(a), referente a amostra **A**, observa-se uma microestrutura tipicamente desenvolvida em ferros fundidos cinzentos hipoeutético, onde se destaca a matriz perlítica, os veios de grafita e as ilhas de cementita livre. A natureza deste último microconstituente foi confirmada através das medidas de microdureza Vickers. Comparada à microestrutura observada na amostra **B**, ilustrada na Figura 3(b), nota-se que a amostra **A** apresenta uma quantidade superior de cementita (áreas claras), fato condizente com a maior porcentagem de carbono determinada nesta região.

Sendo a cementita um microconstituente frágil, pode-se argüir que a sua presença favorece a propagação de trincas nucleadas em regiões com concentração de tensão, tais como a que se desenvolveu na amostra **A**. Visto que o sifão é submetido a ciclos periódicos de aquecimento e resfriamento em serviço, pode-se assumir que uma trinca tenha se originado e propagado por fadiga térmica. A cementita presente em grandes quantidades na região, sem dúvida desempenhou um papel fundamental no processo de fratura do componente, já que ela exhibe limitada capacidade de se deformar plasticamente e, conseqüentemente, de acomodar as tensões termicamente induzidas no componente. Cabe destacar que, realmente, as máximas taxas de aquecimento e resfriamento, e, como conseqüência, as máximas tensões de origem térmica desenvolvem-se na posição de mínima espessura de parede, exatamente onde o trincamento foi verificado.

A Figura 4 reproduz a Figura 3, porém sob maior ampliação de imagem, permitindo a clara identificação dos microconstituintes perlita, grafita e cementita. Os veios de grafita em ambas as amostras podem ser classificados, em termos de tipo, distribuição e tamanho, como VIIA4, segundo a norma ASTM A-247.

Uma ação corretiva seria a eliminação da excentricidade do furo interno, existente nesta região do sifão, com a finalidade de evitar a variação na espessura da parede, que provoca taxas de resfriamento diferenciais durante o processo de fabricação do componente e ao longo de sua vida de operação em serviço.

Outra sugestão seria eliminar a presença de cementita livre na microestrutura, adotando-se velocidades mais lentas de resfriamento da peça, entre as temperaturas de reação eutética e eutetóide, para dar tempo de ocorrer a transformação:



Por fim, deve-se evitar desmoldar a peça em altas temperaturas para que toda a cementita oriunda da reação eutética se transforme em grafita durante o resfriamento do sifão.

## 4 CONCLUSÕES

A falha por fratura do sifão de extração de alumínio líquido deveu-se basicamente à massiva presença do microconstituente frágil, rico em carbono, denominado cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ).

A elevada concentração de cementita livre na região de trincamento está associada a uma maior velocidade de resfriamento durante o processo de solidificação, devido à menor espessura da parede do componente naquele local.

A elevada taxa de resfriamento desenvolvida durante a etapa de solidificação da peça, no processo de fabricação por fundição, inibiu a transformação da cementita em ferrita e veios de grafita.

Cabe ressaltar que, exatamente devido à menor espessura da parede do sifão na região de trincamento, o local é particularmente susceptível ao desenvolvimento de tensões cíclicas de origem termomecânica, decorrente dos ciclos de aquecimento/resfriamento tipicamente desenvolvidos no componente em condições normais de serviço, o que também contribuiu para a falha do componente pelo mecanismo de fadiga termomecânica, nucleando a trinca de fadiga que foi facilmente propagada devido à presença da cementita livre presente nesta região.

### Agradecimentos

Os autores expressam os seus agradecimentos ao Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística da EESC – USP pelo uso de seus equipamentos e instalações.

### REFERÊNCIAS

- 1 MILLS, B. On the formation mechanism of adherent layer on a cutting tool. *Wear*, n.198, pp. 192-196, 1996.
- 2 FENGLIAN, S., ZHENJIA, L., DAMING, J. Adhering wear mechanism of cemented carbide cutter in the intervallic cutting of stainless steel. *Wear*, n.214, pp. 79-82, 1998.
- 3 SOUZA, A. B., BRANCO, C.H. Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares. São Paulo/SP: Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, pp. 205, 1989.
- 4 ASTM-A247-06. Standart Test Method for Evaluation the Microstructure of Graphite in Iron Castings. *American Society for Testing and Materials*, 2006.
- 5 CALLISTER Jr, W.D., SOARES, S.M.S., MIRANDA, P.E.V. Fundamentos da ciência e engenharia de materiais. Rio de Janeiro/RJ: LTC, 2.ed, 2006.
- 6 CHIAVERINI, V. Tecnologia mecânica: materiais de construção mecânica. São Paulo/SP: McGraw-Hill, 1986.