

# DESENVOLVIMENTO DA LIGA AA4006 NA CBA, PARA FORJAMENTO A FRIO À PARTIR DE VAZAMENTO CONTINUO DE ALUMÍNIO (CASTER 3C)<sup>1</sup>

Heber Pires Otomar<sup>2</sup>  
Rogério Minatel<sup>3</sup>

## Resumo

A liga 4006 foi produzida à partir de vazamento contínuo tipo caster 3C, sendo avaliado o processo e seu desempenho após seu forjamento a frio. Esta liga e processo associadas não eram conhecidos, por este motivo a análise foi realizada, revelando as características encontradas. O processo de produção não foi o ideal para a aplicação, pois devido as características da chapas a ser conformada, houve um baixo encruamento para posterior recristalização, esta condição se torna crítica pois a estrutura final esperada não é a mais indicada para o forjamento a frio. Análises metalográficas foram empregadas para caracterizar o produto final.

**Palavras-chave:** Forjamento a frio; Caster 3C; AA4006.

## DEVELOPMENT OF ALUMINUM ALLOY AA4006 IN THE CBA, FOR COLD FORGING FROM THE CONTINUUM CASTING (CASTER 3C)

## Abstract

The 4006 alloy was produced from the continuous casting kind caster-3C, and assessed the process and its performance after its cold forging. The alloy and associated process were not known, for this reason the analysis was performed, revealing the features found. The productions process was not ideal for the application, because the characteristics of plates due to be conformed, there was a low work hardening subsequent recrystallization, this condition is criticized because the end expected structure is not suitable for the cold forging. Análises metalográficas were used to characterize the final product.

**Key words:** Cold forging; Caster 3C; AA4006

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 45º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 21 a 24 de outubro de 2008, Ipojuca - Porto de Gainhas - PE*

<sup>2</sup> *Engenheiro de Pesquisa e Desenvolvimento da CBA*

<sup>3</sup> *Engenheiro de Processos do Departamento de Laminação de Chapas da CBA*

## 1 INTRODUÇÃO

O alumínio e suas ligas são amplamente utilizados em praticamente todas as áreas da cadeia produtiva, ficando atrás apenas do aço. As razões que levam o alumínio a ser utilizado de forma tão intensa encontram-se nas propriedades específicas e a forma como estas propriedades podem ser combinadas maximizando as opções de uso.

Suas características físicas e químicas proporcionam ao alumínio ser empregado nos diversos seguimentos da cadeia produtiva, sendo este aplicado na construção civil, no armazenamento e transporte, em embalagens de alimentos na indústria aero espacial entre outros.<sup>(1)</sup>

Através de deformação do metal, por exemplo laminação a frio, sua resistência pode ser praticamente dobrada. Aumentos maiores na resistência podem ser obtidos com pequenas adições de outros metais como elementos de liga, tais como; manganês, silício, cobre, magnésio, zinco, etc. Algumas ligas podem apresentar aumento de resistência através de tratamento térmico, chegando-se a aproximadamente 700 MPa.

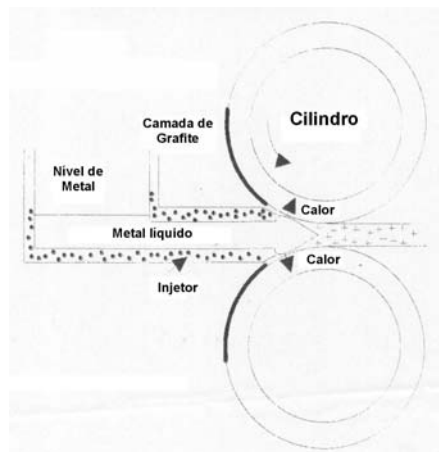
As ligas da série 4xxx tem como principal elemento de liga o Si, que na forma primária precipita usualmente como  $Fe_2Si_2Al_9$ . Ligas desta série são utilizadas principalmente em aplicações arquitetônicas e pistões forjados, muitas ligas da série 4xxx são utilizadas para brazagem e soldagem. A Liga 4006 em particular é pouco conhecida no Brasil, a sua utilização mais intensa é na Itália, de onde partiu a sua homologação na ASTM. A composição química desta liga, segundo a norma ASTM é dada na tabela 1. As propriedades mecânicas desta liga estão situadas numa faixa de dureza intermediária, com dureza média de 28HB, próximas as da liga 3003 e 3105, (28 e 29HB respectivamente) que são muito difundidas. A liga 4006, devido ao excesso de Si pode aumentar sua dureza através da precipitação de seus intermetálicos, atuando como um envelhecador desta liga, o que pode ser muito benéfico para processo onde deseja-se uma boa conformabilidade, com um posterior aumento da dureza.

Tabela 1 - Composição química da liga 4006

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Al
Especificação da liga 4006-	0,80-1,20	0,50-0,80	0,10 max	0,05 max	0,01 max	0,20 max	..	0,05 max	..	REST

A produção dos produtos planos são originados basicamente de dois tipos de produtos fundidos, sendo o vazamento direto, ou Direct Chill e o vazamento contínuo, que pode ser classificado conforme o tipo de equipamento e forma de solidificação do metal. O presente trabalho aborda a obtenção da liga 4006 através do vazamento contínuo, no caso, o tipo caster (3C).

No sistema de vazamento 3C são produzidas chapas de alumínio pela passagem do metal líquido através de dois cilindros refrigerados a água, como pode ser visualizado na Figura 1. A espessura da chapa pode variar de 2 mm a 12 mm. Dessa forma, a taxa de resfriamento imposta no material durante a solidificação é muito mais alta ( $10^2$  a  $10^3$  °C/s) do que a aplicada no processo convencional de placas Direct Chill - DC (1 °C/s).<sup>(3)</sup>



**Figura 1:** Esquema de vazamento pelo processo 3C

A elevada taxa de resfriamento permite que grande parte dos elementos de liga permaneçam em solução sólida dentro do alumínio, conforme Tabela 2.<sup>(2)</sup>

**Tabela 2.** Solubilidade (em % em peso) dos principais elementos de liga do alumínio, nos sistemas binários.

Elemento de liga	Solubilidade máxima no estado sólido	Solubilidade em temperatura mais baixa	Diferença de raio atômico (%)	Estrutura cristalina
Si	1,65 (577 °C)	0,05 (250 °C)	- 6,3	Cúbica
Fe	0,052 (655 °C)	0,001 (400 °C)	- 11,2	CCC/CFC
Mg	14,9 (451°C)	2,65 (150°C)	+ 11,9	HC

A obtenção de produtos forjados de alumínio não é de difícil execução, porém a utilização de material proveniente de vazamento contínuo não é comum, sendo por este motivo avaliada no presente trabalho.

Forjamento é o nome genérico de operações de conformação mecânica efetuadas com esforço de compressão sobre um material dúctil, de tal modo que ele tende a assumir o contorno ou perfil da ferramenta de trabalho.

Na maioria das operações de forjamento emprega-se um ferramental constituído por um par de ferramentas de superfície plana ou côncava, denominadas matrizes ou estampos.

A maioria das operações de forjamento é executada a quente; contudo, uma grande variedade de peças, tais como parafusos, pinos, porcas, engrenagens, pinhões, panelas e etc., são produzidas por forjamento a frio.

O forjamento é o mais antigo processo de conformar metais, tendo suas origens no trabalho dos ferreiros de muitos séculos antes de Cristo. A substituição do braço do ferreiro ocorreu nas primeiras etapas da Revolução Industrial. Atualmente existe um variado maquinário de forjamento, capaz de produzir peças das mais variadas formas e tamanhos, desde alfinetes, pregos, parafusos e porcas até rotores de turbinas e asas de avião.

O forjamento pode ser dividido em dois grandes grupos de operações: Forjamento em matriz aberta ou Forjamento livre e Forjamento em matriz fechada.

## 1.1 Objetivo

Pretende-se relatar as dificuldades e questionamento para o desenvolvimento de um material produzido a partir da liga 4006, que não é usual no Brasil, e por este motivo tem suas características pouco conhecidas, obtida por vazamento contínuo, para a produção de produtos forjados a frio. Avaliar as características estruturais e desempenho do produto no cliente final.

### 1.1.1 Questões do desenvolvimento

O processo de produção teve como ponto de partida a chapa a ser forjada, que foi especificada com espessura de 8,00 mm no estado recozido, tempera "O". Esta condição tornou-se crítica, pois o encruamento desejável teórico para uma completa recristalização é de 50% mínimo, porém devido a limitações de equipamento a espessura máxima de vazamento do caster 3C é de 9,50 mm, ou seja a redução máxima obtida seria de 15,8%. Somando-se ao encruamento residual obtido no processo de vazamento caster 3C, que é de aproximadamente 15%, o encruamento total disponível antes do recozimento é de ~30%.

Além do nível de encruamento, a condição microestrutural foi uma incógnita, pois a necessidade de encruamento mínimo levava a impossibilidade de uma prévia homogeneização, o que acarreta numa forte segregação de precipitados primários, que poderiam afetar ao desempenho do forjamento, levando a rupturas ou a aspectos superficiais indesejáveis ao produto final. Todas estas questões permearam o desenvolvimento desta liga para a aplicação pretendida.

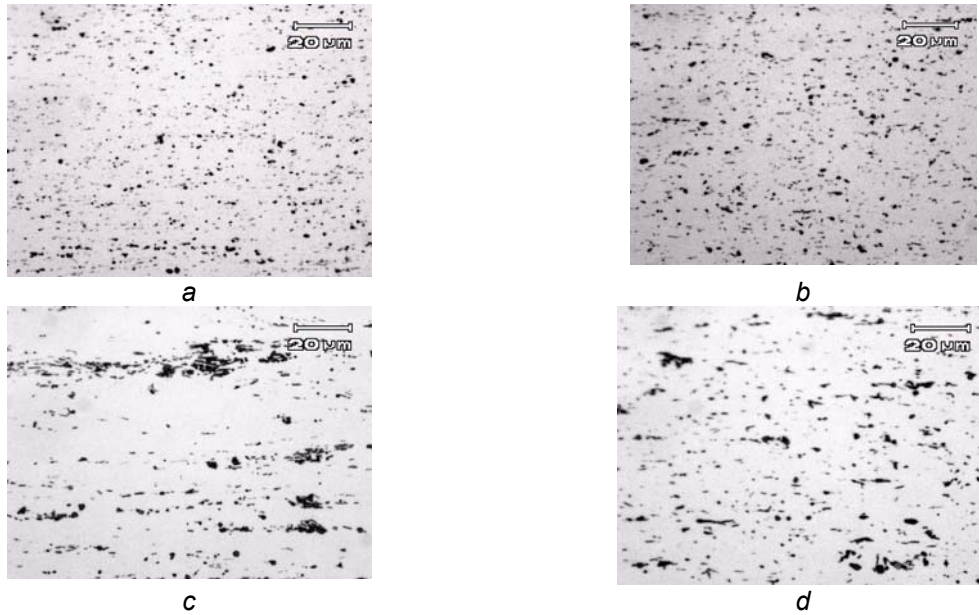
### 1.1.2 Processo de fabricação

Como o produto final foi uma chapa com 8,00 mm de espessura o processo de produção do material foi realizado conforme as etapas abaixo:

- Obtenção da bobina com 9,50 mm de espessura no processo de vazamento contínuo do tipo Caster 3C da CBA (Companhia Brasileira de Alumínio)
- Laminação a frio em laminadores reversíveis da bobinas fundida de 9,50 para 8,00mm (encruamento de laminação de 15,8%)
- Recozimento em forno estacionário com atmosfera controlada com temperatura acima da temperatura de recristalização do alumínio
- Recorte em chapas grossas
- Forjamento a Frio em prensa, com estampo fechado.

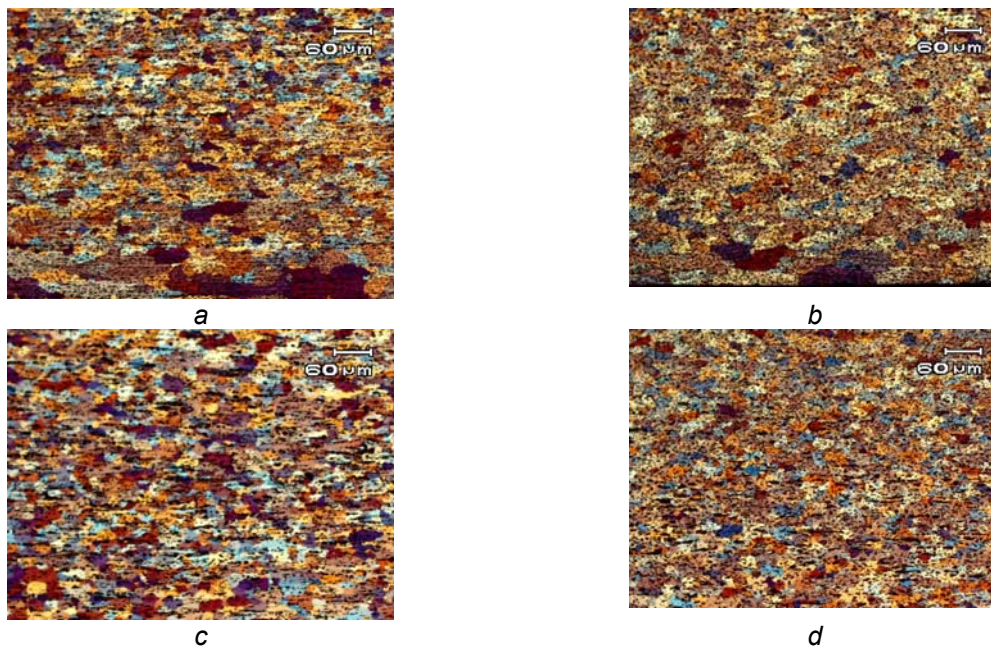
## 2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme previsto no início do desenvolvimento, a estrutura após o recozimento apresentou uma forte segregação de intermetálicos primários no centro da chapa, oriundos do vazamento caster e da não homogeneização do material, conforme Figura 2. O centro da chapa revelou uma forte segregação de precipitados primários, com a morfologia de "escrita chinesa" característica de uma não homogeneização (Figura 2 a, c), bem diferente da estrutura identificada na superfície da chapa, onde a segregação é bem menos acentuada (Figura 2 b, d).



**Figura 2** – Micrografia da chapa após o recozimento final, aumento de 500 vezes, solução de 0,5% HF, Corte longitudinal na periferia (a) e centro (c) da chapas e Corte transversal na periferia (b) e centro da chapa (d). Em software de análise de imagens, o tamanho máximo medido da segregação dos intermetálicos foi de até 210  $\mu\text{m}$ , com intermetálicos aciculares com tamanho máximo até 4  $\mu\text{m}$ , particulados com tamanhos até 0,5  $\mu\text{m}$ .

A estrutura granular revelou um tamanho de grão relativamente pequeno (Figura 3), o que confere um aspecto superficial liso após o forjamento, não apresentando o efeito “casca de laranja”, encontrado em materiais com estrutura granular grosseira. Essa condição foi muito favorável a utilização da liga, pois o efeito do baixo encruamento seguido de um tratamento térmico de recristalização leva, em muitos casos, ao aumento do tamanho de grão. Este efeito está associado à energia de falha de empilhamento (EFE) que favorece a recuperação, em detrimento a recristalização.



**Figura 3** – Estrutura granular da chapa após recozimento, Corte longitudinal na periferia (a) e centro (c) da chapas e Corte transversal na periferia (b) e centro da chapa (d). O tamanho é dos grãos foi de 20 $\mu\text{m}$  (ASTM 8)

O forjamento a frio do material foi realizado numa matriz fechada, com pressão de trabalho acima de 4.000t, esta força de prensagem foi necessária para o total escoamento do alumínio durante sua deformação plástica, dentro da matriz de forjamento. O aspecto superficial e desempenho da deformação foram adequados, apresentando um produto com características apropriadas para aplicação. O escoamento do material na matriz se deu de forma homogênea, as paredes do produto forjado não apresentaram stricção localizada, de forma que não foi evidenciado o escoamento preferencial ou a ruptura do material. Como o processo de forjamento foi realizado no cliente final, os detalhes do processo e características do produto não puderam ser relatados.

### 3 CONCLUSÃO

A Liga 4006 demonstrou uma excelente opção para o forjamento a frio, revelando uma estrutura granular fina, mesmo em condições favoráveis ao crescimento de grão. O Si, que é o principal elemento de liga, além de fornecer as características mecânicas, com dureza acima das ligas da série 1xxx, propiciou uma excelente estabilidade da estrutura cristalina, atuando como retardador do crescimento de grão. A conformabilidade apresentou uma baixa orientação preferencial, pois na matriz de forjamento o escoamento se deu de forma homogênea.

### REFERÊNCIAS

- 1 KAMMER, C; Alumínio – material com um grande potencial inovativo: sua obtenção características, aplicações e novos desenvolvimentos. 1° SIMPÓSIO INTERNACIONAL DA VDI SOBRE A TECNOLOGIA DO ALUMINIO, São Paulo, 2004. Anais... São Paulo: VDI. 2003.p. 15-57
- 2 TOTTEN, G.E.; MACKENZIE, D.S. **Handbook of Aluminum**. V. 2 Alloy Production and Materials Manufacturing. Nova Yorque, Marcel Dekker. 2003
- 3 J. STRID: *Twin Roll Casting, a Technological over-view*. Hydro Aluminum Metallurgical R&D-centre, Sunndalsora, Norway

### BIBLIOGRAFIA

- 1 J. E. HATCH: *Alumium – Properties and Physical Metallurgy*. American Society for Metals. Metals Park, Ohio.
- 2 L. Bäckerud, E. Król and J. Tamminem: Solidification Characteristics of Aluminium Alloys. Skan Aluminium, Volume 1: Wrought Alloys, Stockholm, Sweden.
- 3 Manual Pechiney.