

## **CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA DE LIGAS DILUÍDAS DO SISTEMA AI-SI APÓS LAMINAÇÃO A FRIO**

Emerson David Cavalcante Santos – Universidade Federal do Pará, Belém-Pará – Brazil. E-mail: [esantos@ufpa.br](mailto:esantos@ufpa.br)

Dorian Remigi – Universidade Federal do Pará, Belém-Pará – Brazil. E-mail: [engdorian@bol.com.br](mailto:engdorian@bol.com.br)

André Oliveira Kishi – Universidade Federal do Pará, Belém-Pará – Brazil. E-mail: [kishi@ufpa.br](mailto:kishi@ufpa.br)

Raimunda Figueiredo da Silva Maia – Universidade Federal do Pará, Belém-Pará – Brazil. E-mail: [raimaia@ufpa.br](mailto:raimaia@ufpa.br)

José Maria do Vale Quaresma – Universidade Federal do Pará, Belém-Pará – Brazil. E-mail: [jmdovale@ufpa.br](mailto:jmdovale@ufpa.br)

### **RESUMO**

*O alumínio é hoje um dos materiais mais utilizados na indústria, seja na forma primária ou ligado. As características primárias do alumínio puro revelam baixas propriedades mecânicas e por isso são adicionados elementos de liga que tendem a ficar dispersos na matriz ou solúveis na mesma, melhorando essas características. Partindo desse princípio, o objetivo do presente estudo é avaliar a evolução da microestrutura de ligas Al-Si, em função do teor de Si, após laminação a frio. Para tanto, as ligas foram fundidas variando-se o percentual de Si em 0,3, 0,5, 0,7, 0,9 e 1,1% com refinador de grão e 0,4; 0,6; 0,9; 1,0 e 1,3%, sem refinador de grão, obtendo-se, assim, um lingote de cada liga binária. Retirou-se dos lingotes obtidos corpos de prova para o ensaio de laminação a frio, com espessura de 4 mm, nos quais foram feitas diferentes reduções em um laminador duo elétrico de laboratório. Em seguida, fez-se o ensaio metalográfico nos corpos de prova deformados a frio, a fim de se analisar a microestrutura do material nas diferentes reduções dadas. Com isso, espera-se após a laminação, relacionar a microestrutura da liga com a taxa de deformação do material.*

*Palavras-chave:* *Liga Al-Si, laminação, caracterização metalográfica.*

## 1. INTRODUÇÃO

O alumínio puro tem baixas propriedades mecânicas (resistência à tração, alongamento, etc.), necessitando então a adição de elementos de liga para a melhoria dessas características.

Existem duas maneiras de se aumentar a resistência do Al: adicionando elementos de liga, os quais estarão em solução ou na forma de precipitados e deformar o material frio. Nesse caso define-se como ligas endurecíveis por deformação ou encruamento; e adicionando elementos de liga na matriz e fazê-los precipitar na forma de partículas finas. Nesse caso define-se como ligas endurecíveis por precipitação.

As ligas de alumínio são bastante utilizadas em diversas aplicações industriais, graças a sua elevada resistência e solidez. O cobre, o magnésio e o silício são alguns dos elementos que mais se prestam a formar liga com o alumínio.

As ligas do sistema Al-Si, também consideradas não tratáveis termicamente, são muito mais utilizadas como ligas de fundição (série 4XXX), ou seja, para a fabricação de peças fundidas, como por exemplo pistões para motores de automóveis e aviões, mas também encontram algumas aplicações como produtos trabalhados, como metais de adição para soldagem (caso da liga 4043), embora também possam ser usados para a fabricação de pistões forjados e em algumas aplicações arquitetônicas (Gomes et al, 1987). A Figura 1 mostra o detalhe do diagrama binário Al-Si, destacando a faixa de solubilidade do silício no alumínio.

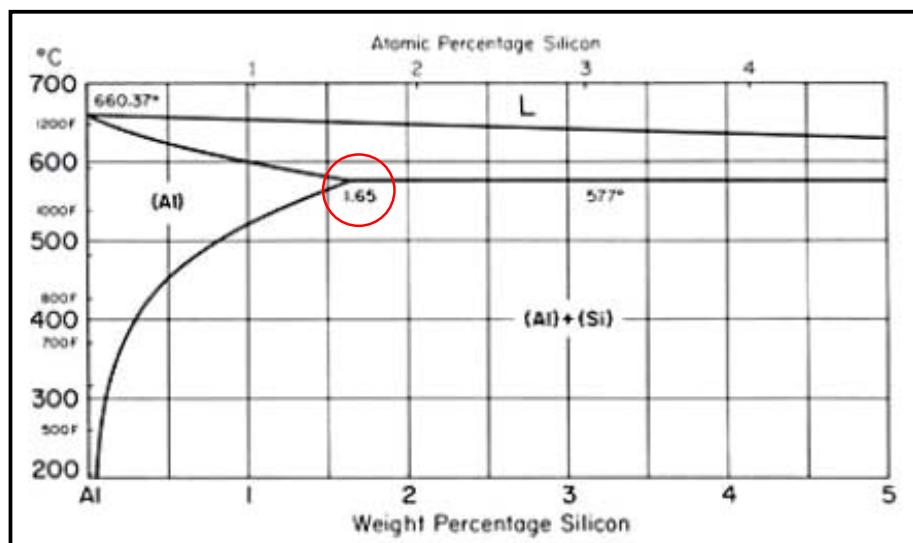


Figura 1. Detalhe do diagrama binário Al-Si. O círculo mostra a máxima solubilidade do silício no alumínio.

De acordo com Yeung e Lee (1998), a liga AA4006, contendo 0,86% de Si, é a mais distinta das ligas do sistema Al-Si utilizadas em fundições. Com esse teor de Si a liga é tratável termicamente e endurecível por precipitação. Por causa de sua boa resistência à corrosão e resistência mecânica moderada, combinada com boa formabilidade, essa liga é bastante utilizada para a fabricação de latas na indústria de bebidas.

Um conceito que se aplicou bastante neste trabalho foi o conceito da trabalhabilidade (conformabilidade). A trabalhabilidade é normalmente definida como a quantidade de deformação a que um material pode ser submetido sem trincar, ou alcançar condições indesejáveis, a uma dada temperatura e taxa de deformação. O termo “condições indesejáveis” pode ser entendido tanto como relacionado à formação de trincas ou fraturas, como também à formação de superfícies mal polidas, rugosidade ou falta de preenchimento do molde. Melhorar a trabalhabilidade significa, melhorar a capacidade de processar esses materiais, tal como a velocidade da extrusão ou laminação, e então melhorar a produtividade (Gavgali e Aksakal, 1998).

Com o intuito de estudar o efeito da adição de silício na matriz de alumínio, o presente trabalho tem por objetivos avaliar a evolução da microestrutura de ligas Al-Si, em função do teor de Si, após laminação a frio.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

As ligas, com composições químicas dentro da faixa das ligas 6101 e 6201, foram fundidas em mufla e vazadas em uma lingoteira metálica. O vazamento, com injeção de argônio, foi realizado a 700°C, com o molde a uma temperatura de 130°C. Foram fundidas também duas ligas adicionais, com teores de Si acima do limite superior dessas composições, para verificar se esse acréscimo traria melhores respostas mecânicas à liga. A Figura 2 mostra o forno utilizado na fundição e o momento da injeção do argônio no cadinho, antes do vazamento.



Figura 2. (a) Foto do forno com o cadinho à temperatura de 800°C; (b) foto mostrando a injeção de argônio no metal líquido e o termopar medindo a temperatura de vazamento da liga.

Para diminuir a porosidade do material solidificado e evitar a formação de inclusões de hidrogênio e oxigênio no interior do lingote, utiliza-se argônio para expulsar os gases retidos no banho de metal líquido. Além desse efeito, o gás inerte, agitando o banho, auxilia a homogeneização da liga. A Figura 2(b) mostra o tubo de argônio, que injeta o gás no cadinho a uma pressão de 2kgf/cm<sup>2</sup> durante 40s.

As temperaturas do molde e de vazamento foram monitoradas por termopares conectados em um coletor de dados ALMEMO, como mostra a Figura 3.

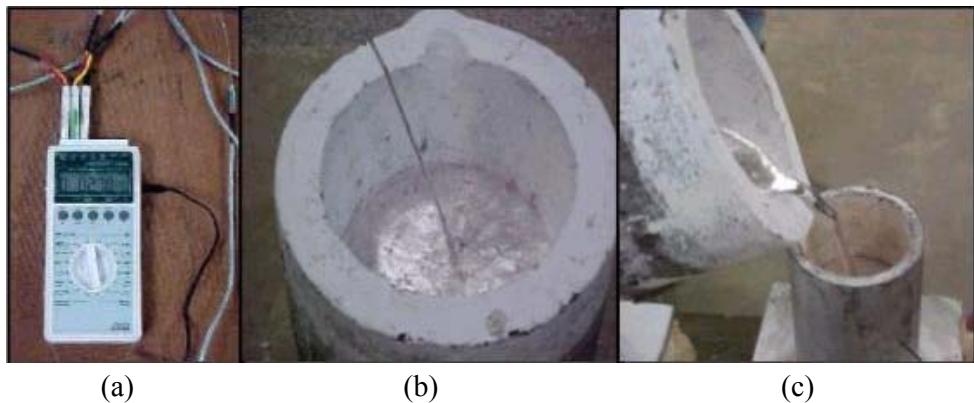


Figura 3. (a) Aquisitor de dados ALMEMO com os termopares conectados; (b) cadinho com o termopar no metal líquido antes do vazamento; (c) foto mostrando vazamento da liga na lingoteira.

Variou-se o percentual de Si em 0,4; 0,6; 0,9; 1,0 e 1,3%, sem refinador de grão e de 0,3; 0,5; 0,7; 0,9 e 1,1%, com refinador de grão, obtendo-se, assim, um lingote para cada liga binária, em um total de 10 ligas.

A tabela 1 mostra as composições químicas das ligas fundidas em laboratório e a tabela 2 mostra as composições nominais das ligas 6101 e 6201.

Tabela 1. Composições químicas das ligas fundidas.

Ligas com Refinador de Grão					Ligas sem Refinador de Grão				
Si	Fe	Mg	Ti	Al	Si	Fe	Mg	Ti	Al
0,291	0,148	0,0031	0,0083	99,52	0,409	0,213	0,0005	0,0086	99,33
0,530	0,160	0,0047	0,0088	99,23	0,604	0,220	0,0005	0,0080	99,13
0,732	0,160	0,0048	0,0071	99,05	0,874	0,236	0,0006	0,0090	98,84
0,890	0,185	0,0049	0,0096	99,56	0,970	0,236	0,0006	0,0070	98,72
1,096	0,176	0,0050	0,0097	98,56	1,32	0,225	0,0007	0,0087	98,41

Tabela 2. Composições químicas nominais admissíveis, em %, das ligas 6101 e 6201. Fonte: ASM Metals Handbook.

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	B
<b>6101</b>	0,3 a 0,7	0,5	0,1	0,03	0,35 a 0,8	0,03	0,1	0,06
<b>6201</b>	0,5 a 0,95	0,5	0,1	0,03	0,6 a 0,9	0,03	0,1	0,06

Objetivando estudar a trabalhabilidade das ligas que foram fundidas, retirou-se dos lingotes obtidos corpos de prova circulares para o ensaio de laminação a frio, com espessura de 4 mm, nos quais foram feitas diferentes reduções em um laminador duo elétrico, em quatro diferentes graus de deformação (13%, 28%, 47% e 69%).

Após a laminação, fez-se ensaio metalográfico, sendo que as imagens foram obtidas via analisador de imagem, mostrado na Figura 4.



Figura 4. Analisador de imagem modelo Leica.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No exame metalográfico foi observado a evolução da microestrutura da liga em função das reduções da deformação a frio e da composição química. Na Figura 5, temos as micrografias das ligas refinadas.

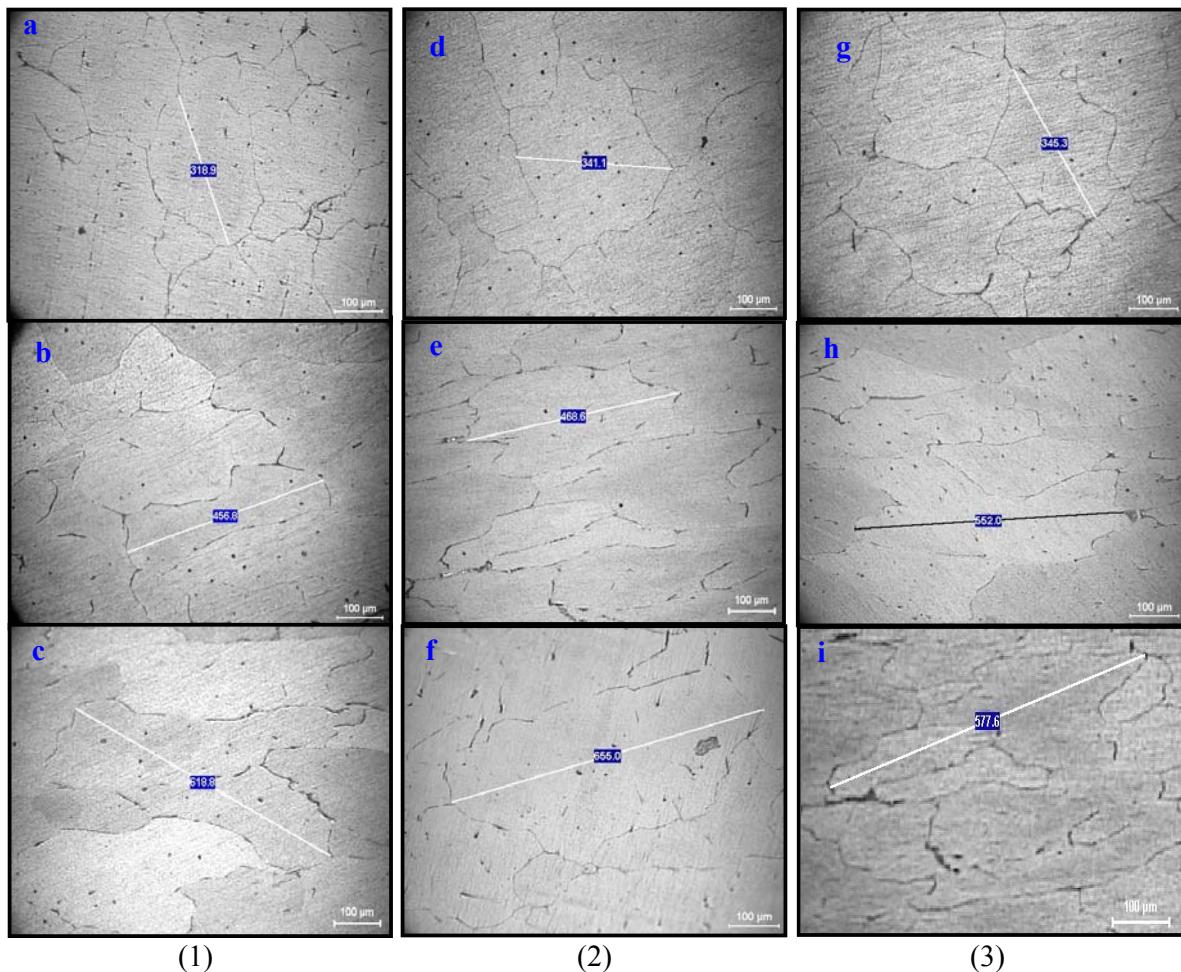


Figura 5. Micrografias obtidas via analisador de imagem de ligas com refinador de grão, com 200x de ampliação. (1): liga Al-0,7%Si; (2) liga Al-0,9%Si; (3) liga Al-1,0%Si: (a), (d) e (g) como fundida; (b), (e) e (h) com 27% de redução; (c), (f) e (i) com 69% de redução.

A Figura 5 mostra as microestruturas das ligas com refinador de grão, antes e após a deformação a frio. Fazendo-se uma comparação entre as imagens, percebe-se claramente o efeito das reduções aplicadas na etapa de laminação, pois as amostras como fundidas (Figuras 5a, 5d e 5g) apresentam tamanhos de grão, em média, de 316,6; 396,4 e 345,3μm, respectivamente. Ao chegarem à última redução ( $\epsilon = 69\%$ ), os grãos alongaram para 618,8; 744,2 e 577,6μm (Figuras 4.2c, 4.2f e 4.2i) sem trincar, o que comprova a boa trabalhabilidade da liga refinada.

Na Figura 6 temos as microestruturas das ligas sem refinador de grão, antes e após a deformação a frio.

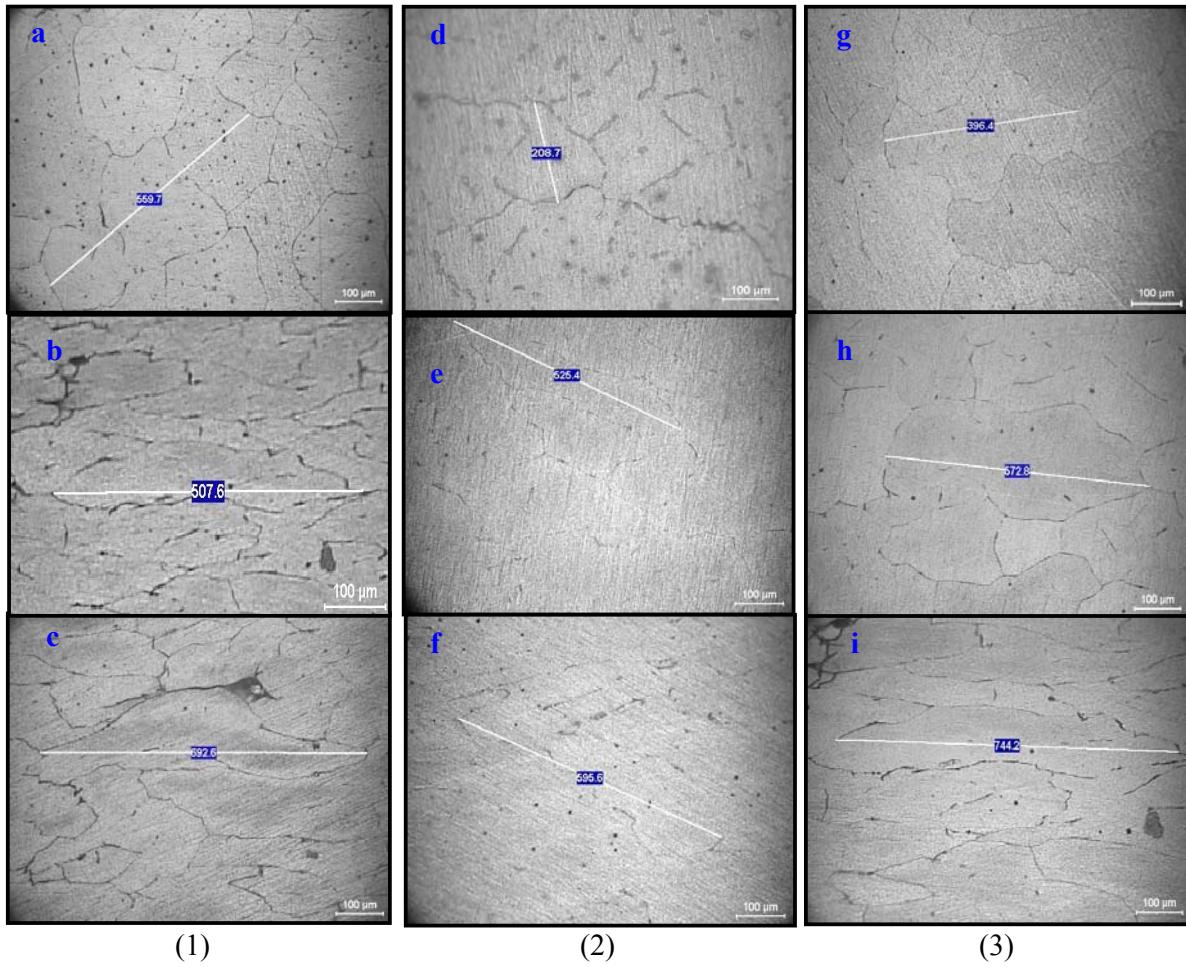


Figura 6. Micrografias de ligas sem refinador de grão, com 200x de ampliação. Em (1): liga Al-0,7%Si; (2) Al-0,9%Si; (3) Al-1,0%Si: (a), (d) e (h) como fundida; (b), (e) e (i) com 27% de redução; (c), (f) e (j) com 69% de redução.

#### 4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos no presente trabalho, chegou-se às seguintes conclusões:

1. A injeção de argônio, além de homogeneizar o banho de metal líquido, contribuiu para a diminuição de porosidades e de outras imperfeições na estrutura do material solidificado;
2. Empregando-se ou não o refinador de grão, não se percebeu a formação de trinca superficial após cada uma das reduções aplicadas. Este fato deve-se, provavelmente, às composições químicas muito diluídas das ligas obtidas, mesmo considerando-se uma liga com 1,3% de Si, composição próxima a da máxima solubilidade do silício no alumínio;
3. Observando a evolução da microestrutura, conclui-se que a mesma se altera com o aumento do teor de Si na liga.
4. Nas microestruturas observadas, os grãos ficaram mais alongados, à medida que se aumentou o teor de Si na liga e com as taxas de deformação dadas (13%, 28%, 47% e 69%).

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASM HANDBOOK. "Metallography and Microstructures". Vol. 9; 1999.  
 Gavgali, M. e Aksakal, B.: "Effects of various homogenisation treatments on the hot workability of ingot aluminium alloy AA2014". Materials Science and Engineering A254, p. 189–199, 1998.

Yeung, C.F. e Lee, W.B.: "The effect of homogenization on the recrystallization behaviour of AA4006 Al-Si alloy". Journal of Materials Processing Technology 82, p. 102–106, 1998.

## METALLOGRAPHIC CHARACTERIZATION OF DILUTED ALLOYS OF THE SYSTEM Al-Si AFTER COLD ROLLING

**Emerson David Cavalcante Santos<sup>(1)</sup> – Universidade Federal do Pará, Belém-Pará – Brazil.**  
E-mail: [esantos@ufpa.br](mailto:esantos@ufpa.br)

**Dorian Remigi<sup>(2)</sup> – Universidade Federal do Pará, Belém-Pará – Brazil. E-mail:**  
[engdorian@bol.com.br](mailto:engdorian@bol.com.br)

**André Oliveira Kishi – Universidade Federal do Pará, Belém-Pará – Brazil. E-mail:**  
[kishi@ufpa.br](mailto:kishi@ufpa.br)

**Raimunda Figueiredo da Silva Maia – Universidade Federal do Pará, Belém-Pará – Brazil. E-mail:**  
[raimaia@ufpa.br](mailto:raimaia@ufpa.br)

**José Maria do Vale Quaresma – Universidade Federal do Pará, Belém-Pará – Brazil. E-mail:**  
[jmdovale@ufpa.br](mailto:jmdovale@ufpa.br)

### **ABSTRACT**

The aluminum is today one of the materials more used in the industry, be in the form primary or linked. The primary characteristics of the pure aluminum reveal low mechanical properties and for that they are added alloy elements that tend to be dispersed in the matrix or soluble in the same, improving those characteristics. The objective of the present study is to evaluate the evolution of the microstructure of Al-Si alloys, in function of the Si content, after cold rolling. For so much, the alloys were melted being varied the percentile of Si in 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 and 1.1% with grain refiner and 0.4, 0.6, 0.9, 1.0 and 1.3%, without grain refiner, being obtained, an ingot of each binary alloy. Left of the ingots obtained specimens for the cold rolling tests, with thickness of 4 mm, which were made different reductions in a rolling mill electric duet of laboratory. It was made the metallographic exam in the specimens deformed to cold, in order to analyze the microstructure of the material in the different given reductions. With that, it is waited after the rolling, to relate the microstructure of the alloy with the deformation rate of the material.

*Keywords:* Al-Si alloy, rolling, metallographic characterization.