

# MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UMA LIGA Al-Si-Cu CONFORMADA POR SPRAY <sup>1</sup>

*Cleyton Fernandes Ferrarini*<sup>2</sup>

*Marcos Gonçalves de Souza*<sup>3</sup>

*Mauricio Mhirdai Peres*<sup>4</sup>

*Gustavo Signoreti Pereira*<sup>5</sup>

*Claudemiro Bolfarini*<sup>4</sup>

## Resumo

O presente trabalho teve por objetivo a caracterização microestrutural e a determinação das propriedades mecânicas da liga Al-Si-Cu 319 conformada por spray. O processamento foi realizado através da fusão da liga em forno de indução, da atomização com nitrogênio e da deposição do spray sobre um substrato de cobre. A conformação por spray resultou em depósitos com uma microestrutura refinada e homogênea sendo composta basicamente por grãos equiaxiais de Al- $\alpha$ , partículas de silício, Al<sub>2</sub>Cu e agulhas da fase  $\beta$ -AlFeSi. A porosidade dos depósitos foi minimizada através de processo de extrusão, o qual, também, proporcionou o refinamento de grão através recristalização da matriz. Ensaio de tração a temperatura ambiente, em amostras da liga conformada por spray, apresentaram um aumento muito significativo no valor médio de alongamento, quando comparado aos valores apresentados na literatura para a liga 319 no estado bruto de fusão. Este resultado foi atribuído ao refinamento do tamanho de grão, à forma particulada do silício e à redução do comprimento das agulhas da fase  $\beta$ -AlFeSi presentes no material conformado por spray.

**Palavras-chave:** Conformação por spray; Liga de alumínio; Microestrutura; Propriedades mecânicas

## MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF SPRAY DEPOSITED Al-Si-Cu ALLOY

### Abstract

The aims of this work were the microstructural and tensile properties characterization of the hypoeutectic spray formed Al-Si-Cu 319 alloy. The alloy was melted by induction furnace, gas atomized with nitrogen and deposited onto a copper substrate. Spray formed material showed fine and homogeneous microstructure, composed by equiaxial  $\alpha$ -Al matrix, silicon particles, Al<sub>2</sub>Cu and  $\beta$ -AlFeSi intermetallics phases. The extrusion promoted grain refinement by a partial recrystallization process and strong decrease of the porosity. Room temperature tensile tests of the spray formed Al-Si-Cu alloy showed increased of elongation when compared with the value observed for conventionally cast counterparts. This result can be ascribed to the refined grain size, silicon particles morphology and smaller  $\beta$ -AlFeSi phases presented in spray formed deposits.

**Key words:** Spray forming; Aluminium alloy; Microstructure; Tensile properties.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>2</sup> *Prof.Dr. da Universidade Federal de São Carlos - Departamento de Engenharia de Produção- Campus Sorocaba*

<sup>3</sup> *Engenheiro da Mahle Metal Leve S/A*

<sup>4</sup> *Prof.Dr. da Universidade Federal de São Carlos - Departamento de Engenharia de Materiais*

<sup>5</sup> *MSc. em Ciência e Eng. de Materiais(UFSCar) e Engenheiro da Caterpillar Brasil Ltda.*

# 1 INTRODUÇÃO

As ligas Al-Si formam o sistema de ligas de alumínio mais utilizado em processos de fundição e suas estruturas brutas de fusão são constituídas por grãos grosseiros, altos níveis de segregação, silício eutético em forma de grandes placas e compostos intermetálicos fragilizantes.<sup>(1)</sup> Estas características microestruturais limitam severamente o campo de aplicação destas ligas, restringindo, por exemplo, suas utilizações em componentes estruturais, devido às propriedades mecânicas inadequadas.<sup>(2)</sup>

Para alterar as propriedades destas ligas existem alguns tratamentos tradicionais que são utilizados em rotas de fundição. O refinamento de grão é obtido com a adição de inoculantes a base de titânio ao banho, o que provoca a nucleação heterogênea da fase alumínio- $\alpha$ . O nível de segregação é amenizado com tratamentos térmicos de homogeneização e quanto à forma do silício, é comumente utilizado o tratamento de modificação que, através da adição de elementos como sódio e estrôncio, promove a transformação das placas de silício em formas fibrosas e, conseqüentemente, o aumento de ductilidade.

Por outro lado, quanto às fases intermetálicas indesejáveis nas ligas Al-Si comerciais, estudos sobre a influência da taxa de resfriamento e da adição de elementos de liga na formação das mesmas, não apresentam um consenso quanto aos procedimentos adequados para amenizar seus efeitos deletérios. Dentre estas fases, a fase  $Al_5FeSi$ , conhecida como  $\beta$ -AlFeSi, é a mais preocupante devido à sua forma de ripa ou de agulha que age como concentrador de tensão, reduzindo drasticamente a ductilidade destas ligas.<sup>(3)</sup>

Alternativamente à fundição e seus tratamentos complementares, os processos que envolvem solidificação rápida são capazes de produzir um considerável refinamento e homogeneidade microestrutural em um grande número de ligas, melhorando, significativamente, suas propriedades.<sup>(4)</sup> Além disso, propiciam o aumento da solubilidade sólida de impurezas na matriz e a formação de fases intermetálicas metaestáveis.

Entre estes processos alternativos, a conformação por spray se destaca por produzir, em uma única etapa de processamento, a partir de uma carga líquida, produtos semi-acabados caracterizados por matrizes homogêneas de finos grãos equiaxiais com distribuição uniforme de segundas fases e livres de macrosegregação.<sup>(5,6)</sup> Este processo consiste, basicamente, na atomização por gás inerte de um fluxo de metal líquido em gotas de vários tamanhos, as quais são impulsionadas pelo gás em direção a um substrato onde se consolidam e solidificam formando um depósito coerente.

Apesar de existirem várias pesquisas sobre conformação por spray de ligas de alumínio, a maioria das composições investigadas se limita às ligas para trabalho mecânico e às ligas de Al-Si hipereutéticas, como o caso da liga A390 utilizada na produção de camisas de cilindros.<sup>(7)</sup>

Assim, o objetivo deste trabalho foi realizar a caracterização microestrutural e a determinação de propriedades mecânicas da liga Al-Si-Cu 319 conformada por spray.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A liga de alumínio investigada neste trabalho foi adquirida na forma de carcaças de caixas de transmissão automotiva A composição química do material

obtida por espectroscopia de absorção atômica (EAA), é mostrada na tabela 1. Tal composição se enquadra na faixa de composição designada pela “Aluminium Association” para liga 319.

**Tabela 1** - Composição química da liga de alumínio

(Porcentagem em massa)								
Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Ti	Outros
Bal.	6,76	0,95	3,97	0,29	0,03	0,16	0,13	0,50

Após operações de corte e limpeza, 3,5 kg de sucata foram fundidos em forno de indução e atomizados utilizando-se nitrogênio. A deposição do spray foi realizada sobre um substrato plano de cobre posicionado abaixo do bocal atomizador. Detalhes do equipamento utilizado são descritos na literatura.<sup>(8)</sup>

Utilizou-se 0,5 MPa de pressão de atomização, 715°C de temperatura de superaquecimento e 325 mm distantes entre o bocal atomizador e o substrato. A fim de se evitar a oxidação do material atomizado, a câmara de atomização foi purgada com argônio.

Amostras foram retiradas da região central dos depósitos para análise microestrutural e usinagem de cilindros para posterior extrusão.

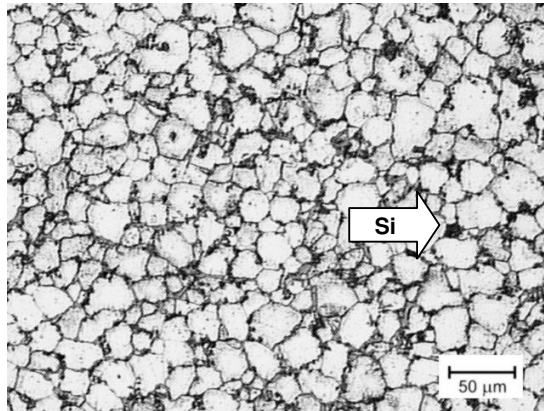
A caracterização microestrutural das amostras dos depósitos e da carcaça da caixa de transmissão foi efetuada através de microscopia ótica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) auxiliada por espectroscopia de energia dispersiva de raios-x (EDS). Os tamanhos médios de grão e de partículas da liga depositada foram medidos utilizando-se o método dos interceptos lineares, como descrito pela norma ASTM E112-84. A porosidade das amostras foi determinada por picnometria de hélio.

O equipamento empregado para extrusão foi uma prensa EMIC com interface para aquisição de dados, controlador do forno Fly-Ever FE-50RP e limite de carga de 60 toneladas. Utilizou-se temperatura de extrusão de 350°C, velocidade do travessão de 14 mm/min e uma matriz com redução de 5:1 em área.

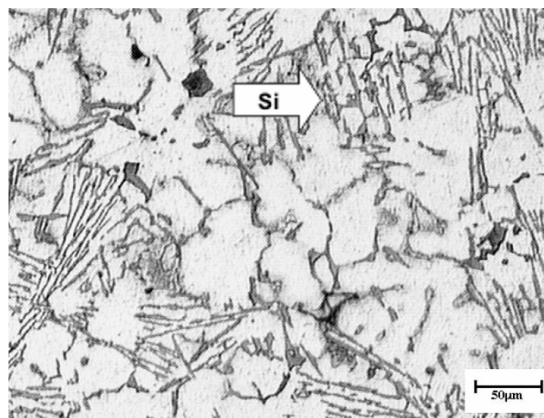
Os corpos de prova utilizados nos ensaios de tração, foram usinados a partir do material extrudado de acordo com a norma ASTM E8-93, e os ensaios realizados a temperatura ambiente em equipamento Instron.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 mostra a microestrutura do depósito conformado por spray, documentada por microscopia ótica. Nota-se que há diferenças significativas em relação à microestrutura da mesma liga fundida que constituía a sucata automotiva (Figura 2). Primeiramente, é possível reconhecer a matriz de Al- $\alpha$  composta por grãos equiaxiais e uma distribuição uniforme de partículas entre os mesmos. O tamanho médio de grão da matriz foi de 29  $\mu\text{m}$  enquanto que o das partículas de silício, identificadas através de EDS, foi de 11  $\mu\text{m}$ . Por outro lado, a amostra fundida apresenta dendritas de Al- $\alpha$  e silício eutético em forma de placas.



**Figura 1.** Microestrutura da liga depositada por spray.



**Figura 2.** Microestrutura da liga fundida.

A homogeneidade estrutural quanto à morfologia e tamanho de grão foi observada constantemente em amostras retiradas de diferentes regiões dos depósitos e isto evidencia segundo Cantor,<sup>(9)</sup> a ocorrência de boa relação entre a extração de calor e a taxa de deposição desenvolvida durante o processo de conformação por spray.

Quanto à morfologia equiaxial apresentada pelos grãos de alumínio- $\alpha$  dos depósitos pode-se dizer que é resultado do crescimento de fragmentos de fases sólidas durante a deposição. Sabe-se que durante este estágio da conformação por spray, gotas sólidas, semi-sólidas e líquidas atingem a superfície do depósito, deformando e fraturando fases solidificadas durante a atomização ou presentes na superfície do depósito, o que origina uma agitação mecânica em quantidade de fragmentos de fases solidificadas na camada superficial do mesmo. No caso do alumínio- $\alpha$ , esta agitação resulta na formação equiaxial como no caso de ligas reofundidas.

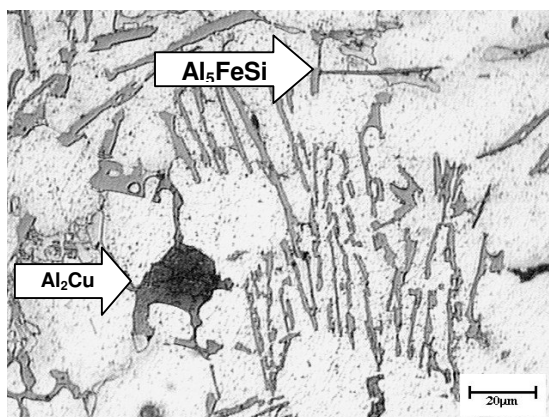
Diferentemente da morfologia de placas encontrada nas ligas Al-Si hipoeutéticas fundidas (Figura 2), o silício obtido com a conformação por spray, apresenta-se em forma de partículas isoladas distribuídas de forma homogênea, como pode ser observado na Figura 1.

A alteração morfológica do silício vem a confirmar o caráter complexo do processo de solidificação que ocorre na conformação por spray, o que dificulta sua interpretação por teorias clássicas da solidificação, uma vez que envolve

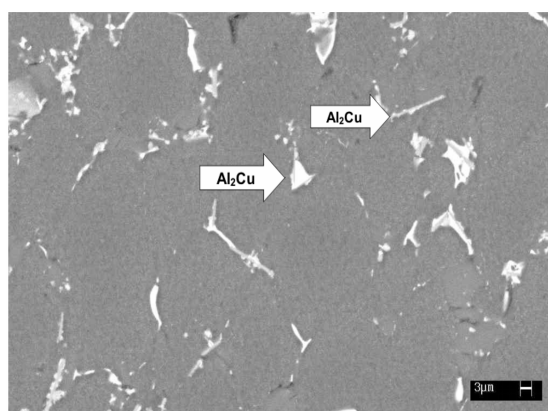
solidificação rápida na etapa de atomização e solidificação a partir do estado semi-sólido na deposição.

A maior parte da fase sólida na superfície do depósito durante a conformação por spray é composta por fragmentos da fase alumínio- $\alpha$ , uma vez que esta é a fase primária da liga hipoeutética. Portanto, durante o crescimento desta fase, o líquido na superfície do depósito se enriquece de soluto e atinge uma composição próxima a eutética. Porém, simultaneamente ao crescimento do silício eutético ocorre a intensa agitação mecânica, o que causa sua fragmentação e impede o crescimento em forma de placa. O resultado final é a presença de partículas de silício com morfologia irregular, exibindo coalescimento e tendência ao arredondamento, o que é muito distinto ao crescimento do eutético lamelar onde o silício cresce junto à fase alumínio- $\alpha$  e resulta na forma de placas.

Quanto às fases intermetálicas, na liga fundida foi observada a fase  $\beta$ -AlFeSi na forma de agulhas e  $\text{Al}_2\text{Cu}$  sob formas irregulares típicas das ligas no estado bruto de fusão (Figura 3). Estas mesmas fases foram identificadas na liga depositada por spray através de MEV com o auxílio de análise por EDS. Nota-se na Figura 4 o tamanho muito reduzido destas fases em comparação com o encontrado na liga fundida.



**Figura 3.** Microestrutura da liga fundida com destaque para fases intermetálicas.



**Figura 4.** Microestrutura da liga depositada por spray com destaque para fases intermetálicas.

Acredita-se que os comprimentos reduzidos da fase  $\beta$ -AlFeSi encontrados nos depósitos são resultado da alta taxa de resfriamento imposta pela atomização uma

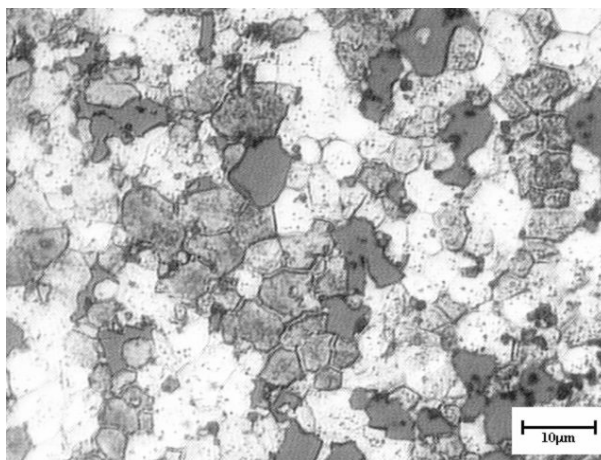
vez que esta fase foi observada em gotas sólidas do *overspray*. Este resultado sobre a redução do tamanho da fase  $\beta$ -AlFeSi devido ao aumento da taxa de resfriamento está de acordo com o trabalho de Samuel, Samuel e Doty<sup>(10)</sup> onde foi investigada a solidificação da liga de alumínio 319 em coquilhas em forma de cunha.

Outra observação a ser feita com relação à fase  $\beta$ -AlFeSi, é que se trata de uma fase muito frágil e assim, parte das agulhas podem ter tido seus comprimentos reduzidos durante a deposição a partir de fraturas ocasionadas pelos impactos de gotas na superfície do depósito durante a deposição, como no caso das partículas de silício.

Além de ter proporcionado a redução da porosidade dos depósitos como desejado, a extrusão resultou em modificações microestruturais muito significativas. A Figura 5 apresenta micrografias de um mesmo depósito da liga 380 na condição posterior à extrusão.

O processo de extrusão, realizado em amostras dos depósitos da liga depositada, reduziu significativamente a porosidade das mesmas, passando de do valor médio de 4,2% quando depositadas a 0,33% após o processamento secundário.

Como pode ser observada na Figura 5, a extrusão proporcionou a recristalização parcial da matriz de alumínio- $\alpha$ . Apesar de o alumínio possuir alta energia de falha de empilhamento e por isso ser esperado uma recuperação dinâmica durante o processo de extrusão,<sup>(11)</sup> acredita-se que a recristalização ocorrida esteja relacionada à influência dos elementos de liga e das partículas presentes na matriz de alumínio.



**Figura 5.** Microestrutura da liga depositada por spray e extrudada.

A redução do tamanho de grão dos depósitos extrudados não pode ser apropriadamente quantificada por não ter ocorrido de forma completa, porém, foi realizada uma estimativa durante as observações e documentações por microscopia eletrônica de varredura (MEV) obtendo-se medidas inferiores a 10  $\mu$ m para os novos grãos, ou seja, aproximadamente 1/3 do tamanho médio de grão pertencente aos depósitos anteriormente à extrusão.

Quanto às propriedades obtidas nos ensaios de tração e apresentadas na Tabela 2, ressalta-se o resultado obtido para o alongamento que foi muito superior ao valor médio de 2,0% encontrado na literatura<sup>(12)</sup> para a liga 319 no estado bruto de fusão.

**Tabela 2.** Propriedades mecânicas da liga Al-Si-Cu depositada por spray e extrudada

Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento (%)
126,61	248,45	12,26

Esta considerável diferença está associada ao fato de que a conformação por spray reduziu drasticamente o potencial de concentração de tensão na microestrutura da liga, uma vez que o silício apresentou-se em forma particulada ao invés de placas e houve uma considerável redução na razão de aspecto da fase  $\beta$ -AlFeSi.

#### 4 CONCLUSÕES

A conformação por spray da liga de alumínio Al-Si-Cu proporcionou microestruturas mais refinadas que as obtidas por processo de fundição. As ligas depositadas apresentaram matriz de alumínio composta por grãos equiaxiais, silício particulado e fases intermetálicas  $Al_2Cu$  e  $\beta$ -AlFeSi.

O refinamento microestrutural do material depositado possivelmente ocorreu devido à forte incidência de fases sólidas sobre a superfície semi-sólida do depósito durante a deposição. Estas fases, além de serem sítios efetivos para nucleação, causaram uma agitação mecânica capaz de alterar a morfologia e reduzir o tamanho das fases presentes na superfície do depósito.

Tais resultados são animadores quanto à possibilidade da conformação por spray se tornar uma rota alternativa para amenizar o efeito prejudicial das impurezas encontradas em ligas de alumínio secundárias e possibilitar a ampliação do campo de aplicações destas ligas.

#### REFERÊNCIAS

- 1 ANAND, S.; SRIVATSAN, T. S., WU, Y.; LAVERNIA, E. J. Processing, microstructure and fracture behaviour of a spray atomized and deposited aluminium-silicon alloy. *Journal of Material Science*, v.32, p. 2835-48, 1997.
- 2 FATAHALLA, N., HAFIZ, M., ABDULKHALEK, M. Effect of microstructure on the mechanical properties and fracture of commercial hypoeutectic Al-Si alloy modified with Na, Sb and Sr. *Journal of Material Science*, v. 34, p. 3555, 1999.
- 3 SAMUEL, A. M., SAMUEL, F.H., DOTY, H. W. Observations on the formation of  $\beta$ -AlFeSi phase in 319 type AlSi alloys. *Journal of Materials Science*, v. 31, p.5529-39, 1996.
- 4 UZUN, O., KARAASLAN, T. and KESKIN, M. Production and structure of rapidified Al-Si alloys. *Turkish Journal of Physics*, v. 25, n. 5, p.455-66, 2001.
- 5 GRANT, P. S. Spray forming. *Progress In Materials Science*, v.39, n. 4, p.497-545, 1995.
- 6 LEATHAN, A. G., OGILVY, A. J. W., CHESNEY P. F., METELMANN, O., Production of advanced materials by means of the Osprey Process, *Proceedings of 1988 International Powder Metallurgy Conference, Orlando (USA)*, (1988), 475-488.
- 7 LEATHAM, A. Spray Forming: Alloys, products, and markets. *JOM*, v. 51,1999.
- 8 FERRARINI, C.F. Microestrutura e propriedades mecânicas de ligas Al-Si hipoeutéticas conformadas por spray. 2005. 109p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, 2005.
- 9 CANTOR, B. Microstructure development during rapid solidification. In: 22 Riso International Symposium on Materials Science: science of metastable and nanocrystalline alloys, p.483-93, 2001.

- 10 SAMUEL, A. M., SAMUEL, F.H., DOTY, H. W. Observations on the formation of  $\beta$ -AlFeSi phase in 319 type AlSi alloys. Journal of Materials Science, v. 31, p.5529-39, 1996.
- 11 SHEPPARD, T., ZAID, M.A., TUTCHER, M.G., PARSON,N,C. Dynamic recrystallisation in aluminium alloys. Microstructural Control in Aluminium Alloys: deformation, recovery and recrystallization, NewYork: The Metallurgical Society-TMS, 1985.
- 12 ROOY, E.L.; Introduction to Aluminum and Aluminum Alloys & Aluminum Foundry Products. In: AMERICAN SOCIETY FOR METALS, Metals Handbook, 19<sup>th</sup> ed. Ohio, 1988 v. 9.