

ELABORAÇÃO, CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E USINABILIDADE DO COMPÓSITO Al-5,0%Si-1,0%Cu / SiC_p DUPLAMENTE REOFUNDIDO.

Rafael Vasconcelos de Alencar, rafael_vasconcelos_alencar@hotmail.com¹

Tiago Leite Rolim, tlr@ufpe.br¹

Yogendra Prasad Yadava, yadava@ufpe.br¹

Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira, ras@ufpe.br¹

¹Universidade Federal de Pernambuco, Av. Acadêmico Hélio Ramos s/n, Cidade Universitária, CEP.: 50740-530, Recife – PE.

Resumo: O compósito Al-5,0%Si-1,0%Cu/SiC_p reforçados com 10% de partículas de carbeto de silício (SiC_p), foi elaborado por reofundição com dupla fusão, caracterizado microestruturalmente e usinado com a ferramenta de diamante policristalino. A liga mãe foi elaborada pelo processo de fundição convencional num forno à gás, num cadinho de grafita. Depois de fundida e homogeneizada (temperatura estimada de 900°C), a liga foi retirada do forno para resfriamento natural ao “ar livre”, no próprio cadinho, até o estado semi-sólido, dentro do intervalo de solidificação (620-580°C). Nesta condição, a liga foi refundida a uma temperatura inferior a 800°C e retirada do forno para resfriamento natural sob agitação mecânica. Ao atingir o intervalo de solidificação a liga reforçada foi vazada num molde metálico pré-aquecido 600°C e, depois de solidificado, resfriado bruscamente, em água corrente. Durante todo o processo, a temperatura foi monitorada por um termopar do tipo K. Após a solidificação foram retiradas amostras de diferentes partes do lingote bruto para caracterização microestrutural. As análises microestruturais revelaram um material sem defeitos de fundição com uma distribuição uniforme das partículas. Ensaios de usinabilidade foram feitos nestes lingotes cilíndricos utilizando-se insertos de nitreto de titânio e de diamante policristalino. A usinagem feita com a ferramenta de diamante policristalino é capaz de cisalhar as partículas de SiC_p enquanto que quando feita com o nitreto de titânio as partículas são arrancadas, comprometendo o acabamento superficial. Os resultados mostraram a viabilidade do método de incorporação que produz uma boa molhabilidade do reforço pela matriz, sem formação do carbeto de alumínio (Al₄C₃) na interface, possibilitando a fabricação de peças e acessórios automotivos por usinagem.

Palavras-chave: Compósito Al/SiC_p, Reforço Cerâmico, Dupla-Fundição, Usinabilidade, Rugosidade.

1. INTRODUÇÃO

Os Compósitos de Matriz Metálica (CMM) são constituídos por uma liga ou metal como elemento principal (matriz), e de outros elementos incorporados ou produzidos in situ na matriz, que usualmente servem como reforço. Os materiais compósitos podem ser reforçados com materiais de natureza diferente da matriz; dependendo da aplicação e das propriedades que se deseja obter. Para as ligas leves (Al e Ti) buscam-se elementos leves e mais resistentes, normalmente de natureza cerâmica, para assegurar o baixo peso específico e elevar significativamente a resistência.

Os compósitos metálicos de matriz de ligas de alumínio (Al) têm tido um grande destaque. Suas aplicações vão desde acessórios para carro (motores e peças) e equipamentos marítimos (válvulas, agitadores e ciclones) até próteses. A dispersão uniforme do reforço e a boa molhabilidade das partículas pela matriz são requisitos importantes para o controle das propriedades mecânicas nos materiais compósitos. A boa interação entre matriz e reforço pode ser garantida pela criação de uma interface que possa adequar a rigidez do reforço com a ductilidade da matriz. No entanto, os compósitos de matriz metálica reforçados com partículas cerâmicas, mais precisamente por partículas de carbeto de silício (SiC_p) têm sido elaborados por processos que tem por base a metalurgia do pó⁽¹⁾, onde matriz e reforço são misturados previamente, antes da compactação. Estes processos podem apresentar dificuldades de elaboração relativas à baixa dispersão do reforço, além do alto custo. A elaboração de material compósito pela combinação dos dois processos “*Stirring cast e rheocasting*”, com controle de temperatura para incorporação do reforço, surge como uma alternativa de baixíssimo custo e justifica-se pela alta qualidade do produto final, que foi testado em componentes automotivos, com bons resultados⁽²⁾.

Durante este estudo, foram fabricados materiais compósitos de matriz metálica Al-5,0Si-1,0Cu/SiC, com dupla fusão e resfriamento sob agitação que puderam ser utilizados como elemento estrutural de equipamentos da indústria automobilística, onde são requeridos baixo peso específico, alta resistência mecânica e resistência ao desgaste.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Elaboração

Os elementos constituintes da liga foram pesados em balança semi-analítica para uma liga metálica de 800 gramas de massa, na proporção nominal da liga: Al-5,0%Si-1,0%Cu. O alumínio (Al) com teor de pureza de 99,9% na forma de blocos e de folhas finas, junto com o cobre (Cu) com teor de pureza de 99,9% na forma de limalha, foram fundidos juntamente com o silício (Si) com o teor de pureza de 99,6% na forma de grãos em um forno à gás, utilizando-se um cadinho de grafita. Depois de fundida e homogeneizada, a uma temperatura estimada de 900°C, a liga foi retirada do forno para resfriamento natural (ao ar livre).



Figura (1) – Forno a gás.

Ao atingir uma temperatura inferior à 800°C, o carvão de silício (SiC) com granulometria P-220, numa proporção de 10% da massa da liga, foi incorporado à liga. Com o carvão incorporado, iniciou-se a agitação mecânica, num agitador mecanizado com variação contínua de velocidade. O processo de agitação prosseguiu durante o resfriamento natural até que a temperatura da liga incorporada com o carvão de silício atingisse 620-590°C, temperatura dentro do intervalo de solidificação (630-577°C). Nesta condição, o cadinho junto com a liga incorporada foi levado novamente ao forno para novo aquecimento até 800°C. Em seguida foi feito um resfriamento natural, sob agitação mecânica, até uma temperatura dentro do intervalo de solidificação (620-590°C), onde logo depois toda massa semi-sólida foi vazada numa lingoteira metálica sob vibração mecânica, pré-aquecida a 600°C, aproximadamente, garantindo o completo preenchimento do lingote metálico, pela liga reforçada. Depois de completamente solidificado o lingote foi resfriado bruscamente em água corrente.

2.2 Caracterização Microestrutural

Após a solidificação foi retirada uma amostra do lingote bruto para caracterização deste estado. As amostras para análise foram preparadas por metalografia convencional (fig. 2) com corte, embutimento, lixamento (220, 400, 600, 1000 mesh) e polimento em pasta diamantada de 1 µm. A caracterização microestrutural foi feita em microscopia ótica e microscopia de varredura.

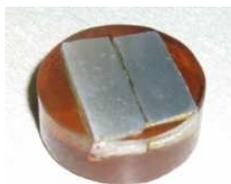


Figura (2) – Amostra embutida em resina acrílica.

2.3 Usinabilidade

Para se avaliar a usinabilidade deste material compósito, foi fundido um lingote cilíndrico (fig. 3) nas mesmas condições reológicas anteriormente descritas que, depois usinado em torno mecânico convencional (ajuste dimensional) ficou com comprimento 120 mm e diâmetro de 40 mm, aproximadamente.



Figura (3) – Lingote cilíndrico pré-usinado.

O ensaio de usinabilidade foi realizado em torno CNC (Comando Numérico Computadorizado) da marca ROMI, modelo Centur 30 D (fig. 4), no laboratório de usinagem do CTG da UFPE, onde na superfície da peça cilíndrica foi realizada uma operação de torneamento cilíndrico externa.



Figura (4) – Torno CNC.

Inicialmente, a peça foi usinada ao longo de todo seu comprimento, com a ferramenta de metal duro do tipo P-20 (fig. 5-a) com cobertura de carbeto de titânio. Nesta operação, foram usados a velocidade de corte de 356 milímetros por minuto, avanço de 0,02 milímetros por revolução e profundidade de corte de 0,2 milímetros.



Figura (5) – a) Ferramenta metal duro; b-) Ferramenta de diamante Policristalino.

Para possibilitar uma análise comparativa quanto ao acabamento (rugosidade), a peça foi usinada em parte de seu comprimento, com a ferramenta de diamante policristalino (fig. 5-b), em apenas uma parte de seu comprimento (fig. 6), mantendo-se os mesmos parâmetros de usinagem.

2.4 Rugosidade

A peça cilíndrica foi usinada com duas ferramentas em dois lugares distintos para podermos comparar as rugosidades obtidas (Fig.6). A análise de rugosidade foi feita num Rugosímetro da marca MITUTOYO, da série SJ – 400, do Departamento de Engenharia de Minas (DEEM), no Laboratório de Tratamento Mineral da UFPE. A análise de rugosidade foi realizada a partir de três parâmetros de rugosidade: rugosidade máxima (R_y), rugosidade média aritmética e rugosidade média quadrática. O curso de avaliação (cut off) selecionado foi o de 0,8 milímetros, conforme sugerido pela norma ISO/JIS. O rugosímetro nos dá a média de cada parâmetro por percurso, e foram tomadas cinco médias de cada parâmetro. A partir dessas cinco médias foram gerados três gráficos para cada parâmetro, onde foram colocados num mesmo gráfico os resultados obtidos pelas duas ferramentas, para posterior comparação.

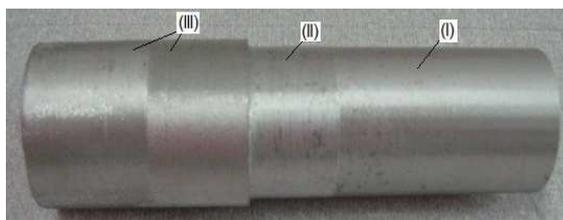


Figura (6) – Regiões usinadas com diferentes ferramentas: (I) diamante policristalino, (II) metal duro e (III) Região de fixação à placa.

3. RESULTADOS

3.1 Microscopia óptica

A análise microestrutural realizada por microscopia óptica no material reofundido, mostrou uma matriz livre de defeitos de fundição, sem porosidade e uma boa dispersão das partículas de reforço na matriz. Na figura 7, vê-se que as partículas de reforço concentram-se mais nos contornos de grãos que no interior. Apesar da baixa velocidade de agitação mecânica (400 rpm, máxima), o reforço (SiC_p) se dispersou por toda a matriz, evitando-se a aglomeração destas. Nesta escala de observação, o resfriamento controlado de uma liga eutética, vazada numa temperatura do intervalo de solidificação em lingoteira metálica pré-aquecida, foi suficiente para garantir a ausência de partículas do reforço aglomeradas e de elementos constituintes, micro e macrosegregados.

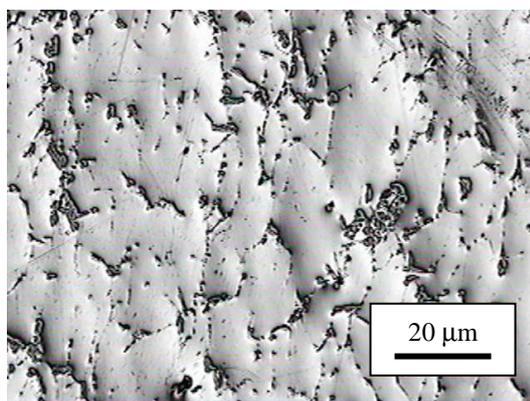


Figura (7) – Microestrutura do material reofundido.

3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

Depois de usinados com as duas diferentes ferramentas, diamante e metal duro, as superfícies foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura. Os resultados mostraram que a dupla fundição melhora a molhabilidade ou abraçamento matriz/partícula, resultando numa melhora na resistência ao desgaste do material. Resultados semelhantes foram obtidos por Urena *et al* (2004) com partículas de SiC oxidadas. Em nosso caso, é provável que a dupla fundição sob agitação mecânica da liga também oxidou a superficialmente as partículas incorporadas, melhorando a molhabilidade. Observa-se na figura 8 que a ferramenta de Diamante Policristalino é capaz de cisalhar algumas partículas de SiC (partes brancas na fig. 8), enquanto que com a ferramenta de metal duro as partículas de carbeto de silício são arrancadas conforme sugere a figura (9).

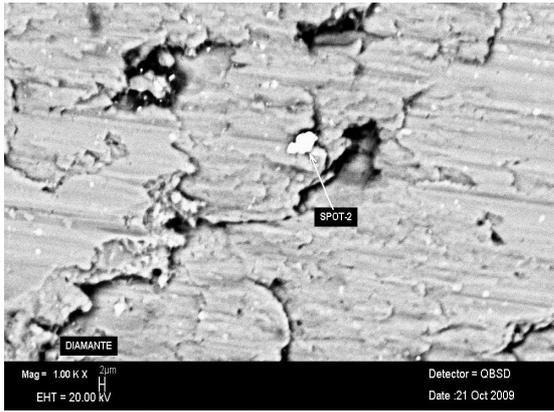


Figura (8) – MEV Diamante Policristalino.

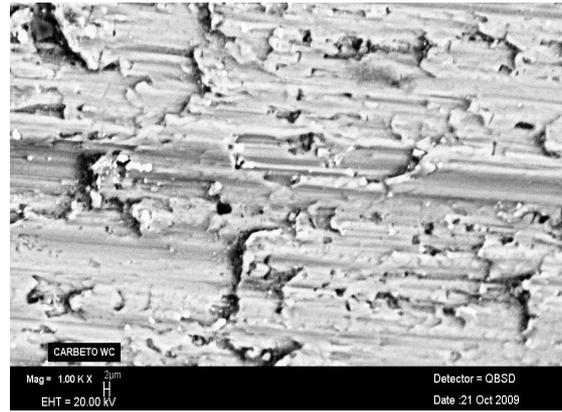


Figura (9) – MEV Metal Duro.

3.3 Rugosidade

As medições de rugosidade foram feitas nas superfícies usinadas com ferramentas de diamante policristalino e metal duro. Os resultados apresentados nas figuras 10-a, 10-b e 10-c mostram os valores da rugosidade máxima (R_y), da rugosidade média (R_a) e da rugosidade média quadrática (R_q), respectivamente. A rugosidade máxima produzida pela ferramenta de diamante policristalino (D_p) oscila em torno do valor de $20\ \mu\text{m}$, enquanto que a produzida pela ferramenta de metal duro (M_d) oscila em torno do valor de $23\ \mu\text{m}$ (fig. 10-a). Comportamento semelhante foi obtido quando se mediu a rugosidade média. A ferramenta de diamante (D_p) produziu uma rugosidade média variando entre $3,5$ e $4,0\ \mu\text{m}$ e a ferramenta de metal duro produziu a rugosidade (R_a) variando entre $4,0$ e $4,5\ \mu\text{m}$ (fig. 10-b). Para a rugosidade média quadrática observaram-se valores em torno de $4,5\ \mu\text{m}$ produzidos com a ferramenta de diamante (D_p) e valores em torno de $5,0$ - $5,5\ \mu\text{m}$ (fig. 10-c) produzidos com a ferramenta de metal duro (D_p). Estes resultados mostram que qualquer que seja o parâmetro de rugosidade medido, a parte usinada com a ferramenta de diamante policristalino (D_p) apresenta valores menores que a parte usinada com a ferramenta de Metal Duro (M_d). Estes resultados justificam-se pelo fato da primeira ferramenta (D_p) ser capaz de cisalhar as partículas SiC enquanto a segunda as arranca e estas atuam como microferramentas de corte, aumentando a rugosidade, conforme evidenciado pelas pequenas diferenças microestruturais mostradas na figura 8 (ferramenta D_p) em relação à figura 9 (ferramenta M_d).

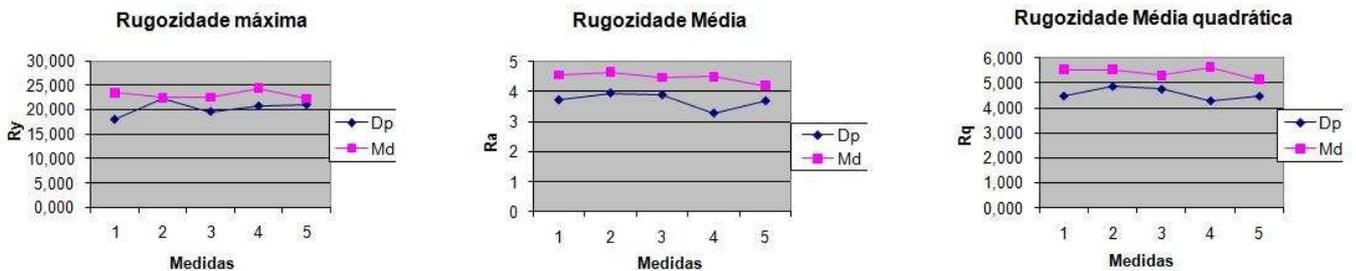


Figura (10) – Parâmetros de rugosidade.

4. CONCLUSÕES

A dupla-fundição melhorou a molhabilidade das partículas pela matriz e este resultado foi atribuído a uma provável oxidação superficial sofrida pelas partículas do reforço durante a agitação mecânica.

È possível usar-se materiais compósitos do tipo Al-5,0Si1,0Cu/SiC utilizando-se ferramentas de metal duro ou diamante policristalino, dependendo do acabamento superficial desejado.

A ferramenta de metal duro, com dureza da mesma ordem de grandeza das partículas de carbeto de silício, não é capaz de cisalhar e sim arranca-las, e estas quando arrancadas atuam como microferramentas de corte, comprometendo o acabamento.

A ferramenta de diamante policristalino, com dureza maior que as partículas de carbeto de silício, é capaz de cisalhá-las, melhorando o acabamento superficial.

A rugosidade da superfície acabada com a ferramenta de diamante policristalino é menor do que a ferramenta acabada com a ferramenta de metal duro.

5. AGRADECIMENTOS

Na condição de bolsista, agradeço ao PIBIC/CNPq, a instituição de ensino UFPE, aos professores Ricardo Sanguinetti e a Thiago Rolim, aos profissionais que trabalham na oficina de Engenharia Mecânica Orlando e Ivson, eles que me auxiliaram nesse trabalho e principalmente a minha esposa e familiares.

6. REFERÊNCIAS

- Clyne, T. W. ; Withers, P.J., 1997, “An Introduction to Metal Matrix Composites”, Cambridge University Press, Cambridge.
- Santos E. J. ; Rolim T. L. ; Gama J. L. L. ; Yadava Y. P. ; Ferreira R. A. S. , 2008, “Fabricação de Componentes Automotivos a Partir de Materiais Compósitos com Matriz Metálica (Al) Reforçada com Partículas Cerâmicas (SiC_p)” Em apresentação no Cbecimat 2008.
- Santana, G. H.; S. Ferreira R. A.,2006, “Síntese e Caracterização Microestrutural do Compósito Al-5,0Si-1,0Cu / Al₂O₃ Reforçado In-Situ por Decomposição de Al₂(SO₄)₃ ”, Anais do CONEM - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2006.
- Phase Diagrams;” Metals Handbook ” ASTM 8th, 1992.
- Urena, A., Martinez, E. E., Rodrigo, P., Gil, L. “Oxidation Treatments for SiC Particles, Composites Science and Technology” .Vol. 64, Issue 12,p 1843-1854, 2004.
- Gomes, S. B. , “ Elaboração e Caracterização do compósito Al-5,0Si-1,0Cu/ SiC Produzido por Reofundição “, Dissertação de Mestrado apresentada na Universidade de Pernambuco, 80 p., 2006.
- Silva N. G. , “Desenvolvimento do Compósito Al-5,0Si-1,0Cu/Al₂O₃ Caracterização Microestrutural e Trabalhabilidade”, Dissertação de Mestrado apresentado na Universidade Federal de Pernambuco, 78p. 2005.
- Griffith, P. W., Wisbey, A., Wood, M. J., Partridge, P. G., Nicholson, E. D., Ashfold, M. N. R., 1998. “ Microstructure and Tensile Properties of Continuous Diamond Fibre Reinforced Titanium Alloy”, Diamond and Related Materials,Vol. 7, p. 957-961.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores deste trabalho são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

SYNTHESIS, MICROSTRUCTURE CHARACTERIZATION AND MACHINABILITY OF the Al-5,0%Si-1,0%Cu / SiC_p COMPOSITE PRODUCED BY DOUBLE MELTING.

Rafael Vasconcelos de Alencar, rafael_vasconcelos_alencar@hotmail.com¹

Tiago Leite Rolim, tlr@ufpe.br¹

Yogendra Prasad Yadava, yadava@ufpe.br¹

Ricardo Artur Sanguinette Ferreira, ras@ufpe.br¹

¹Universidade Federal de Pernambuco, Av. Acadêmico Hélio Ramos s/n, Cidade Universitária, CEP.: 50740-530 ,
Recife – PE.

Abstract.: The Al-5, 0% Si-1, 0% Cu /SiC composite reinforced with 10% of particles of silicon carbide was prepared by rheocasting with double fusion. In this study the microstructure was characterized and machinability was carried out with the tools of titanium nitride and polycrystalline diamond. The matrix alloy was prepared by conventional casting process in a gas furnace in a graphite crucible. Once melted and homogenized (estimated temperature of 900 ° C), the alloy was removed from the furnace to cool in natural "free range" in crucible, until the semi-solid state, within the range of solidification (620-580 ° C). In this condition, the alloy was remelted at a temperature below 800 ° C and removed from the furnace to cool naturally under mechanical stirring. Upon reaching the range of solidification the alloy was cast in a reinforced metal mold preheated 600 ° C and once solidified, cooled suddenly in water. Throughout the process, the temperature was monitored by a thermocouple type K . After solidification samples were collected from different parts of the ingot grown for microstructural characterization. The microstructural analysis revealed a material without casting defects with a uniform distribution of particles. Machinability tests were made in these cylindrical ingots using inserts of titanium nitride and polycrystalline diamond. The machining with the tool made of polycrystalline diamond is capable of shearing the particles of graded while done with the titanium nitride particles are torn off, affecting the surface finish. The results showed the feasibility of incorporation method that produces a good wetting of reinforcement by the matrix, without formation of aluminum carbide (Al₄C₃) interface, enabling the manufacture of automotive parts and accessories for machining.

Keywords: *Ccomposite Materials, Ceramic Reinforcemente, Double-Casting, Machinabilit, Roughness.*