

SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ METÁLICA DE ALUMÍNIO DA LIGA AA2124 ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE METALURGIA DO PÓ¹

Sérvulo José Ferreira Alves²
Marcio Marcelo Sampaio de Sousa³
Everthon Rodrigues de Araujo⁴
Cezar Henrique Gonzalez⁵
Severino Leolpodino Urtiga Filho⁶
Oscar Olimpio de Araújo Filho⁷

Resumo

Este trabalho objetiva a fabricação de compósitos de matriz metálica da liga de alumínio AA2124 com reforço particulado de pós de óxido de alumínio e de carboneto de silício. Os compósitos foram fabricados pela técnica da metalurgia do pó de moagem de alta energia utilizando moinho vibratório do tipo SPEX, seguida de compactação uniaxial a frio e sinterização a vácuo. As caracterizações microestruturais dos pós da liga AA2124 com os reforços foram feitas através de técnicas de MO, de MEV e os tamanhos e a distribuição dos tamanhos das partículas dos pós processados foram obtidos por uma técnica de difração a laser; já a caracterização dos sinterizados foram obtidas por MO, MEV e a caracterização mecânica dos sinterizados foi por uma técnica de dureza Vickers (HV).

Palavras-chave: Compósitos de matriz metálica de alumínio; Liga AA 2124; Metalurgia do pó; Moagem de alta energia.

MANUFACTURING AND CHARACTERIZATION OF AA2124 ALUMINIUM ALLOY METAL MATRIX COMPOSITES THROUGH POWDER METALURGY TECHNIQUES

Abstract

This work of research aims the manufacturing and characterization of AA2124 aluminium alloy metal matrix composites. These composites were manufactured by a powder metallurgy route of high energy ball milling, cold uniaxial compaction and vacuum sintering. The powders processed were characterized by scanning electron microscopy (SEM) and laser diffraction. The sintered samples obtained were evaluated by means of LM, SEM and Vickers hardness tests. The AA2124 aluminium alloy metal matrix composites had their densities evaluated as well.

Key words: Powder metallurgy (P/M); AISI M2 and M3:2 high speed steels; High energy ball milling; Niobium carbide and vacuum sintering.

¹ Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheiro Mecânico, Mestre. Perito Criminalístico. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil.

³ Engenheiro Químico, Mestre. Perito Criminalístico. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil.

⁴ Matemático licenciado, Mestre. Aluno de doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil.

⁵ Engenheiro Mecânico, Doutor. Professor Adjunto IV, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil.

⁶ Engenheiro Mecânico, Doutor. Professor Associado III, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, Brasil.

⁷ Engenheiro Mecânico, Doutor. Professor Adjunto I, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos também denominados (CMM) surgiram em decorrência da necessidade do mundo atual exigir maior produção e produtividade na fabricação de peças e com custos cada vez menores, em especial nas de pequenas dimensões⁽¹⁾ e conciliando todas estas necessidades com a maior preservação do meio ambiente (redução do consumo de energia, combustíveis e de geração de resíduos). Os compósitos são formados pela mistura íntima de materiais com características físicas e mecânicas diferentes (metais, semi-metais, polímeros e cerâmicas), onde o material presente em maior percentual é denominado de matriz e os demais constituintes constituem os reforços. Nos compósitos o que se busca é a obtenção de propriedades mecânicas superiores que as dos constituintes isoladamente,⁽²⁾ porém, ao se adicionar reforços que funcionam como elementos de liga na matriz do compósito, algumas propriedades mecânicas são melhoradas e outras reduzidas e, desta forma, a análise custos versus benefícios do uso dos reforços e das frações de reforços utilizadas é imperativo nas propriedades finais dos compósitos.

Dentre os metais que mais se destacam como matriz dos compósitos metálicos tem-se o alumínio e isto decorre em função de ser este um elemento abundante na natureza, sobretudo em nosso país, pois, somos o terceiro maior produtor mundial, aliado a possibilidade de reciclagem do citado metal que atualmente supera os 90% aqui no Brasil, ou seja, para cada 10 toneladas fabricadas e posteriormente utilizadas, nove delas são reaproveitadas, sem a necessidade de extração de bauxita (mineral que contém o alumínio) e principalmente com grande economia de energia elétrica, já que o processo por eletrólise é o predominante na obtenção do alumínio e por ser este processo muito dispendioso requerendo então, enorme quantidade de energia. A utilização de compósitos de matriz metálica com alumínio também se dá em decorrência de interessantes propriedades apresentadas por esse material, dentre as quais: baixa densidade, boa condutividade, alta plasticidade, baixa temperatura de fusão (660°C), alta resistência à corrosão e excelente conformabilidade.⁽³⁾

Já os reforços visam aumentar e agregar propriedades a matriz metálica e os mais utilizados são cerâmicas na forma de óxidos, nitretos e carbonetos. A escolha do reforço depende principalmente das características finais desejadas nos compósitos e dos custos de fabricação envolvidos. Esse trabalho contempla a fabricação de compósitos de matriz metálica da liga de alumínio AA2124 reforçados com óxido de alumínio, também denominado de alumina (Al_2O_3) e carboneto de silício (SiC).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Moagem de Alta Energia (MAE) e Compactação dos Pós Processados

Foram usados pós comerciais, o pó da matriz dos compósitos do presente trabalho, a liga AA2124, foi fabricado pela Pechiney Hermillon e os reforços cerâmicos utilizados, óxido de alumínio (Al_2O_3) pela Sigma-Aldrich e o carboneto de silício pela Saint Goubain. Utilizamos oito gramas (8 g) de pós (matriz+reforços) e frações em massa de reforços de 5%, 10% e 15% para ambos os reforços (Al_2O_3 e SiC).

Utilizou-se como mídia de moagem constituída de jarras construídas em aço inox AISI 304 L, as bolas de aço SAE 52100 são apresentadas na Figura 1. O poder de moagem (ou relação massa de bola/massa de pós) foi de 10:1.



Figura 1. Jarra, anel de vedação de borracha e bolas.

Foi utilizado como lubrificante na matriz e no punção durante as compactações, o estearato de zinco ($C_{36}H_{70}O_4Zn$) fabricado pela Sigma-Aldrich que tem como função reduzir o atrito resultante do punção com a matriz e dos pós com a matriz durante as compactações, além de facilitar a retirada do punção após cada compactação. Após as compactações a temperatura ambiente, obtivemos os compactados verdes nos formatos de discos e com dimensões aproximadas de 25,00 mm de diâmetro e 4,00 mm de espessura. O moinho utilizado é um moinho de alta energia do tipo Spex (vibratório) fabricado pela Triunfo Ferramentaria de Sorocaba - São Paulo. O moinho de alta energia que foi utilizado possui uma única rotação fixa de funcionamento de setecentos e vinte rotações por minuto (720 rpm). As Figuras 2 e 3 mostram o moinho utilizado. Utilizou-se dois tempos de moagens, trinta minutos (30 min) e sessenta minutos (60 min), No entanto, compactou-se pós submetidos aos tempos de moagem de alta energia de sessenta minutos (60 min.).

Os pós foram compactados uniaxialmente a frio (temperatura ambiente) numa pressão de $7,0 \text{ t/cm}^2$ (700 MPa) utilizando-se uma prensa de compactação do LABMEC - Laboratório de Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica - UFPE com capacidade nominal de 80 toneladas.



Figura 2. Moinho SPEX.

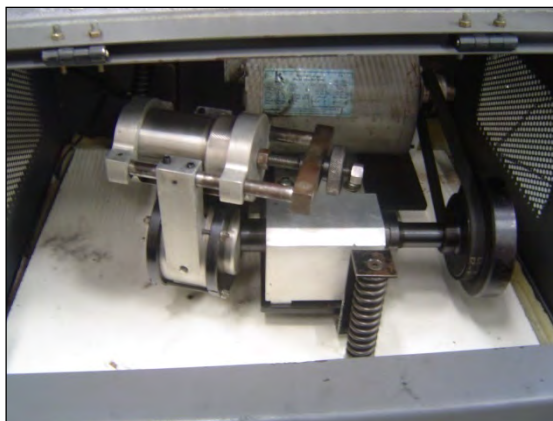


Figura 3. Moinho SPEX com a jarra.

2.2 Sinterizações dos Compósitos de Matriz Metálica da Liga de Alumínio AA2124

Os pós após a compactação (compactados verdes) foram sinterizados no forno a vácuo (-680 mm Hg) do IPEN/CNEN - SP, na temperatura de 500°C durante 5 horas numa taxa de aquecimento de 20°C/min e o tempo de resfriamento demandou 48 horas. A Figura 4 apresenta os discos dos compósitos óbitos por sinterização a vácuo. A Figura 5 apresenta as Secções transversal e longitudinal dos discos dos compósitos óbitos por sinterização a vácuo.



Figura 4. Discos dos compósitos óbitos por sinterização a vácuo.



Figura 5. Secções transversal e longitudinal dos discos dos compósitos óbitos por sinterização a vácuo.

3 RESULTADOS

A Tabela 1 mostra os resultados obtidos e que foram exibidos nos gráficos que seguem:

Tabela 1. Tabela dos diâmetros das partículas de pós de AA2124, Al₂O₃ e SiC em relação as frações de volume de 0,1, 0,5 e 0,9 do ensaio de granulometria

	d(0,1)	d(0,5)	d(0,9)
AA2124	15,655	34,220	60,472
Al ₂ O ₃	45,769	99,574	161,910
SiC	29,296	52,055	83,046

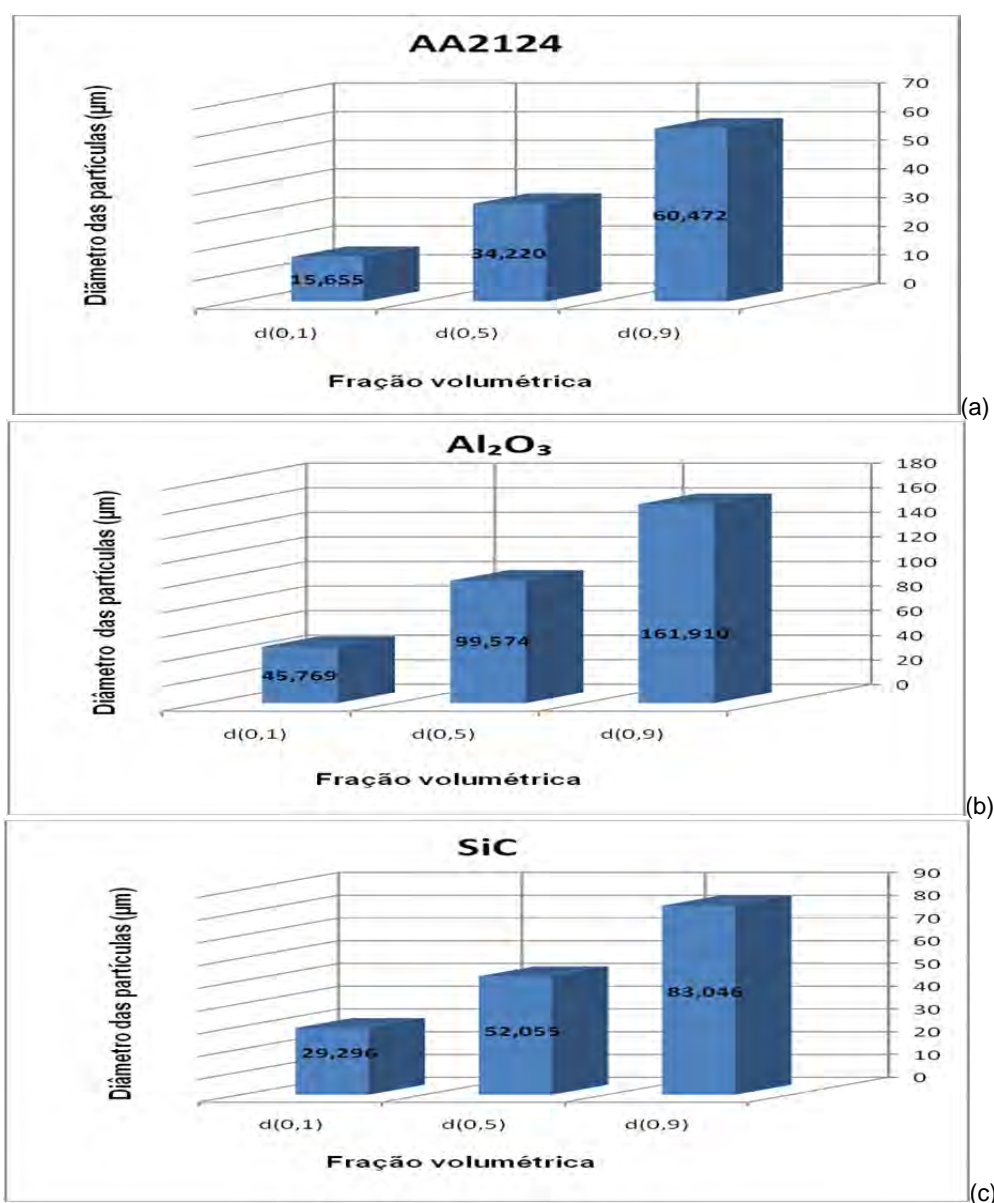


Figura 6. Gráficos dos diâmetros de partículas de pós x fração volumétrica das partículas dos pós da liga AA2124 (a), de Al₂O₃ (b) e SiC (c) com 0,1, 0,5 e 0,9 de fração volumétrica.

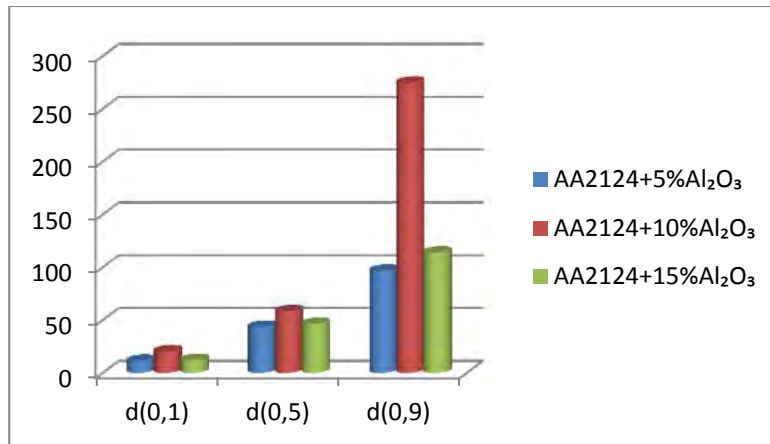


Figura 7. Gráfico dos diâmetros de partículas de pós x fração volumétrica das partículas de pós de AA2124+5, 10 e 15% Al₂O₃ com 0,1, 0,5 e 0,9 de fração volumétrica processados por 30 minutos de moagem.

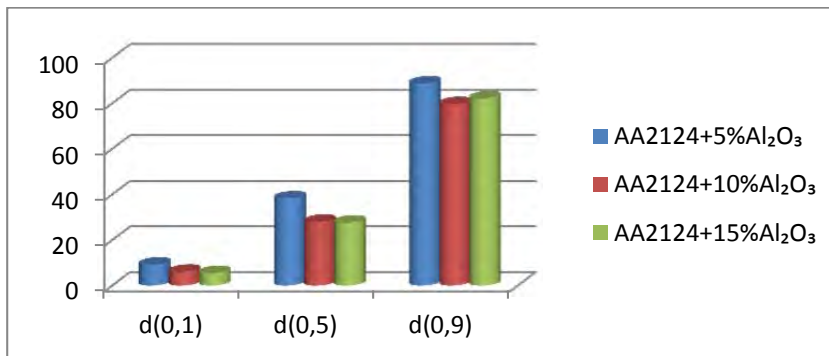


Figura 8. Gráfico dos diâmetros de partículas de pós x fração volumétrica das partículas de pós de AA2124+5, 10 e 15% Al₂O₃ com 0,1, 0,5 e 0,9 de fração volumétrica processados por 60 minutos de moagem.

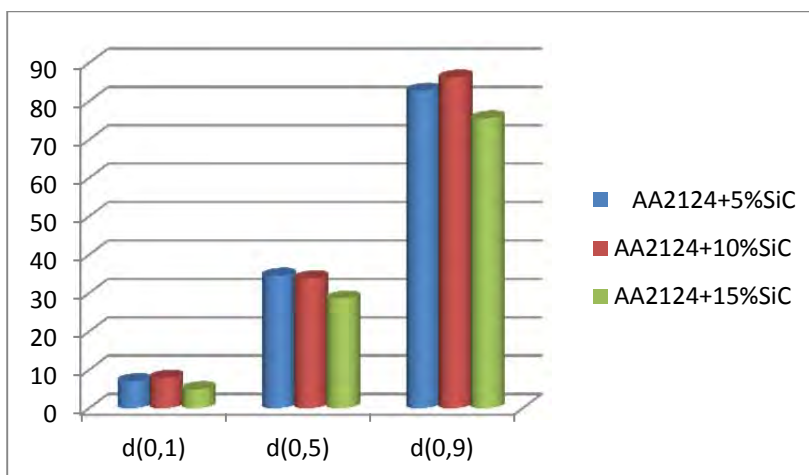


Figura 9. Gráfico dos diâmetros de partículas de pós x fração volumétrica das partículas de pós de AA2124+5, 10 e 15% SiC com 0,1, 0,5 e 0,9 de fração volumétrica processados por 30 minutos de moagem.

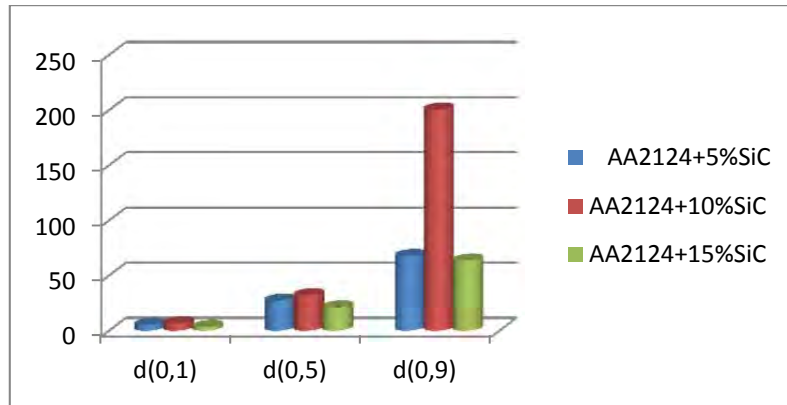


Figura 10. Gráfico dos diâmetros de partículas de pó x fração volumétrica das partículas de pó de AA2124+5, 10 e 15% SiC com 0,1, 0,5 e 0,9 de fração volumétrica processados por 60 minutos de moagem.

3.1 Microscopia Eletrônica de Varredura dos Pó dos Compósitos da Liga de Alumínio AA2124 Processados por Moagem de Alta Energia

A microscopia eletrônica de varredura dos pó dos compósitos de matriz metálica da liga de alumínio AA2124 com reforço particulado de 5%, 10% e 15% de alumina e carboneto de silício, processados por moagem de alta energia durante 30 e 60 minutos. foram executadas no Departamento de Física da UFPE por meio de um microscópio eletrônico de varredura com EDS acoplado “JEOL, JSM-5900”. As Figuras 11 a 22 apresentam as micrografias de MEV dos pó da liga AA2124 reforçados com 5, 19 e 15% de alumina e carboneto de silício processados por moagem de alta energia (MAE) num moinho do tipo vibratório ou SPEX durante 30 e 60 minutos.

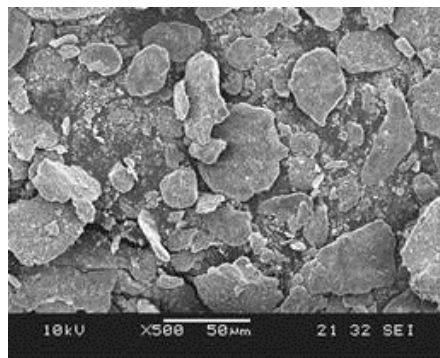


Figura 11. Pó compósitos da liga de alumínio AA2124 com o reforço de 5% de alumina processados durante 30 minutos.

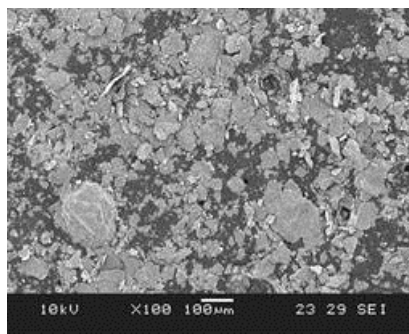


Figura 12. Pó compósitos da liga de alumínio AA2124 com o reforço de 5% de alumina processados durante 60 minutos.

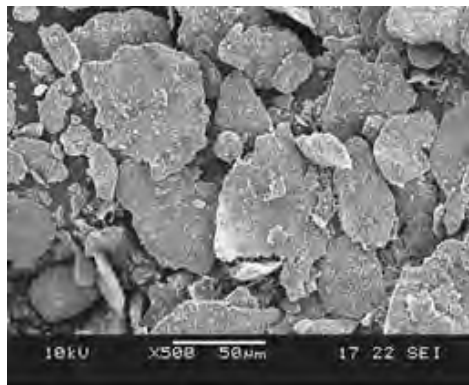


Figura 13. Pós compósitos da liga de alumínio AA2124 com o reforço de 10% de alumina processados durante 30 minutos.

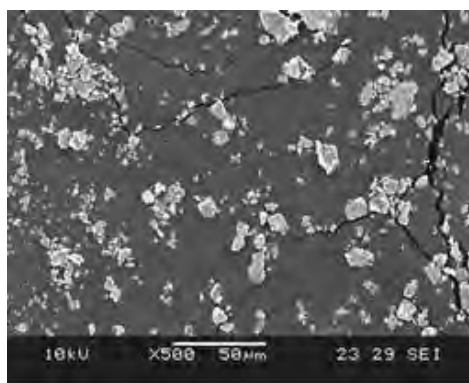


Figura 14. Pós compósitos da liga de alumínio AA2124 com o reforço de 10% de alumina processados durante 60 minutos.

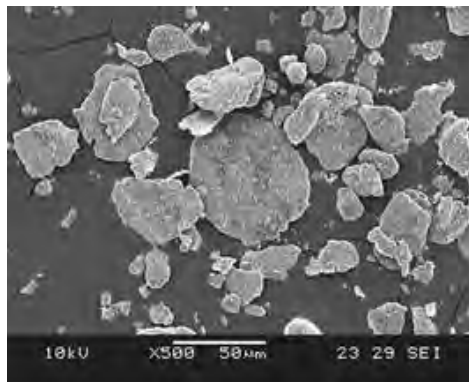


Figura 15. Pós compósitos da liga de alumínio AA2124 com o reforço de 15% de alumina processados durante 30 minutos.

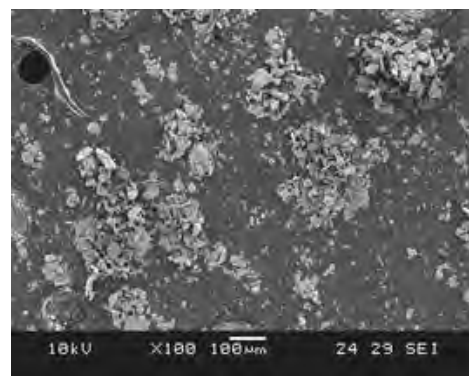


Figura 16. Pós compósitos da liga de alumínio AA2124 com o reforço de 15% de alumina processados durante 60 minutos.

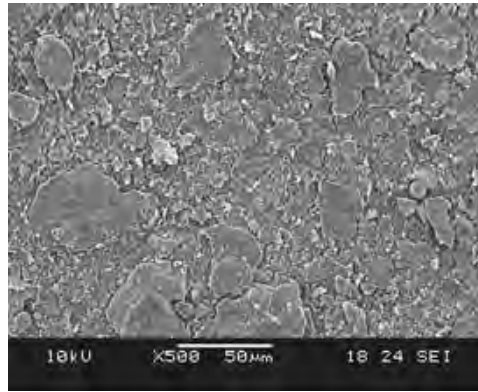


Figura 17. Pós compósitos da liga de alumínio AA2124 com o reforço de 5% de carboneto de silício processados durante 30 minutos.

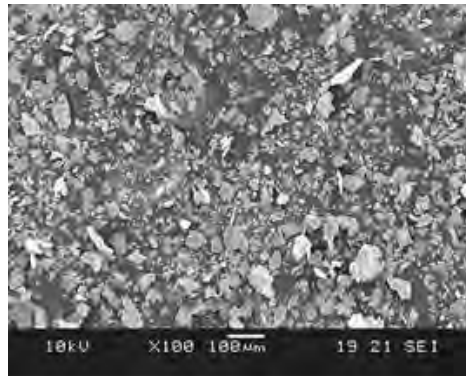


Figura 18. Pós compósitos da liga de alumínio AA2124 com o reforço de 5% de carboneto de silício processados durante 60 minutos.

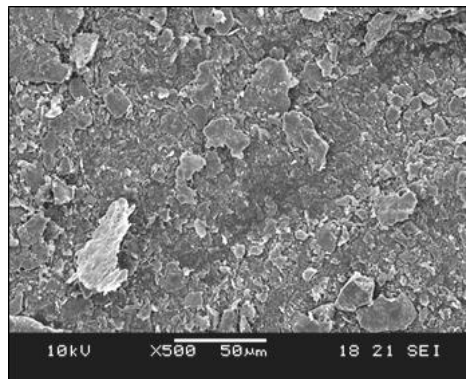


Figura 19. Pós compósitos da liga de alumínio AA2124 com o reforço de 10% de carboneto de silício processados durante 30 minutos.

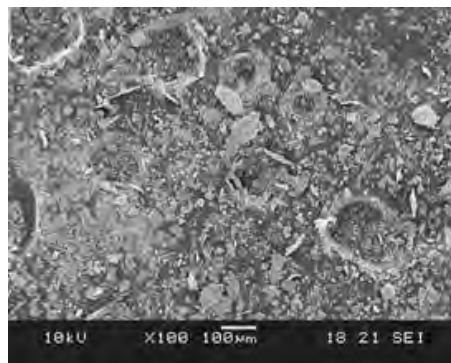


Figura 20. Pós compósitos da liga de alumínio AA2124 com o reforço de 10% de carboneto de silício processados durante 60 minutos

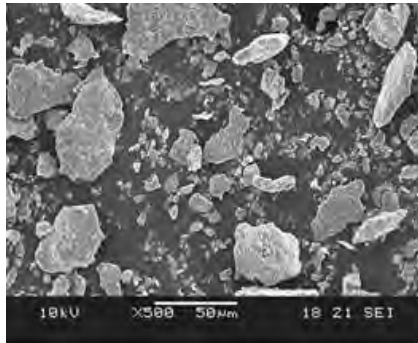


Figura 21. Pós compósitos da liga de alumínio AA2124 com o reforço de 15% de carboneto de silício processados durante 30 minutos.

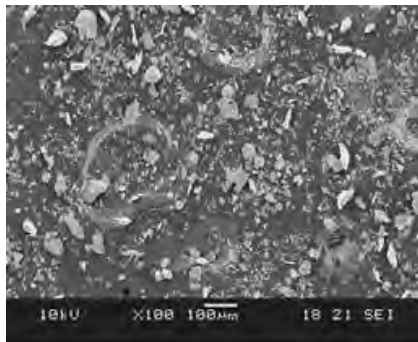


Figura 22. Pós compósitos da liga de alumínio AA2124 com o reforço de 15% de carboneto de silício processados durante 60 minutos.

3.2 Microscopia Ótica (MO) dos Compósitos da Liga AA2124 com Reforço Particulado de Alumina e Carboneto de Silício

As Figuras 23 e 24 apresentam micrografias de Microscopia Ótica (MO) dos compósitos de matriz metálica da liga de alumínio AA2124 reforçados com 15% de alumina e carboneto de silício.

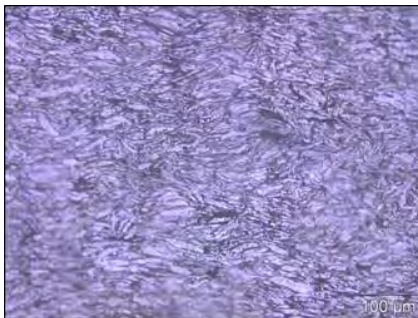


Figura 23. Liga AA2124+15% Al₂O₃. Aumento de 300x.

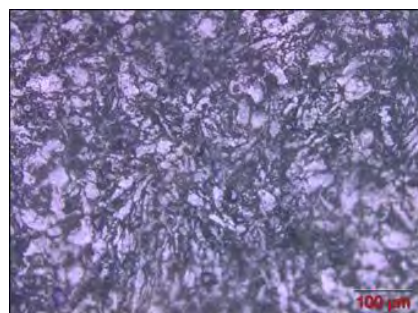


Figura 24. Liga AA2124+15% SiC. Aumento de 300x.

3.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) dos Compósitos da Liga AA2124 com Reforço Particulado de Alumina e Carboneto de Silício

As Figuras 25 e 26 apresentam micrografias de MEV dos compósitos de matriz metálica da liga de alumínio AA2124 reforçados com 15% de alumina e carboneto de silício.

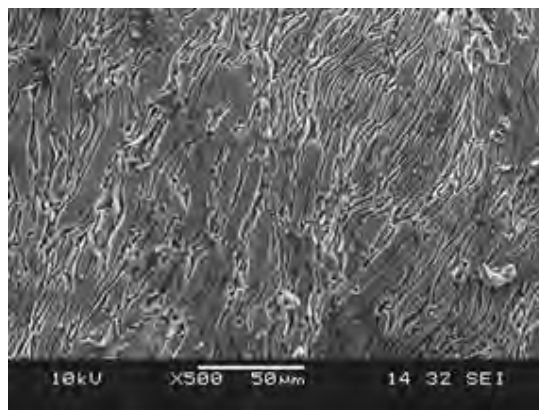


Figura 25. Liga AA2124+15% Al₂O₃. Aumento de 300x.

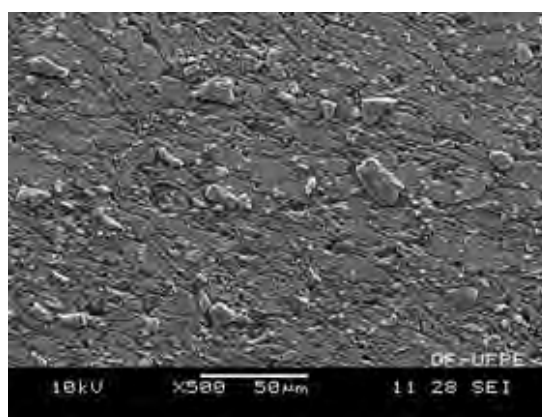


Figura 26. Liga AA2124+15% SiC. Aumento de 300x.

3.4 Dureza dos Compósitos da Liga de Alumínio AA2124 com Reforço Particulado Cerâmico de Alumina e Carboneto de Silício Sinterizados a Vácuo

Os ensaios mecânicos de dureza Vickers (HV) foram executados com carga de 5 Kgf de acordo com a norma NBR NM 188-1 para avaliar os resultados obtidos da propriedade mecânica de dureza dos compósitos de matriz metálica da liga de alumínio AA2124 com reforço particulado de alumina e carboneto de silício. Foram realizados cinco ensaios de dureza para cada amostra.

Tabela 2. Dureza Vickers (HV) dos sinterizados

Material	Dureza HV
AA2124	37,880 ± 0,132
AA2124 + 5% Al ₂ O ₃	68,958 ± 1,327
AA2124 + 10% Al ₂ O ₃	61,782 ± 4,327
AA2124 + 15% Al ₂ O ₃	77,555 ± 4,018
AA2124 + 5% SiC	68,466 ± 12,823
AA2124 + 10% SiC	83,770 ± 7,691
AA2124 + 15% SiC	88,160 ± 1,288

3.5 Densificação dos Compósitos de Matriz Metálica da Liga de Alumínio AA2124 com Reforço Particulado de Alumina e Carboneto de Silício Sinterizados

Tabela 3. resultados de densificação em porcentagem dos sinterizados

Material	Densificação (%)
AA2124 + 5% Al ₂ O ₃	92,12
AA2124 + 10% Al ₂ O ₃	92,21
AA2124 + 15% Al ₂ O ₃	93,37
AA2124 + 5% SiC	92,37
AA2124 + 10% SiC	93,48
AA2124 + 15% SiC	93,54

4 DISCUSSÃO

Os pós dos compósitos de matriz metálica da liga de alumínio AA2124 com reforços particulados de alumina e carboneto de silício nas frações em massa de 5, 10 e 15% submetidos a um procedimento de moagem de alta energia num moinho do tipo vibratório ou SPEX foram analisados no que diz respeito a granulometria e através de uma técnica de difração de Laser. Observou-se que se obteve com sucesso a incorporação dos reforços cerâmicos particulados de alumina (Al₂O₃) e carboneto de silício (SiC) nas partículas dúcteis da liga de alumínio AA2124, para todas as condições de moagem de alta energia.

Constatou-se por meio dos resultados obtidos (MEV) que a moagem por 60 minutos em moinho de alta energia SPEX proporcionou boa distribuição dos reforços particulados cerâmicos de alumina e carboneto de silício na matriz metálica, resultando em misturas mais homogêneas e sem aglomeração da fase cerâmica de reforço relativamente ao tempo de moagem de 30 minutos. Pode-se perceber que houve incorporação das partículas duras de reforços na matriz na matriz dúctil da liga de alumínio AA2124, formando partículas compósitas. Verificou-se, no entanto, que o reforço de carboneto de silício proporcionou uma melhor distribuição do que o reforço de alumina na matriz da liga AA2124. Devido a mais alta energia do SPEX, pós mais finos puderam ser obtidos para os tempos de 60 minutos o que favorece a obtenção após a compactação e sinterização de compósitos com estrutura mais refinada o que promove propriedades mecânicas melhoradas o que ficou efetivamente constatado.^(4,5)

Obteve-se para os compósitos sinterizados uma boa densificação não obstante uma melhoria acentuada no resultados de densificação poderia ser alcançada pela utilização de uma técnica de extrusão a quente que ensejaria uma quebra na camada passivadora de alumina associada às partículas da liga de alumínio.⁽⁶⁻⁸⁾

Os resultados de dureza Vickers (HV) obtidos permitem concluir que a incorporação dos reforços cerâmicos particulados de alumina e carboneto de silício foram efetivos no sentido de agregar aos compósitos processados por uma técnica de metalurgia do pó de moagem de alta energia, compactação uniaxial a frio seguida de sinterização a vácuo melhores propriedades mecânicas. No entanto, o reforço particulado de carboneto de silício apresentou-se mais efetivo no que concerne às propriedades mecânicas alcançadas. A quantidade crescente ou seja a fração em massa crescente adicionada também apresentou resultados de dureza Vickers (HV) sempre crescentes para os dois reforços cerâmicos utilizados.

5 CONCLUSÕES

- Obteve-se com relativo êxito compósitos de matriz metálica da liga de alumínio AA2124 com reforço particulado de alumina (Al_2O_3) e carboneto de silício (SiC) através de uma técnica de metalurgia do pó de moagem de alta energia, compactação uniaxial a frio e sinterização a vácuo;
- a moagem de alta energia (MAE) utilizando um moinho vibratório do tipo SPEX apresentou-se eficiente na obtenção de pós compósitos da liga de alumínio AA2124 com reforço particulado de alumina (Al_2O_3) e carboneto de silício (SiC) promovendo uma redução acentuada na granulometria dos pós para o tempo de moagem de 60 minutos quando comparado com o tempo de 30 minutos;
- os sinterizados da liga AA2124 com o reforço de carboneto de silício processados durante sessenta minutos apresentaram maior densificação que os sinterizados da liga AA2124 com o reforço alumina (Al_2O_3) processados no mesmo tempo;
- as micrografias de MEV dos pós compósitos da liga de alumínio AA2124 reforçados com alumina e carboneto de silício processados por moagem de alta energia mostram que a liga reforçada com carboneto de silício (SiC) e com alumina (Al_2O_3) apresentam as partículas dos pós processados no tempo de sessenta minutos sempre menores que as destes mesmos pós processados durante trinta minutos mesmo se levarmos em consideração as frações de volumes que foram usadas neste trabalho de 5%, 10% e 15% para cada um dos dois reforços;
- as micrografias dos sinterizados mostram uma boa distribuição dos reforços de alumina (Al_2O_3) e do carboneto de silício (SiC) dos compósitos e em todas as frações de volumes utilizadas e os reforços são melhor visualizados nos compósitos com o reforço do carboneto de silício (SiC) e tão mais visíveis quanto maior é percentual deste reforço na liga; e
- as durezas obtidas para os compósitos de matriz metálica de alumínio AA2124 com o reforço particulado de alumina (Al_2O_3) e carboneto de silício (SiC) sinterizados aqueles obtidos para a liga AA2124 sem reforço. No entanto, o reforço de carboneto de silício foi mais efetivo no que concerne aos resultados de dureza obtidos.

Agradecimentos

Os autores gostariam de expressar os seus agradecimentos a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), ao Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC), ao Departamento de Física da UFPE, ao ITEP (Instituto tecnológico de Pernambuco), a FACEPE (Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco), ao CNPq e a CAPES.

REFERÊNCIAS

- 1 SCHWARTZ, M.M. - Composite Materials Handbook - Mac Graw Hill - p 1.1 - 1.3, 1983.
- 2
- 3 CHAWLA, K. K.- Composite Materials Science and Engineering. New York, Springer Verlag p 3-5, 1987.

- 4 MATHEWS, F.L.; RAWLINGS, R. D. - Composite Materials: Engineering and Science - Chapman & Hall -15th edition - p 3-8, 1984.
- 5 Y.B. Liu, S.C. Lim, L. Lu, M.O. Lai, Recent development in the fabrication of metal matrix-particulate composites using powder metallurgy techniques, J. Mat. Sci. 29, 1999-2007, 1994.
- 6 J.B. Fogagnolo; E.M. Ruiz-Navas; M.H. Robert; F. Velasco; J.M. Torralba, Extrusion and properties of composites manufactured by mechanical alloying, in: Proceedings of the second International Conference on Powder Metallurgy, Vluj Napoca, Romania, p. 21-26, 2000.
- 7 J.B. Fogagnolo; E.M. Ruiz-Navas; J.M. Torralba, The effects of the presence of reinforcements particles on the mechanical milling of aluminium AA6061 matrix composite powder alloy, in: Proceedings of the ninth Internacional Conference on Achievements in Mechanical & Materials Engineering, Gdansk, Poland, p. 183-186, 2000.
- 8 M. Adamiak, J.B. Fogagnolo; E.M. Ruiz-Navas; L.A. Dobrzański, J.M. Torralba, PM AA6061 (Ti₃Al) composite powder obtained by mechanical milling, in: Proceedings of the 10th Internacional Conference on Achievements in Mechanical & Materials Engineering, Zakopane, Poland, p. 15-18, 2001.
- 9 Yoshimura, H.N. Produção e caracterização de compósitos de matriz de alumínio reforçado com partículas de SiC obtidos por extrusão do pó, Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1994.