

# SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ METÁLICA DE ALUMÍNIO DA LIGA AA 6061 PROCESSADOS ATRAVÉS DE UMA TÉCNICA DE METALURGIA DO PÓ<sup>1</sup>

Everthon Rodrigues de Araújo<sup>2</sup>  
Sérvulo José Ferreira Alves<sup>3</sup>  
Marcio Marcelo Sampaio de Sousa<sup>4</sup>  
Cezar Henrique Gonzalez<sup>5</sup>  
Severino Leopoldino Urtiga Filho<sup>6</sup>  
Oscar Olimpio de Araujo Filho<sup>7</sup>

## Resumo

O presente trabalho trata da fabricação de compósitos de liga de alumínio AA6061, utilizando reforço particulado de carboneto de silício (SiC) e alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), através de técnicas de metalurgia do pó de moagem de alta energia, compactação uniaxial a frio e sinterização a vácuo. Os resultados obtidos mostram que o reforço de carboneto de silício se mostrou mais eficiente em relação ao reforço de alumina durante o processo de moagem, contribuindo para redução do tamanho de partícula dos pós e o aumento da propriedade mecânica de dureza nos compósitos sinterizados. A técnica de moagem de alta energia se mostrou eficaz na fabricação de compósitos com matriz de alumínio, proporcionando redução do tamanho de partícula e distribuição uniforme da fase reforço na matriz dúctil de alumínio AA6061.

**Palavras-chave:** Compósitos de matriz metálica de alumínio; Liga AA6061; Metalurgia do pó; Moagem de alta energia.

## SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF METAL MATRIX COMPOSITE ALUMINUM ALLOY AA6061 AA PROCESSED THROUGH A TECHNIQUE OF POWDER METALLURGY

### Abstract

This paper deals with the manufacture of composite aluminum alloy AA6061 using the particulate reinforcement of silicon carbide (SiC) and alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) via powder metallurgical techniques milling, high energy, cold uniaxial compaction and sintering vacuo. The results show that strengthening of silicon carbide is more efficient in relation to the reinforcing alumina during the milling process, contributing most significantly to reduce the particle size of the powders and an increase in mechanical properties of hardness in the sintered composite. Therefore, the technique of high energy milling proved highly effective in the production of aluminum matrix composites, providing reduction of particle size and uniform distribution of reinforcement in the ductile matrix phase of aluminum AA6061.

**Key words:** Aluminium alloy metal matrix composites; AA6061 alloy; Powder metallurgy; High energy ball milling.

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

<sup>2</sup> Licenciado em matemática, Doutorando, Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, PE, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro mecânico, Doutorando, Perito Criminal, Instituto de Criminalística, Recife, PE, Brasil.

<sup>4</sup> Engenheiro químico, Mestre em ciências, Perito Criminal, Instituto de Criminalística, Recife, PE, Brasil.

<sup>5</sup> Engenheiro mecânico, Dr, Professor Adjunto III, Demec da UFPE, Recife, PE, Brasil.

<sup>6</sup> Engenheiro mecânico, Dr, Professor Associado III, Demec da UFPE, Recife, PE, Brasil.

<sup>7</sup> Engenheiro nmecânico, Dr, Professor Adjunto I, Demec da UFPE, Recife, PE, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Materiais compósitos correspondem a uma classe de materiais compostos por uma fase contínua (matriz) e uma fase dispersa (reforço ou modificador), contínua ou não, cujas propriedades são obtidas a partir da combinação das propriedades dos constituintes individuais (regra da mistura).<sup>(1)</sup> A metalurgia do pó (MP) do inglês "Powder Metallurgy (PM)" está se tornando cada vez mais popular na produção de componentes de aço com geometria simples ou complexa que requerem pequenas tolerâncias dimensionais e propriedades mecânicas como resistência ao desgaste e tenacidade otimizada, sendo considerada ainda, uma técnica economicamente mais viável na manufatura de certos componentes.<sup>(2)</sup> Através desta técnica se consegue obter compósitos com distribuição homogênea do reforço particulado na matriz, refletindo em uma microestrutura muito bem formada no componente final.<sup>(3)</sup> Consegue-se eliminar a ocorrência de segregação quase que por completo no componente final, enquanto que em métodos convencionais de fabricação, a segregação é um problema muito serio, pois com técnicas convencionais de fabricação não se consegue homogeneidade na distribuição do reforço.<sup>(2)</sup>

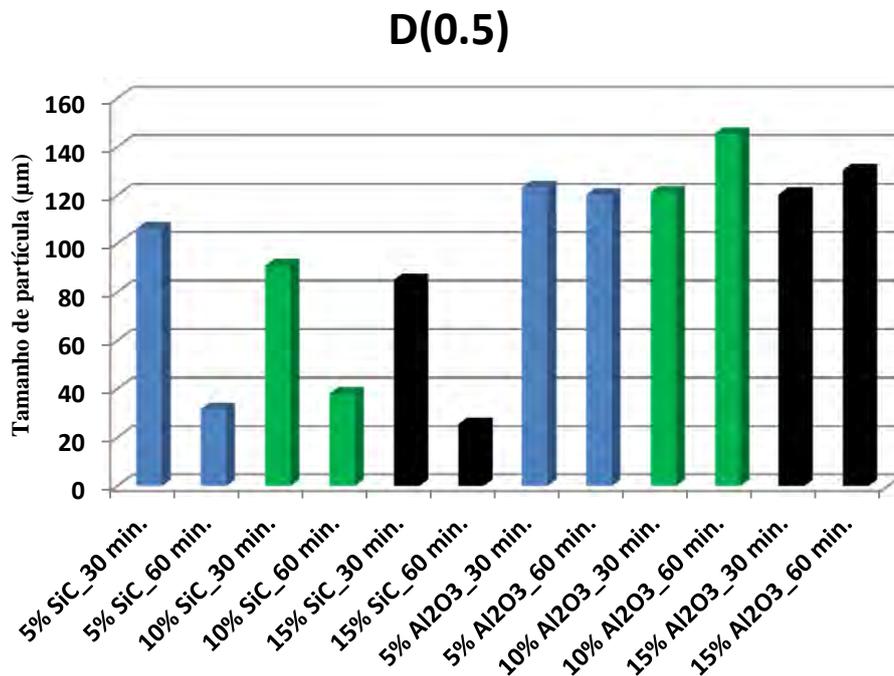
O processamento de pós metálicos e cerâmicos através da moagem de alta energia (mecanossíntese) tem recebido muita atenção como uma ferramenta poderosa para a fabricação de vários materiais avançados: amorfos, quasicristais, nanocristalino e materiais compósitos.<sup>(4)</sup> Além disso, tem sido utilizada para reduzir alguns óxidos metálicos por moagem dos pós de óxido metálico com agentes de redução, à temperatura ambiente. A moagem de alta energia (MAE) é um processo único, em que uma reação no estado sólido tem lugar entre as duas superfícies das partículas de pó, tendo os materiais reagindo à temperatura ambiente.<sup>(5)</sup> Por conseguinte, pode ser utilizado para produzir as ligas e os compostos que são difíceis ou impossíveis de ser obtido pela fusão convencional e técnicas de fundição.<sup>(5,6)</sup> O objectivo principal deste trabalho é apresentar o efeito dos processos de moagem de alta energia sobre a fabricação de compósitos com matriz de alumínio AA6061, reforçados com uma dispersão homogênea carboneto de silício e alumina.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

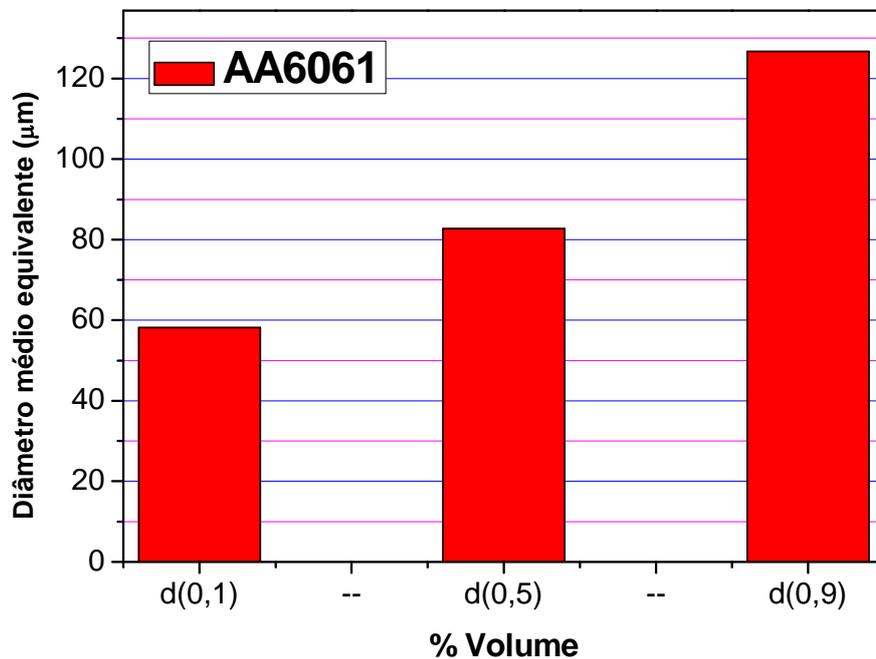
A liga de alumínio AA6061 foi reforçada distintamente com carboneto de silício (SiC) e com alumina ( $Al_2O_3$ ) na fração em massa de 5%, 10% e 15%, fabricando-se dois compósitos: AA6061 + SiC e AA6061 +  $Al_2O_3$ . A técnica de moagem de alta energia em um moinho vibratório do tipo SPEX foi aplicada a fim de processar os pós da liga AA6061 com os respectivos reforços utilizando dois tempos de moagem (30 min e 60 minutos). Acido esteárico foi utilizado como agente controlador do processo para evitar o excesso de soldagem a frio das partículas dúcteis de alumínio AA6061. Logo após a moagem de alta energia segue a etapa de compactação uniaxial frio e sinterização a vácuo (- 650 mmHg), obtendo-se discos dos respectivos compósitos com 26,10 mm de diâmetro, 6 mm de altura, com massa de 8g. Em seguida a preparação metalográfica tem por objetivo preparar amostras para a análise microestrutural através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) e ensaios de microdureza Vickers de acordo com a norma NBR NM 188-1 com carga de 5 Kgf.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Difração a Laser para Determinação do Tamanho de Partícula

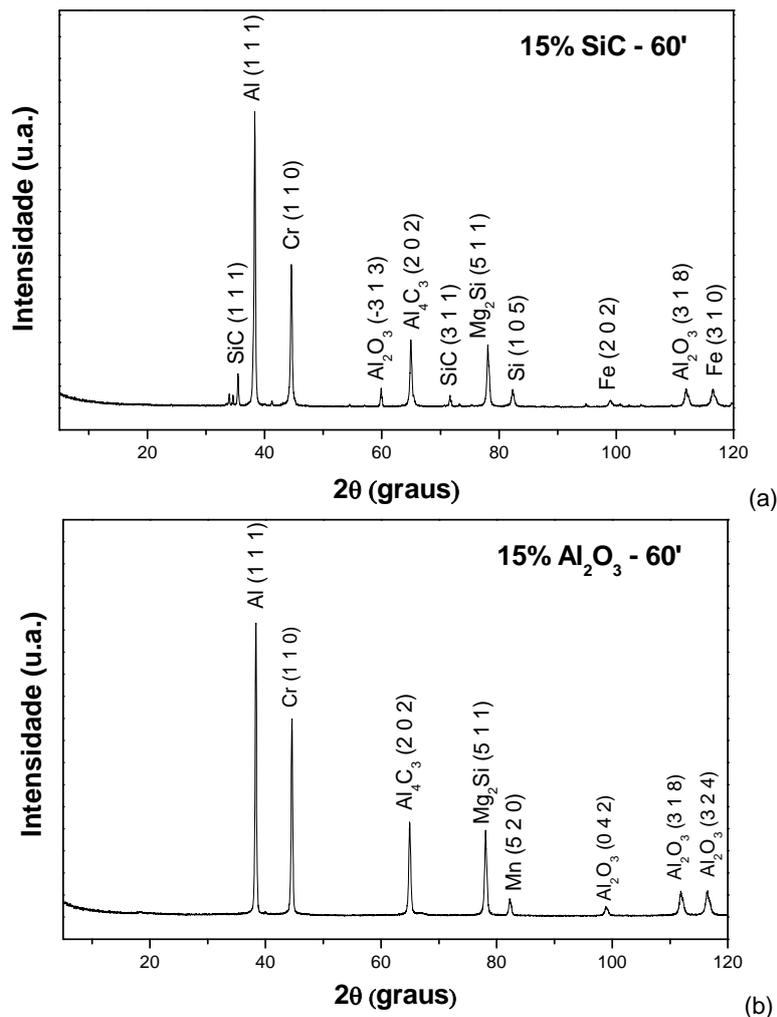


**Figure 1.** Tamanho de partícula dos pós compósitos AA6061 + SiC e AA6061 + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> submetidos a moagem de alta energia.



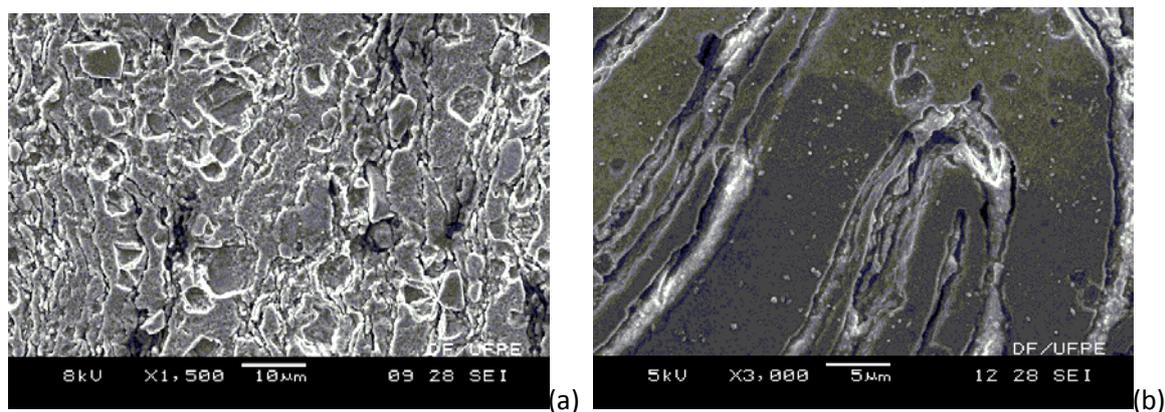
**Figura 2.** Tamanho de partícula do pó como recebido da liga de alumínio AA6061.

### 3.2 Difração de Raios-X dos Pós Compósitos Submetidos a Moagem



**Figura 3.** Padrões de DRX do pó composto reforçado com 15% de SiC em (a) e 15% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> em (b), ambos submetido a 60 minutos de MAE.

### 3.3 Microscopia Eletrônica de Varredura dos Compósitos Extrudados



**Figura 4.** Microscopia eletrônica de varredura do composto reforçado com 10% de SiC em (a) e em (b) reforçado com 10% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ambos submetidos a 60 minutos de moagem.

### 3.4 Ensaio de Dureza Vickers (HV) nos Compósitos Reforçados com Carboneto de Silício e Alumina

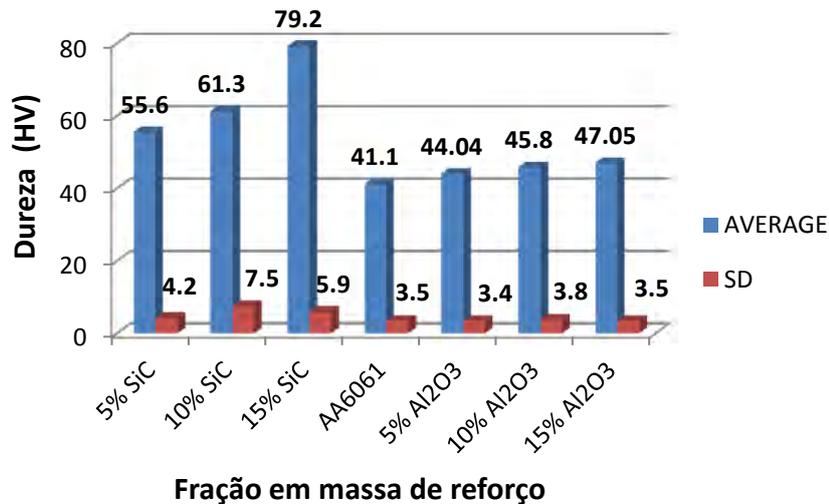


Figura 5. Ensaio de dureza Vickers dos compósitos AA6061 + SiC e AA6061 + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> extrudados.

## 4 DISCUSSÃO

### 4.1 Efeito da Moagem de Alta Energia Sobre o Tamanho das Partículas dos Pós Compósitos AA6061 + SiC e AA6061 + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

A Figura 1 apresenta o resultado de tamanho de partícula obtido em uma análise de difração a laser dos pós compósitos AA6061 + SiC e AA6061 + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> utilizando 5%, 10% e 15% em massa de reforço e submetidos a 30 e 60 minutos de moagem. Podemos observar nos pós compósitos submetidos a moagem de alta energia, figura 1, que o reforço de carboneto de silício contribui de forma mais efetiva para redução do tamanho de partícula em comparação com o reforço de alumina, apresentando também, redução do tamanho de partícula em relação ao pó como recebido de alumínio AA6061 (Figura 2).<sup>(6,7)</sup> O processo de moagem de alta energia é bastante agressivo, mas como observado na Figura 1 à fase reforço pode contribuir significativamente para redução do tamanho de partícula do pó compósito final.<sup>(8)</sup>

### 4.2 Difração de Raios-X nos Pós Compósitos Submetidos a Moagem de Alta Energia

Os difratogramas da Figura 3 não apresentam picos de alta intensidade referente aos reforços SiC e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, atestando para o sucesso do processo de moagem no sentido incorporar o reforço duro (SiC e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) na matriz dútil de alumínio AA6061 nos pós compósitos AA6061 + 15%SiC e AA6061 + 15%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.<sup>(6)</sup>

### 4.3 Análise da Microestrutura dos Compósitos AA6061 + SiC e AA6061 + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Após Compactação e Sinterização

De acordo com a Figura 4, o compósito reforçado com carboneto de silício apresenta uma microestrutura mais deformada em comparação ao compósito

reforçado com alumina, indicando que o carboneto de silício contribuiu mais eficientemente para o processo de deformação e endurecimento da fase matriz AA6061, possibilitando a redução do tamanho de partícula com a atuação da etapa de fratura durante a moagem.<sup>(9-11)</sup>

#### 4.4 Ensaio de Dureza Vickers (HV) nos Compósitos Reforçados com Carboneto de Silício e Alumina

Ambos os compósitos mostraram resultados de dureza Vickers maior do que a matriz de alumínio AA6061 não reforçada, após compactação e sinterização, como mostrado na Figura 4. O fato do compósito reforçado com carboneto de silício ter melhores resultados de dureza em relação ao compósito reforçado com alumina confirma a eficiência do carboneto de silício discutida nos resultados referente à Figuras 2, tanto no processo de moagem, em que funcionou eficazmente na redução do diâmetro da partícula, bem como para promover o endurecimento adicional do compósito final contribuindo para a obtenção de resultados mais elevados de dureza Vickers.<sup>(12,13)</sup> O tímido desempenho do reforço de alumina em acelerar a redução do diâmetro de partícula na moagem de alta energia também se reflecte na baixa eficiência em reforçar a matriz AA6061 promovendo o endurecimento do compósito final após compactação e sinterização.<sup>(8)</sup>

### 5 CONCLUSÃO

- Durante a moagem de alta energia o carboneto de silício contribuiu de forma mais eficaz na redução do diâmetro da partícula em comparação com o reforço de alumina;
- a microestrutura do compósito reforçado com carboneto de silício parece mais deformada em comparação com a microestrutura do compósito reforçado com alumina, como resultado de carboneto de silício promover deformação elevada taxa de partículas na matriz AA6061 na etapa de moagem de alta energia;
- o carboneto de silício também foi mais superior em relação ao reforço da alumina promover os valores mais elevados de dureza Vickers no compósito;
- a rota de metalurgia do pó foi utilizada com sucesso, uma vez que ambos os compostos apresentaram resultados superiores de dureza Vickers, em comparação com a da matriz não reforçada.

### Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o apoio financeiro a este projeto de pesquisa dado por agências brasileiras: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) e UFPE.

### REFERÊNCIAS

- 1 MORTENSEN, A.; LLORCA, J. Metal Matrix Composites. Annual Review of Materials Research. Annu. Rev. Mater. Res. 2010. 40:243–70.
- 2 TORRALBA, J. M.; DA COSTA, C. E.; VELASCO, F. P/M aluminum matrix composites: na overview. J Mater Process Technol 2003;133:203–6, 2003.

- 3 MIRACLE, D.B. Metal matrix composites – From science to technological significance. *Composites Science and Technology* 65 (2005) 2526 – 2540.
- 4 KOCH, C. C. Intermetallic Matrix Composites Prepared by Mechanical Alloying – A Review. *Materials Science and Engineering, A* vol. A244, p. 39 – 48, 1998.
- 5 SURYANARAYANA, C. Mechanical alloying and milling. *Progress in Materials Science*, v.46, p. 1 – 184, 2001.
- 6 ARIK, H. Production and characterization of in situ Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> reinforced aluminum-based composite produced by the mechanical alloying technique. *Mater Des* 2004;25:31.
- 7 KAMRANI, S.; RIEDEL, R.; SEYED REIHANI, S. M.; KLEEBE, H.J. in: Effect of reinforcement volume fraction on the mechanical properties of Al-SiC nanocomposites produced by mechanical alloying and consolidation. *Journal of Composite Materials*, 313: 44, 2010.
- 8 SANTOS, M. A. P.; COSTA, C. A. in: Moagem de pós de carboneto de silício em moinho planetário. *Cerâmica* 51: 392-397, 2005.
- 9 AHMAD, K. R.; LEE, W. J.; ZAKI, R. M.; MAZLEE, M. N.; FITRI, M. W. M.; RIZAM, S. S.; SHUMSUL, J. B. in: The microstructure and properties of aluminium composite reinforced with 65 µm alumina particles via powder metallurgy. *ICoSM*, 2007.
- 10 DHADSANADHEP, C.; LUANGYARANUNT, T.; UMEDA, J. and KONDOH, K. in: Fabrication of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite by Powder Metallurgy Method from Aluminum and Rice Husk Ash. *Journal of Metals, Materials and Minerals*. Vol.18 No.2 pp.99-102, 2008.
- 11 ADAMIYAK, M. in: Selected properties of the aluminium alloy base composites reinforced with intermetallic particles. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* Vol. 14 (2006) 1-2.
- 12 TABANDEH KHORSHID, M.; JENABALI JAHROMI, S. A.; MOSHKARSAR, M. M. in: Mechanical properties of tri-modal Al matrix composites reinforced by nano- and submicron-sized Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particulates developed by wet attrition milling and hot extrusion. *Materials and Design* 31 (2010) 3880-3884.
- 13 ZILNYK, K.; CINTHO, O. M. in: Influência da moagem de alta energia na porosidade de produtos da metalurgia do pó. 4<sup>o</sup> Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais (2008).