

# Influência da sinterização a plasma com atmosfera de nitrogênio em amostras compactadas de alumínio

## Plasma sintering with nitrogen atmosphere influence in aluminium compressed samples

Gilceu dos Santos Cardoso<sup>1</sup>, Guilherme Santos Garcia<sup>1</sup>, Lucas Lapis Ely<sup>1</sup>, Alexandre da Silva Rocha<sup>1</sup>

### RESUMO

Amostras verdes cilíndricas de alumínio foram obtidas através de compactação em matriz uniaxial de simples ação, e logo após, sinterizadas por plasma e para fins de comparação foram sinterizadas convencionalmente. Ambas as técnicas utilizaram o nitrogênio como atmosfera de sinterização, assim como a temperatura de sinterização de 500°C durante 60 min. Anteriormente à sinterização foi necessária uma etapa de degradação do lubrificante sólido inserido nas amostras. As amostras sinterizadas apresentaram semelhanças em seus resultados, destacando suas densificações próximas de 93% e durezas entre 40 e 43 HV0,05. A técnica por plasma possibilitou obter amostras com um mínimo possível de lubrificante no seu substrato, caracterizando uma eficaz degradação, no entanto, através da análise por DRX foi possível identificar a presença de nitretos de alumínio somente nas amostras sinterizadas convencionalmente. Por fim, ambos os processos de sinterização revelaram amostras com grandes semelhanças metalúrgicas e mecânicas, sugerindo assim, a eficácia da técnica por plasma.

**Palavras-chave:** Metalurgia do pó; Processos de sinterização; Densificação.

### ABSTRACT

Green cylindrical samples of aluminum were obtained by uniaxial compaction array of simple action, and soon after, sintered plasma and for comparison purposes were sintered conventionally. Both techniques used nitrogen as a sintering atmosphere as well as the sintering temperature of 500°C for 60 min. Prior to sintering has been required a degradation step of the solid lubricant inserted in the samples. The sintered samples showed similarities in their results, highlighting their next 93% densification and hardness between 40 and 43 HV0,05. The technique has enabled to obtain plasma samples with minimum lubricant on its substrate, characterizing an effective degradation, however, by XRD analysis it was possible to identify the presence of aluminum nitride only on the conventionally sintered samples. Finally, both sintering processes samples showed large metallurgical and mechanical similarities, thus suggesting the effectiveness of technical plasma.

**Keywords:** Powder metallurgy; Sintering processes; Densification.

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Departamento de Metalurgia – Laboratório de Transformação Mecânica – Porto Alegre (RS) – Brasil.

**Autor correspondente:** Gilceu dos Santos Cardoso – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Departamento de Metalurgia – Laboratório de Transformação Mecânica – Campus do Vale – endereço postal – Porto Alegre (RS) – Brasil – E-mail: gilceucardoso@hotmail.com

**Recebido:** 03/09/2016 **Aprovado:** 11/01/2017

## INTRODUÇÃO

Muitas vantagens são atribuídas ao processo de fabricação de peças via metalurgia do pó (MP) quando comparados a outros processos convencionais de fabricação. As vantagens mais significativas resumem-se à obtenção de produtos com boa precisão dimensional e com possibilidade de se evitar etapas posteriores de acabamento, como usinagem; geometrias e tolerâncias com alta repetibilidade, bem como, um processo que exija menor tempo de execução, menor consumo de energia, maior limpeza e facilidade de automação. No entanto, para que a técnica de MP seja comercialmente atrativa, a fabricação de grandes lotes de peças torna-se indispensável<sup>(1-3)</sup>.

Diante tantas vantagens deste processo, técnicas alternativas de sinterização de peças metálicas vêm sendo discutidas e/ou implantadas, a fim de tornar tal processo ainda mais atrativo, aumentando sua qualidade e produtividade<sup>(4-8)</sup>. Dentre as técnicas de sinterização, a mais utilizada é a chamada convencional, a qual utiliza equipamentos de aquecimento resistivo e atmosfera controlada<sup>(6)</sup>. Contudo, a sinterização a plasma (descarga elétrica ou luminescente) tornou-se um processo largamente estudado, no qual o plasma é gerado através de um campo elétrico produzido pela diferença de potencial entre dois eletrodos (cátodo e ânodo) sob uma atmosfera gasosa a baixa pressão<sup>(9)</sup>. Dependendo da polaridade em que a peça se encontra; atuando como cátodo do sistema, seu aquecimento pode ocorrer através de inúmeras colisões de íons, átomos e/ou moléculas e neutros rápidos do gás, junto a sua superfície<sup>(9)</sup>, podendo gerar alterações microestruturais em sua superfície, em decorrência do bombardeamento iônico, ou podendo até mesmo ser danificada, devido à presença de microarcs que se formam durante as colisões<sup>(9-10)</sup>. Para evitar tais danos superficiais, as amostras são posicionadas no ânodo do sistema<sup>(4,6,7,10,11)</sup>.

A grande atratividade por peças sinterizadas de alumínio detém-se às suas ótimas propriedades físico-químicas como: baixa leveza, alta condutividade térmica e elétrica, resistência à corrosão, boa ductilidade, entre outros; tendo como principais consumidores as indústrias aeroespacial e automobilística<sup>(2,12)</sup>. Outra propriedade importante desse material é a possibilidade de se obter o aumento de sua resistência mecânica pela adição de elementos de liga em seu substrato e/ou tratamentos térmicos<sup>(2)</sup>.

Por possuir resistência à corrosão, claramente justificada por sua alta afinidade química pelo oxigênio<sup>(13)</sup>, o alumínio é permanentemente recoberto por uma camada de óxidos, onde sua espessura depende da temperatura em que foi formada sob determinada atmosfera de exposição, particularmente a umidade<sup>(14)</sup>.

Durante o processo de sinterização dos metais, a atmosfera torna-se de fundamental importância, podendo em alguns casos reduzir os óxidos ou criar átomos do metal altamente móveis<sup>(1)</sup>. Para o caso do tratamento do alumínio, a atmosfera pode afetar significativamente suas propriedades finais e na obtenção de boa precisão dimensional<sup>(3)</sup>. Quando a atmosfera a ser utilizada é o

nitrogênio, ele pode se difundir para o interior da peça, facilitando a formação de nitretos de alumínio<sup>(15-16)</sup>. O nitreto de alumínio formado pelo calor liberado durante a reação do alumínio com o nitrogênio induz a uma fusão local, que por sua vez melhora a sinterização<sup>(15)</sup>. O que também pode ocorrer, é a sua formação no limite dos poros fechados, reduzindo a pressão no seu interior, podendo surgir dois efeitos na contração. Primeiramente, a redução da pressão dos poros desequilibra a força motora, induzindo o preenchimento dos poros. Por segundo, a pressão reduzida dos poros aumenta a tensão de sinterização, aumentando a taxa de densificação devido à solução de re-precipitação<sup>(16,17)</sup>.

Pesquisas realizadas anteriormente focaram no âmbito da sinterização por plasma de outros materiais metálicos como ferro, aço e outras ligas<sup>(4-8,10-11)</sup>. Logo, surge a necessidade por esclarecimentos sobre o comportamento do alumínio quando sinterizado por plasma.

Com isso, este trabalho visa analisar a influência da sinterização a plasma com o emprego da atmosfera de nitrogênio em amostras de alumínio, e logo após, realizar a comparação destas com amostras do mesmo material sinterizadas convencionalmente.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Preparação das amostras

Para este trabalho o material utilizado foi o pó de alumínio com 98% de pureza, de formato irregular e com granulometria entre 30 a 100  $\mu\text{m}$ . O uso do lubrificante sólido, estearato de zinco ( $\text{C}_{36}\text{H}_{70}\text{O}_4\text{Zn}$ ), misturado ao pó de alumínio foi importante para o processo de compactação, a fim de facilitá-lo, reduzindo o atrito entre o material e as paredes da matriz. A proporção em peso de lubrificante adicionado na mistura foi 1% para cada 3,5 g de pó de alumínio.

Para a compactação da mistura pó/lubrificante foi utilizada uma matriz uniaxial de simples ação, de aço AISI D6, através do uso da máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL60000 com capacidade máxima de 600 KN. A velocidade de compactação foi fixada em 7 mm/min e a pressão foi de 600 MPa para todas as amostras compactadas.

As amostras verdes a serem sinterizadas após a compactação apresentaram diâmetro de 13 mm e altura de 10 mm aproximadamente. A matriz de compactação possui diâmetro de 13 mm, altura de 52,40 mm e punções (superior e inferior) que configuram o aparato completo de compactação.

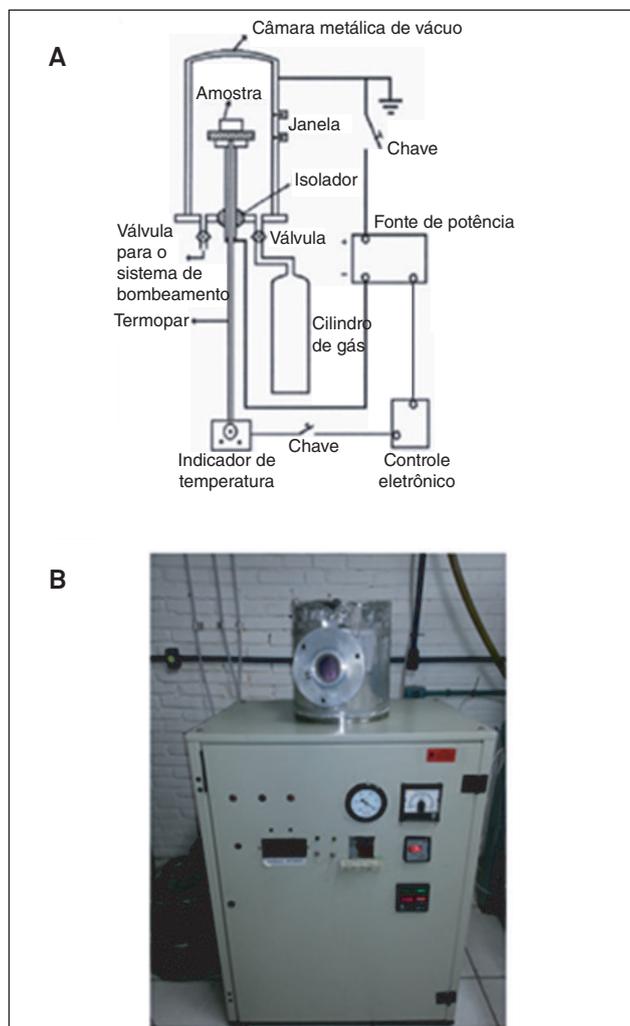
### Processos de sinterização

O processo de sinterização foi realizado em forno convencional e a plasma, utilizando o nitrogênio como atmosfera de tratamento.

A sinterização convencional foi realizada em um forno do tipo mufla, da marca Sanchis, modelo ESP. O tratamento foi realizado a temperatura de 500°C durante 60 min. Anteriormente à sinterização foi realizada a retirada do lubrificante sólido presente no substrato das amostras. A degradação deste ocorre durante a

rampa de aquecimento, tendo início espontâneo a partir de sua temperatura de degradação (~200°C). Diferente do processo a plasma, o tratamento não foi realizado sob um ambiente a vácuo, e o aquecimento das amostras foi promovido pela irradiação térmica proveniente das resistências elétricas do forno.

Na sinterização a plasma foi utilizado um reator cilíndrico de aço inoxidável AISI 310, de 260 mm diâmetro e 280 mm de altura, sob o regime de descarga luminescente anormal. A sinterização foi realizada a 500°C durante 60 min. A fonte de tensão utilizada foi do tipo semi-pulsada, com acionamento manual. A temperatura do processo foi medida por um termopar do tipo K, acoplado através de uma falsa amostra (sinterizada), com mesma massa e dimensões às de tratamento. As amostras foram posicionadas sobre o cátodo, sofrendo o bombardeamento direto das espécies ativas do plasma. Com essas condições estabelecidas houve o surgimento de uma região luminescente ao redor das amostras em tratamento, onde a excitação dos átomos da superfície promoveu o seu aquecimento. A Fig. 1(a) apresenta o desenho esquemático do equipamento e a Fig. 1(b) mostra a imagem da câmara a plasma utilizada.



**Figura 1:** Equipamento utilizado na sinterização a plasma: (a) desenho esquemático e (b) imagem do reator.

Após a completa preparação do aparato experimental, o reator foi posto sob o ambiente de vácuo, com a pressão em torno de  $6 \times 10^{-1}$  mbar, com o intuito de remover o ar (oxigênio mais umidade) e/ou gases voláteis que ali poderiam estar presentes. Em seguida, para a abertura do plasma foi necessária a aplicação de uma tensão de trabalho suficiente, em torno de 300 Volts, em conjunto com a atmosfera de hidrogênio a baixa pressão (0,5 mbar). Para a retirada do lubrificante foi utilizada atmosfera de hidrogênio, e após seu término, o nitrogênio passou a ser a atmosfera de tratamento. Neste processo, a remoção do lubrificante inserido nas amostras compactadas (a partir de 200°C) foi tão importante quanto a sinterização em si. Durante esta etapa, uma condição de instabilidade no plasma foi gerada, com ação de micro arcos elétricos na região superficial das amostras em tratamento, decorrentes do processo de pulverização (*sputtering*), cujos efeitos destes, além de atuarem diretamente na superfície das amostras, fizeram com que o estearato de zinco fosse expelido do interior para fora das amostras.

Em ambos os processos realizados, após o fim da sinterização, as amostras foram resfriadas no interior da câmara, sob a mesma atmosfera de trabalho, até a temperatura ambiente.

## Análises

Para a análise da densificação, as amostras foram pesadas antes (amostras verdes) e após a sinterização (sinterizadas) através de uma balança digital de precisão, da marca Ohaus, com carga máxima de uso de 4100 g e resolução de 0,01 g. Em seguida foram medidas suas respectivas dimensões através de um paquímetro digital.

Para a obtenção dos resultados de densificação a verde, cálculos do volume e massa das amostras compactadas foram necessários. Os resultados de densificação das amostras sinterizadas foram adquiridos através do princípio de Arquimedes, ou seja, os volumes encontrados das amostras são referentes ao volume de líquido deslocado por elas em um recipiente com água.

Para a apresentação dos dados, foram calculadas as densidades médias das amostras verdes e sinterizadas.

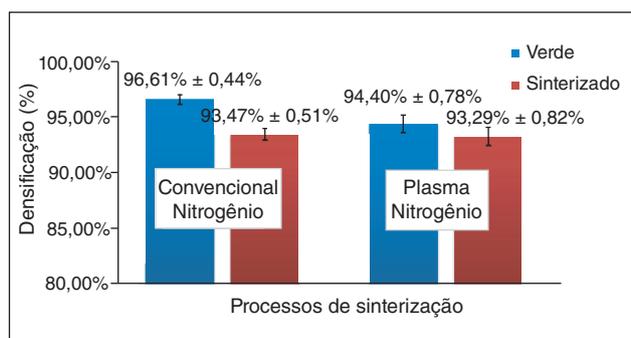
Com o intuito de avaliar a resistência mecânica, foram realizados ensaios de dureza Vickers na face das amostras sinterizadas. Foram realizadas 10 identificações aleatórias para cada amostra, através do uso de um microdurômetro automático digital, da marca Insize, modelo ISH – TDV1000, para cargas de trabalho de 50 e 500 gf.

Para avaliar a morfologia resultante da superfície das amostras tratadas foram obtidas imagens por microscopia eletrônica de varredura (MEV), através do microscópio de varredura da marca Zeiss EVO MA10, com detector de elétrons secundários (SE). Também foram obtidas imagens através de um detector de elétrons retroespalhados (BSE), para auxiliar na identificação dos diferentes contrastes em função da composição e do relevo das amostras. Em seguida foi realizada a microanálise química elementar (EDS), com o intuito de mostrar os elementos constituintes presentes na microestrutura das amostras.

Para a caracterização das fases que poderiam ser formadas nas amostras durante a sinterização, foi realizada a análise por difração de raios-x (DRX). O equipamento utilizado foi o difratômetro da marca GE Seifert Charon XRD M – Research Edition, utilizando de tubo de raios-x de cromo ( $\lambda = 2,2897\text{\AA}$ ) e tensão de operação de 30 kV.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. 2 apresenta os resultados das médias das densificações das amostras verdes e sinterizadas nos processos convencional e a plasma em atmosfera de nitrogênio.



**Figura 2:** Média das densificações das amostras verdes e sinterizadas nos processos de sinterização com atmosfera de nitrogênio.

Os resultados de densificações das amostras sinterizadas (em torno de 93%), obtidos para ambos os processos de sinterização mostraram-se satisfatórios, sendo os 7% restantes constituídos de poros em suas microestruturas. As amostras verdes apresentaram densidades de  $96,61\% \pm 0,44\%$  e  $94,40\% \pm 0,78\%$ , respectivamente. Contudo, de acordo com o método adotado de compactação, não foi possível obtê-las com densidades uniformes. Tal diferença entre estes resultados não foram significativamente suficientes para impactar nos resultados de densificação final dos sinterizados.

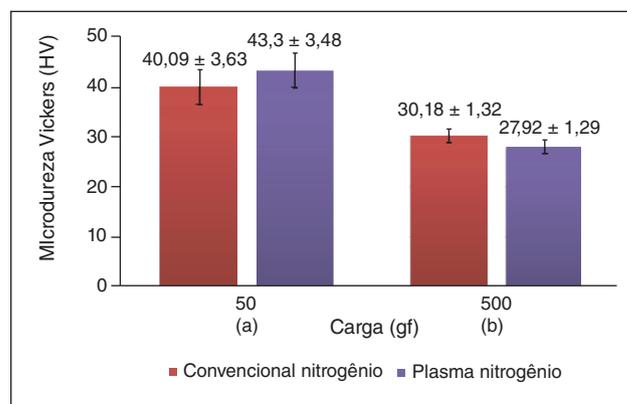
De acordo ainda com a Fig. 2, também é possível observar a redução da média das densificações das amostras sinterizadas, quando comparadas com as verdes, pois, as amostras de alumínio possuem uma camada de óxidos em sua superfície, que além de prejudicar a densificação final dos sinterizados, reduzindo-as, podem também vir a prejudicar a eficiência da sinterização<sup>(18)</sup>.

A Fig. 3 apresenta as médias das microdurezas medidas na face das amostras sinterizadas convencionalmente e a plasma.

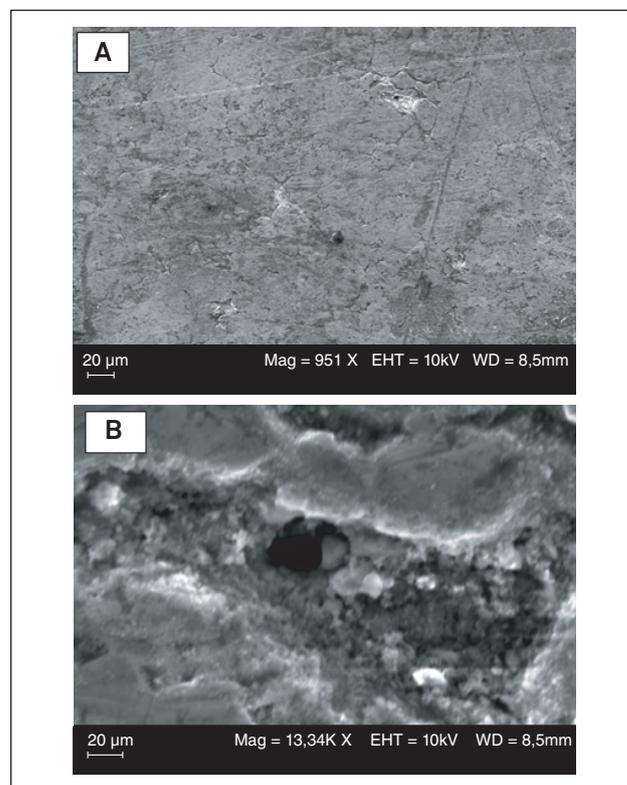
Conforme a Fig. 3(a), os maiores valores de dureza apresentados são referentes às identações com carga de 50 gf, quando comparados com as identações de maior carga (Fig. 3(b)), podendo ser justificados pela possível difusão de nitrogênio para a superfície das amostras e da possível formação de nitretos.

Os valores de dureza obtidos para ambos os processos de sinterização são praticamente os mesmos (em torno de 40 HV0,05), justificando uma similaridade entre os efeitos do nitrogênio em ambos os métodos adotados.

As Figs. 4 e 5 apresentam as imagens obtidas por MEV - SE para as amostras sinterizadas convencionalmente e a plasma com atmosfera de nitrogênio respectivamente. Através da análise destas imagens foi possível identificar uma superfície mais homogênea para o caso das amostras sinterizadas convencionalmente. No entanto, a superfície das amostras sinterizadas a plasma apresentou imperfeições decorrentes do bombardeamento iônico. Também, foi possível identificar a presença de porosidade variada na microestrutura das amostras sinterizadas em ambos os processos, ou seja, poros de formato irregular e de diferentes tamanhos.



**Figura 3:** Média das microdurezas medidas na face das amostras para os processos de sinterização com atmosfera de nitrogênio. (a) com carga de 50 gf e (b) com carga de 500 gf.



**Figura 4:** Imagens obtidas por MEV com detector de elétrons secundários para o processo convencional. (a) com baixa magnificação e (b) com maior magnificação.

A Fig. 6 apresenta as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura com detector de elétrons retroespalhados para as amostras sinterizadas convencionalmente e a plasma com atmosfera de nitrogênio, indicando a presença de porosidade em diferentes regiões na microestrutura das amostras, sendo vistas principalmente nos contornos de grão. Através da comparação das imagens da Fig. 6(a) e Fig. 6(b) é possível visualizar a diferença entre os contrastes em função da composição das amostras, sendo evidenciada uma coloração mais clara na primeira figura (Fig. 6(a)).

A Fig. 7 apresenta os respectivos espectros gerados pela microanálise química elementar (EDS) dos pontos localizados na microestrutura da amostra da Fig. 6(a).

A Fig. 8 apresenta os espectros (EDS) dos pontos localizados na microestrutura da amostra da Fig. 6(b).

A partir das análises de EDS, foi possível identificar a presença de elementos como oxigênio em todas as amostras em estudo, o que explica de fato a avidez química do alumínio pelo oxigênio, formando óxidos em toda sua matriz.

Os espectros apresentados na Fig. 7 indicam a presença, em grande quantidade, de zinco na microestrutura da amostra sinterizada convencionalmente (originados do estearato de zinco) e de coloração clara, podendo ser resultado de uma remoção ineficiente durante todo o decorrer do processo de sinterização. O tempo de aquecimento até a temperatura de sinterização foi muito

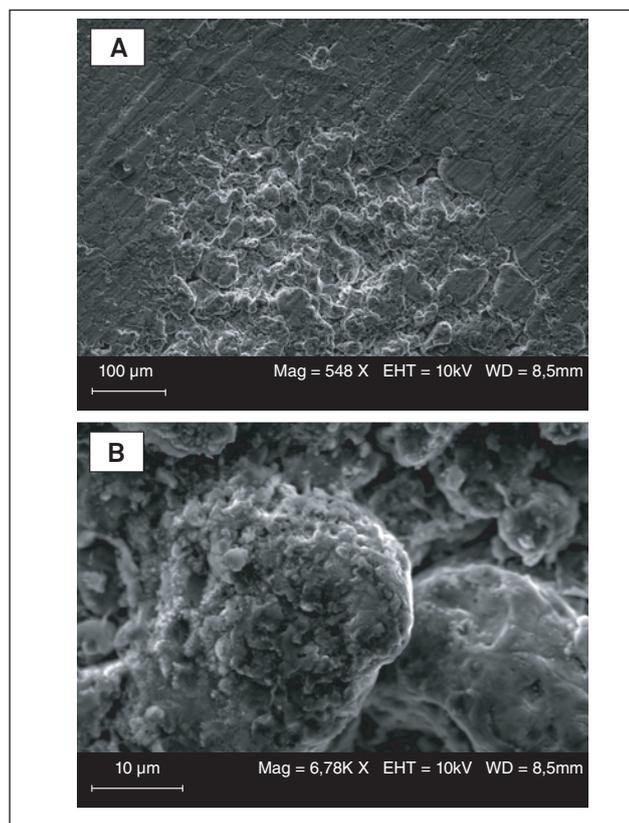
curto (taxa de aquecimento de 10°C/min), podendo ser um dos fatores preponderantes para que se mantivesse uma quantidade maior de resíduos de lubrificante. Para uma limpeza efetiva das amostras, seria mais indicada uma etapa anterior de remoção do lubrificante antes da sinterização.

A Fig. 8 mostra a presença de zinco, mas em quantidade insignificante, resultante de uma eficiente degradação e remoção do estearato de zinco pelo processo de remoção por *sputtering*.

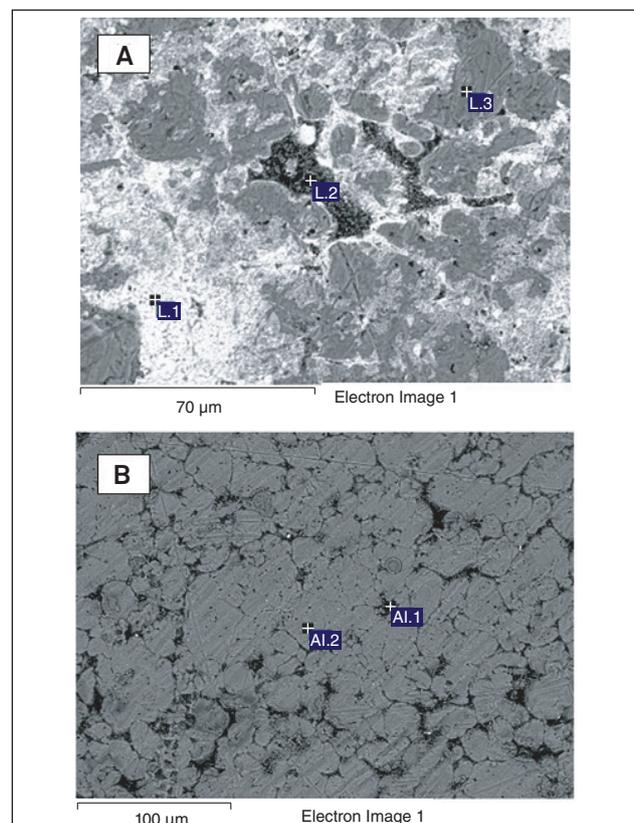
A presença de nitrogênio em pouquíssima quantidade na amostra sinterizada a plasma não foi um argumento suficiente para justificar a formação de nitretos de alumínio em sua superfície, pois a técnica de EDS é meramente qualitativa quando utilizada para avaliação de elementos químicos considerados leves, como exemplo o nitrogênio. Para uma análise mais criteriosa, quanto à presença de nitretos formados nas amostras, a realização de outros testes torna-se necessária.

A Fig. 9 apresenta os difratogramas (DRX) das amostras sinterizadas convencionalmente e a plasma com atmosfera de nitrogênio, respectivamente.

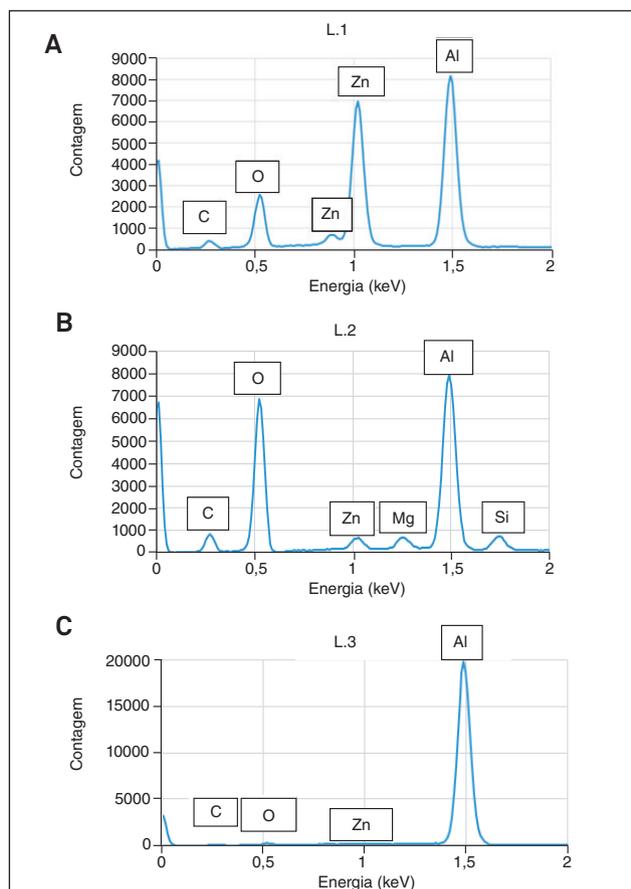
A Fig. 9(a) indica a presença de três picos de nitreto de alumínio, evidenciando a sua formação na sinterização convencional. A área ampliada deste gráfico, conforme Fig. 10, foi destacada para uma melhor visualização. Com base nesses resultados, esperava-se também tal formação no processo a plasma, o que não aconteceu. No entanto, os resultados de densificação e dureza



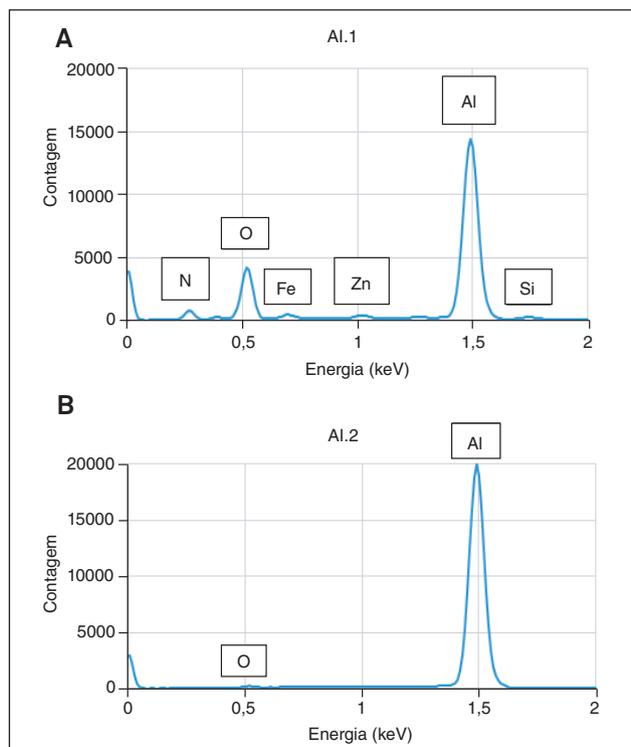
**Figura 5:** Imagens obtidas por MEV com detector de elétrons secundários para o processo a plasma. (a) com baixa magnificação e (b) com maior magnificação.



**Figura 6:** Imagens obtidas por MEV com detector de elétrons retroespalhados. (a) convencional nitrogênio e (b) plasma nitrogênio.

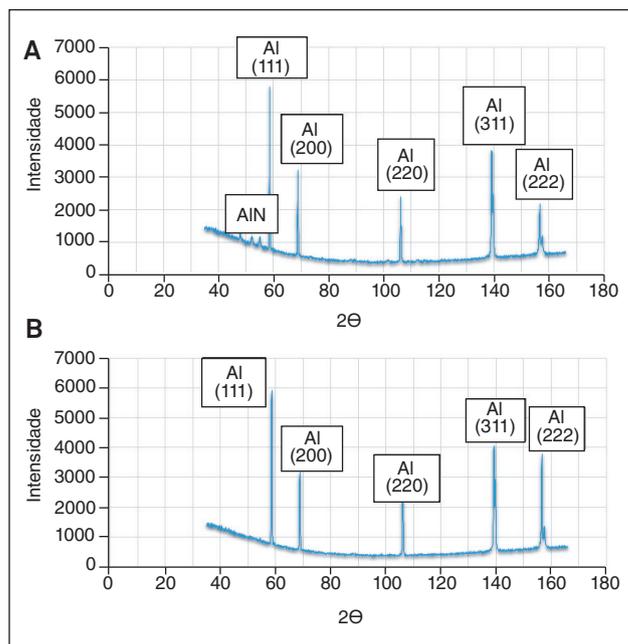


**Figura 7:** Espectros obtidos por EDS para o processo de sinterização convencional com nitrogênio. (a) ponto L.1, (b) ponto L.2 e (c) ponto L.3.

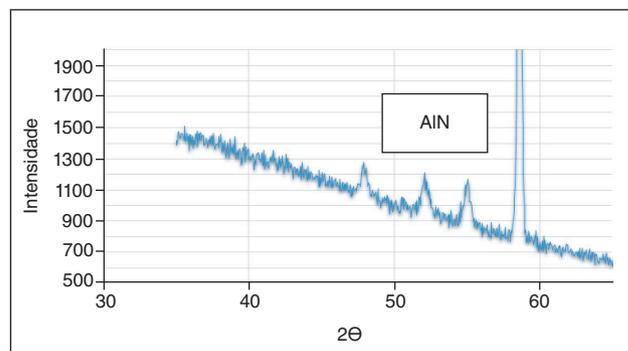


**Figura 8:** Espectros obtidos por EDS para o processo de sinterização a plasma com nitrogênio. (a) ponto Al.1 e (b) ponto Al.2.

mostraram-se similares para ambos. Os bons resultados de dureza apresentados para o processo a plasma podem estar associados a uma maior densificação superficial nas amostras, com maior resistência mecânica agregada nesta região, em decorrência do bombardeamento iônico que provoca deformações plásticas e/ou selamento dos poros<sup>(8)</sup>.



**Figura 9:** Difratogramas obtidos para os processos de sinterização. (a) convencional nitrogênio e (b) plasma nitrogênio.



**Figura 10:** Região ampliada dos picos de AlN presentes na Figura 9(a).

## CONCLUSÕES

Através das caracterizações realizadas nas amostras sinterizadas convencionalmente e a plasma com atmosfera de nitrogênio foi possível concluir que:

- A densificação das amostras sinterizadas foi praticamente a mesma para ambos os processos de sinterização, com valor próximo a 93%;
- Os valores de dureza são semelhantes para ambos os processos adotados, destacando-se os maiores resultados medidos com a menor carga de indentação;

- As amostras sinterizadas convencionalmente apresentaram uma superfície mais homogênea quando analisadas, em contrapartida, as sinterizadas por plasma apresentaram uma morfologia superficial com inúmeras imperfeições decorrentes do bombardeamento iônico superficial;
- Através da análise por EDS foi possível identificar a presença em grande quantidade de estearato de zinco nas amostras sinterizadas convencionalmente, podendo ser causa direta de uma degradação ineficiente deste processo;
- A técnica por plasma possibilitou obter amostras com um mínimo possível de lubrificante no seu substrato, caracterizando uma eficaz degradação;
- Através da análise por DRX foi possível identificar a presença de nitretos de alumínio somente nas amostras sinterizadas convencionalmente;
- Por fim, ambos os processos de sinterização revelaram amostras com grandes semelhanças metalúrgicas e mecânicas, sugerindo assim, a eficácia da técnica por plasma.

## AGRADECIMENTOS

Ao CNPQ pelo apoio financeiro desta pesquisa; ao Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha, pela orientação neste trabalho; aos coautores, pelo auxílio e colaboração nas atividades.

## REFERENCES

1. UPADHYAYA, G. S., Powder Metallurgy Technology. Cambridge International Science Publishing, 2002.
2. ASM Handbook. Volume 7: Powder Metal Technologies and Applications. ASM International, 1998.
3. TOTTEN, G. E., MACKENZIE, D. S., Physical Metallurgy and Processes. Handbook of Aluminum vol 1, Cap 24, Dekker. New York, 2003.
4. PAVANATI, H.C., Sinterização de Ferro Puro com Enriquecimento Superficial Simultâneo de Cromo em Descarga Elétrica em Regime Anormal. 2005. 190 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.
5. LOURENÇO, J.M., KLEIN, A.N., MUZART, J.L.R., MALISKA, A.M., Sinterização de ferro puro em reator de plasma utilizando a configuração forno-plasma. In: II Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – COBEF 2003, 18-21 maio, 2003, UBERLÂNDIA (MG). CD-Rom II COBEF.
6. LOURENÇO, J.M.; MALISKA, A. M.; MUZART, J. L. R., Sinterização por plasma de Fe-0,7P usando as configurações catodo e anodo-catodo confinadas. In: II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM 2002; 12-16 agosto, 2002, JOÃO PESSOA (PB). ANAIS-CD; Código Cpb 0099, 2002. v. 1. p. 01-07.
7. LAWALL, I.T., Estudo do Processo de Sinterização de Compactados de Ferro em Descarga Elétrica na Configuração Ânodo-Cátodo Confinado. 2001. 110 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
8. CONSONI, D.R., BINDER, C., PAVANATI, H.C., DE MELLO, J.D.B., KLEIN, A.N., Estudo da Porosidade Superficial e do Comportamento Tribológico de Amostras de Ferro Puro Sinterizadas por Plasma. Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo, V. 26, n. 3, 117 – 120, 2007.
9. CHAPMAN, B., Glow Discharge Processes: Sputtering and Plasma Etching, first ed., John Wiley & Sons, New York, 1980.
10. MONTEDO, O. R. K., MALISKA, A. N., MUZART, J. L. R., Sinterização por plasma de aços em descarga de catodo/anodo confinado. In: CONEM, 2000, NATAL. Anais-CD. Cod HC 9068, 2000. p. 353-359.
11. PAVANATI, H. C., STRAFFELINI, G., MALISKA, A. M., KLEIN, A. N., Microstructural and mechanical characterization of iron samples sintered in DC plasma. Materials Science & Engineering A, 474 (2008) 15-23, 2007.
12. ABAL. Fundamentos e Aplicações do Alumínio. Associação Brasileira do Alumínio. 2007. <<http://www.abal.org.br/site/pdf/fundamentos-do-aluminio/001.pdf>>. Acessado em Julho de 2016.
13. KHRAISAT, W., JADAYIL, W. A., Strengthening aluminum scrap by alloying with iron. Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering. Volume 4, Pages 372-377, 2010.
14. LUMLEY, R., Fundamentals of aluminium metallurgy: Production, processing and applications. Woodhead Publishing Limited, 2011.
15. SCHAFFER, G. B., HALL, B. J., The Influence of the Atmosphere on the Sintering of Aluminum. Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 33A, 3279-3284, 2002.
16. SCHAFFER, G.B., HALL, B.J., BONNER, S.J., HUO, S.H., SERCOMBE, T.B., The Effect of the Atmosphere and the Role of Pore Filling on the Sintering of Aluminium. Acta Materialia. 54(2006), 131 – 138, 2005.
17. SCHAFFER, G.B., YAO, J.Y., BONNER, S.J., CROSSIN, E., PAS, S.J., HILL, A.J., The effect of tin and nitrogen on liquid phase sintering of Al-Cu-Mg-Si alloys. Acta Materialia, 56(11): 2615–2624, 2008.
18. PIECZONKA, T., SHUBERT, T., BAUNACK, S., KIEBACK, B., Sintering Behaviour of Aluminium in Different Atmospheres. Fraunhofer Institute, 2005.