

PREPARAÇÃO DE AÇOS RÁPIDOS AO MOLIBDÊNIO COM ADIÇÃO DE CARBONETO DE NIÓBIO ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE METALURGIA DO PÓ¹

Oscar Olimpio de Araújo Filho²
 Rodrigo Tecchio Antonello³
 Cezar Henrique Gonzalez⁴
 Severino Leolpodino Urtiga Filho⁵
 Francisco Ambrozio Filho⁶

Resumo

O objetivo deste trabalho é a obtenção dos aços rápidos AISI M2 e M3:2 com e sem a adição de carboneto de nióbio (NbC) por compactação uniaxial a frio e sinterização a vácuo com fase líquida. Os pós dos aços rápidos AISI M2 e M3:2 foram processados por moagem de alta energia (MAE) com e sem adição de carboneto de nióbio e compactado uniaxialmente a frio e sinterizados a vácuo. Os pós dos aços rápidos AISI M2 e M3:2 com e sem a adição de carboneto de nióbio (NbC) processados por uma técnica de moagem de alta energia (MAE) foram caracterizados por Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de baixa energia dispersiva de raios-X (EDS). Os sinterizados foram caracterizados por MEV, ensaios de dureza vickers (V) e tiveram as suas densificações avaliadas.

Palavras-Chave: Metalurgia do pó; Aços rápidos; Moagem de alta energia; Carboneto de nióbio; Sinterização a vácuo.

PREPARATION OF MOLYBDENUM HIGH SPEED STEELS WITH ADDITION OF NIOBIUM CARBIDE THROUGH POWDER METALLURGY TECHNIQUES

Abstract

This work of research aims the the production and characterization of AISI M2 and M3:2 High Speed Steels with and without the addition of 6% in mass of niobium carbide (NbC) though powder metallurgy techniques of high energy ball milling, cold uniaxial compaction and vacuum sintering in a presence of a liquid phase. The powders processed were characterized by scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS). The sintered samples obtained were evaluated by means of SEM and Vickers hardness tests. The High Speed Steels AISI M2 and M3:2 had their densities evaluated as well.

Keywords: Powder metallurgy; High speed steels; High energy ball milling; Niobium carbide; 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, Dr. Professor Adjunto I, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, Pernambuco, Brasil.*

³ *Engenheiro Mecânico, Mestre. Gerente de manutenção, Empreiteira OAS, Guiné Bissau, África.*

⁴ *Engenheiro Mecânico, DSc. Professor Adjunto III, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil.*

⁵ *Engenheiro Mecânico, Dr. Professor Associado III, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil.*

⁶ *Engenheiro Metalúrgico. Dr. Professor Titular, Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, SP, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Desde a introdução do primeiro protótipo por Taylor e White no início do século XX, os aços rápidos vêm sendo utilizados na manufatura de ferramentas com uma extensa gama de aplicações, que levam em conta suas boas propriedades e que possibilitam em muitas destas aplicações uma alternativa para o metal duro (carboneto de tungstênio sinterizado). A microestrutura desse tipo especial de aço ferramenta após o tratamento térmico de endurecimento (austenitização, têmpera e subsequente revenimento), consiste de uma matriz de martensita e de carbonetos ricos em tungstênio, molibdênio e vanádio que promovem propriedades elevadas como resistência ao desgaste e tenacidade.^(1,2) Essa combinação de propriedades associada ao baixo custo faz desse material um dos favoritos para aplicações como as que estão envolvidas em operações de usinagem. O processo convencional de fabricação desses aços que envolve fusão, lingotamento e conformação a quente a microestrutura apresenta carbonetos grandes (em torno de 25 μm),⁽³⁾ distribuídos de maneira não uniforme e alinhados na direção da laminação, o que conduz à anisotropia de propriedades principalmente com redução da tenacidade. Por outro lado, as técnicas da metalurgia do pó têm sido aplicadas com sucesso, como um processo alternativo produzindo materiais com carbonetos menores e mais bem distribuídos possibilitando uma melhoria das propriedades e uma redução na anisotropia.⁽⁴⁾ A metalurgia do pó minimiza os problemas inerentes ao processo convencional, que produz microestruturas com carbonetos grosseiros atribuída à extensa faixa de resfriamento durante a solidificação.⁽⁵⁻⁷⁾ Esse trabalho de pesquisa contempla a produção de aços rápidos AISI M2 e M3:2 na forma de pastilhas e discos com e sem a adição de carboneto de nióbio (NbC).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

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

Esse trabalho consiste na obtenção de discos e pastilhas de aços rápidos AISI M2 e M3:2 com a adição de carboneto de nióbio (NbC) através de uma técnica de Mecanossíntese ou Moagem de Alta energia (Mechanical Alloying), compactação uniaxial a frio e sinterização a vácuo.

Foram usados pós comerciais, o pó dos aços rápidos AISI M2 e M3:2 do presente trabalho foram obtidos junto a Coldstream Inc. enquanto que o carboneto de nióbio (NbC) foi sintetizado a partir de pós elementares de nióbio (Nb) e grafite (C).

T

Tabela 1. Composição química do aço AISI M2 (% em peso)

	C	Mo	W	Mn	Cr	Si	V	Fe
Massa (%) M2	0,83	4,8	6,2	0,25	4,1	0,27	1,97	Bal.

Tabela 2. Composição química do pó do aço rápido M3:2 que consta do certificado de qualidade fornecido pela Coldstream Inc

	C	Mo	W	Mn	Cr	Si	V	Fe
Massa (%) M3:2	0,98	6,12	5,68	0,3	3,97	0,2	2,92	Bal.

Utilizou-se como mídia de moagem constituída de jarras construídas em aço inox AISI 304 L e bolas de aço SAE 52100 que são apresentadas na Figura 1.



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

Utilizaram-se bolas (esferas de aço) fabricadas em aço SAE 52100. O poder de moagem (ou relação massa de bola/massa de pós) foi de 10:1.

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 11,00 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.



Figura 2. Moinho



Figura 3. Moinho com a jarra

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.

Foi utilizada uma matriz cilíndrica com um furo passante e com uma base inferior móvel, além de um punção cilíndrico; tanto a matriz, quanto o punção e a base da matriz são feitos em aço AISI D6, fornecido pela Villares Metals (nome comercial VC 131) temperado e revenido fabricando-se discos com dimensões aproximadas de 11,00 mm de diâmetro e 4,00 mm de espessura, ou seja, após as compactações obtivemos os denominados compactados verdes

Devido a escassez do Carboneto de nióbio (NbC) uma vez que a CBMM Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (Grupo Moreira Salles) não disponibilizar mais o NbC no mercado nacional o que obrigou a sintetização desse insumo em nosso laboratório. Para tal adquiriu-se pós de nióbio metálico e de grafite (carbono) e iniciou-se uma investigação para sintetizar o NbC a partir desses pós elementares e utilizando-se o moinho vibratório SPEX. Foi preparada uma mistura desses componentes, utilizando-se um excesso de 10% de C em relação à estequiometria de formação de NbC. A relação fica: 1Nb : 1,1C. Os produtos de moagem das misturas foram caracterizados por difração de raios-X e por microscopia eletrônica de varredura (MEV). A síntese do carboneto de nióbio foi objeto de um trabalho anterior.

2.2 Sinterizações dos Aços Rápidos por Sinterização com Fase Líquida

Os pós dos aços rápidos AISI M2 e M3:2 fornecidos pela Coldstream Inc. foram compactados a uma pressão de 700 MPa numa prensa hidráulica do Compolab do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE. Ao aço rápido M3:2 adicionou-se 0,3% em massa de carbono na forma de grafite uma vez que o pó fornecido pela Coldstream Inc. apresentava um teor de carbono de 0,98% abaixo portanto do que preconiza a norma ASTM A600-92a 'Standard Specification for Tool Steel High Speed'⁽⁷⁾ que está na faixa de 1,15 a 1,25%. Os aços rápidos ao molibdênio AISI M2 e M3:2 com a adição de 0,3% de grafite foram sinterizados num forno a vácuo (10^{-5} Torr.) do Laboratório de Metalurgia do Pó do do CCTM - Centro de ciências e Tecnologia de Materiais do IPEN – instituto de pesquisas Energéticas e Nucleares a 1270 °C e 1240 °C , repectivamente. Os aços AISI M2 e M3:2 com adição de carboneto de nióbio (NbC) foram sinterizados a vácuo (10^{-5} Torr.) num forno do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRN na temperatura de 1250° C durante 1,0 horas numa taxa de aquecimento de 20° C/min. O ciclo de sinterização e o forno utilizados são apresentados nas Figuras 4 e 5.

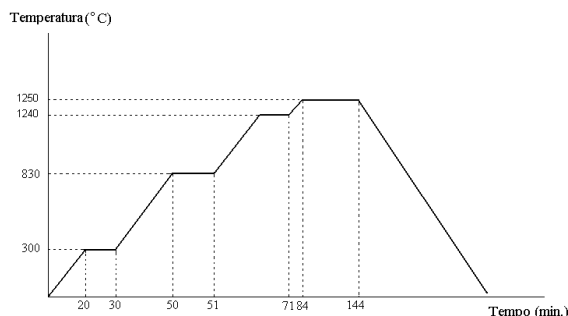


Figura 4. Ciclo de sinterização dos aços rápidos AISI M2 e M3:2 para a temperatura de 1250 °C.



Figura 5. Forno a vácuo do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRN (10^{-5} Torr.)

2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura e Espectroscopia Dispersiva de Raios X dos Pós e dos Sinterizados

A microscopia eletrônica de varredura dos pós dos aços rápidos AISI M2 e M3:2 com e sem a adição de carboneto de nióbio (NbC), processados por moagem de alta energia foram executados e as análises de composições químicas foram realizadas por espectroscopia dispersiva de raios X, executadas no Departamento de Física da UFPE por meio de um microscópio eletrônico de varredura com EDS acoplado “JEOL, JSM-5900”.

2.5 Dureza dos Aços Rápidos AISI M2 e M3:2 com e sem a Adição de Carboneto de Nióbio (NbC) 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 aços rápidos AISI M2 e M3:2 com e sem a adição de carboneto de nióbio (NbC). Foram realizados 5 ensaios de dureza para cada amostra.

2.6 Densidade

As densidades geométricas do sinterizado e do compactado foram calculadas, respectivamente, pelas relações: massa do compactado / volume do compactado e massa do sinterizado / volume do sinterizado. Na determinação da massa utilizou-se uma balança analítica digital.

3 RESULTADOS

3.1 Microscopia Eletrônica de Varredura dos Pós dos Aços Rápidos Aisi M2 e M3:2 com a Adição de Carboneto de Nióbio (NbC) Processados por MAE

Os pós dos aços rápidos AISI M2 e M3:2 submetidos a um procedimento de moagem de alta energia num moinho do tipo vibratório ou SPEX foram analisados no que diz respeito a micro-análise através de uma técnica de espectroscopia de baixa energia dispersiva de raios-x (EDS). Observou-se que obteve-se com sucesso a incorporação do carboneto de nióbio (NbC) nas partículas dos aços rápidos M2 e M3:2, para todas as condições de moagem de alta energia, como se verifica pelos picos correspondentes ao nióbio (Nb) nos espectros de baixa energia dispersiva de raios-x como apresentado nas Figuras 6 e 7 para o AISI M2 e 8 e 9 para o aço rápido AISI M3:2.

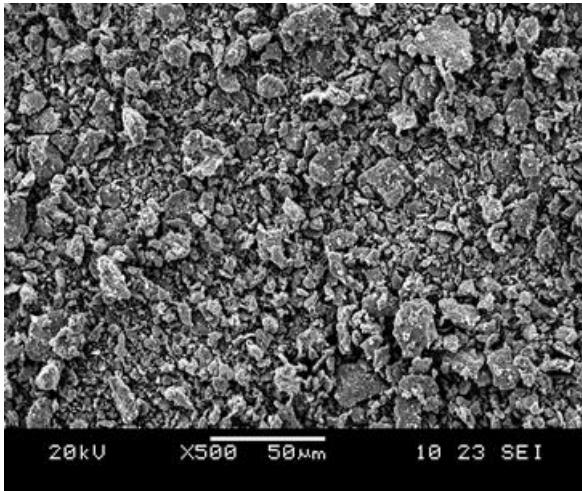


Figura 6. Aço rápido M2 + NbC – 60 min. de MAE.

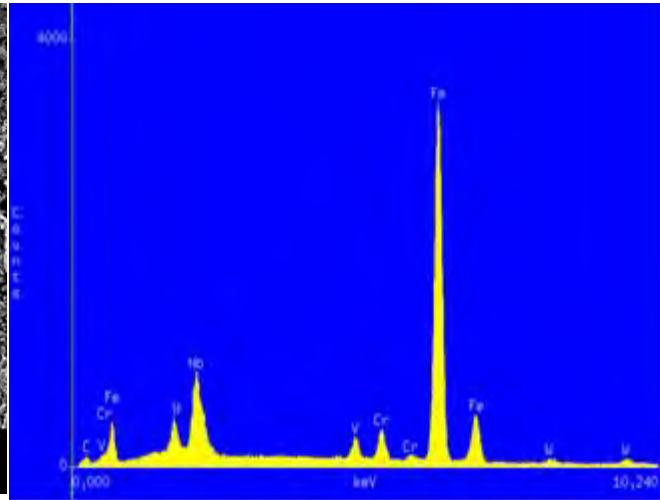


Figura 7. Espectro da micro-análise de EDS do aço rápido AISI M2 + NbC processado por moagem de alta energia durante 60 minutos.

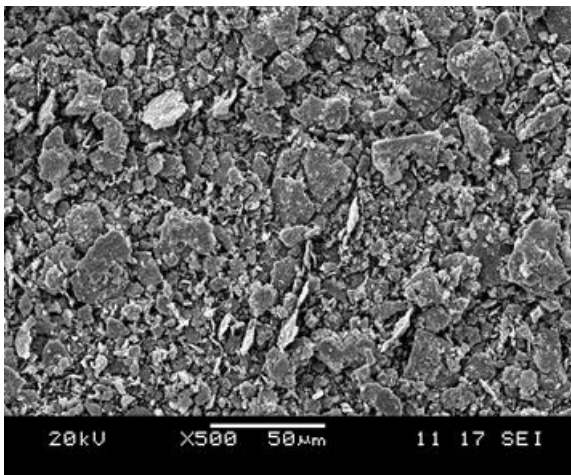


Figura 8. Aço rápido M3:2 + NbC – 60 min. de MAE.

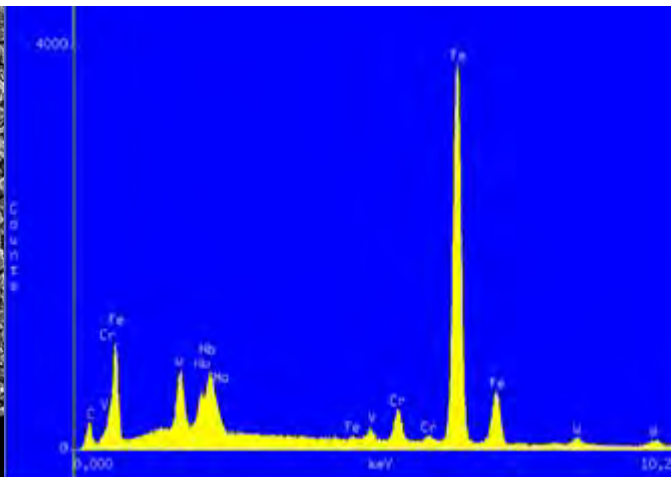


Figura 9. Espectro da micro-análise de EDS do aço rápido AISI M3:2 + NbC processado por moagem de alta energia durante 60 minutos.

Nas moagens de alta energia dos aços rápidos AISI M2 e M3:2 verificou-se a inserção do carboneto de nióbio (NbC) na matriz do aço rápido e uma redução significativa do tamanho de partícula de 30 para 60 minutos de MAE.

3.2 Sinterização dos Aços Rápidos AISI M2 e M3:2 com e sem a Adição de NbC

As Figuras 10 e 11 apresentam as pastilhas dos aços rápidos AISI M2 e M3:2 sem reforço de carboneto de nióbio (NbC):



Figura 10. Pastilhas do aço rápido M2 sem reforço de NbC sinterizado a vácuo.



Figura 11. Pastilhas do aço rápido M3:2 sem reforço de NbC sinterizado a vácuo.

3.3 Densidade dos Aços Rápidos AISI M2 e M3:2 sem a Adição de NbC

Os resultados de densificação dos aços rápidos AISI M2 e M3:2 são apresentados na Tabela 3:

Tabela 3. Densificação dos aços rápidos AISI M2 e M3:2.

Aço rápido	Densificação (%)
AISI M2	92,544 ± 1,395
AISI M3:2	92,837 ± 0,233

O gráfico da Figura 12 apresenta os resultados de densificação dos aços rápidos AISI M2 e M3:2 sem a adição de carboneto de nióbio (NbC) sinterizados a vácuo.

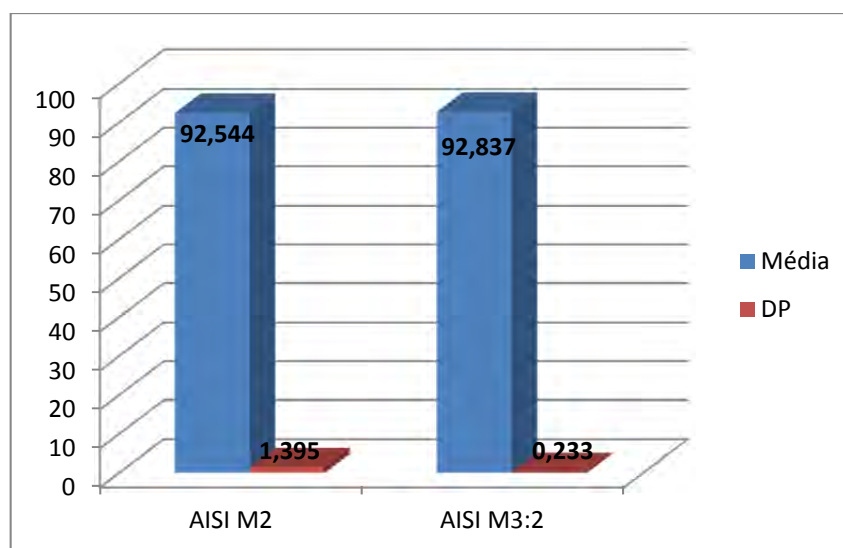


Figura 12. Resultados de densificação dos aços rápidos AISI M2 e M3:2 sem a adição de carboneto de nióbio (NbC) sinterizados a vácuo.

3.4 Dureza dos Aços rápidos AISI M2 e M3:2 sem a Adição de Carboneto de Nióbio Sinterizados a Vácuo

Os resultados de dureza Vickers (HV) dos aços rápidos AISI M2 e M3:2 são apresentados na Tabela 4 e no gráfico da Figura 13:

Tabela 4. Dureza Vickers (HV) dos aços rápidos AISI M2 e M3:2

Aço rápido	Dureza Vickers (MPa)
AISI M2	96,307 ± 4,571
AISI M3:2	88,423 ± 6,884

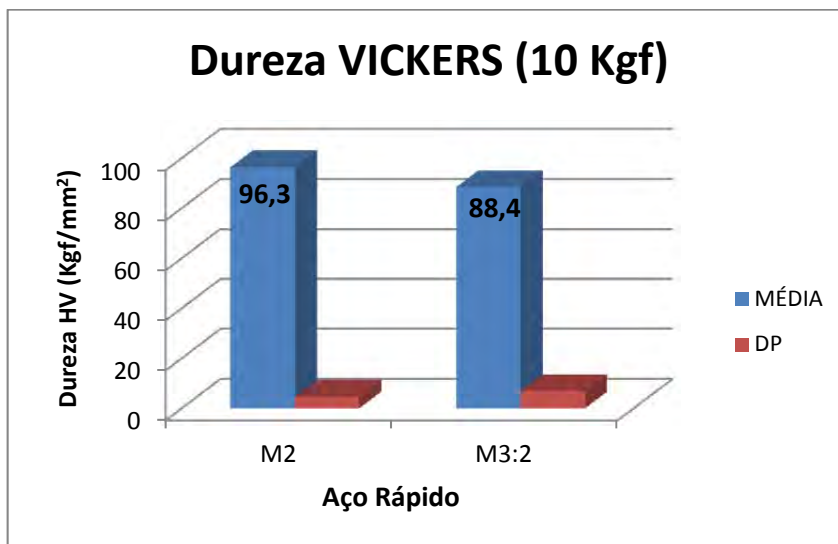


Figura 13. Resultados de dureza Vickers dos aços rápidos AISI M2 e M3:2 sem a adição de carboneto de nióbio (NbC) sinterizados a vácuo.

3.5 Sinterização dos Aços Rápidos AISI M2 e M3:2 com a Adição de NbC

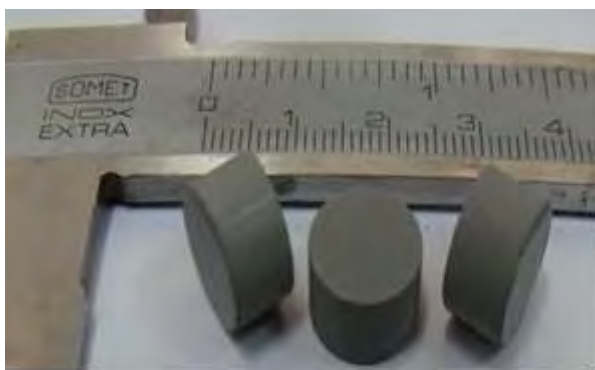


Figura 14. Pastilhas sinterizadas do aço rápido AISI M2 com adição de carboneto de nióbio (NbC).



Figura 15. Pastilhas sinterizadas do aço rápido AISI M3:2 com adição de carboneto de nióbio (NbC).

3.6 Densidade dos Aços Rápidos AISI M2 e M3:2 com a Adição de Carboneto de Nióbio Sinterizados a Vácuo

Os resultados de densificação dos aços rápidos AISI M2 e M3:2 são apresentados na Tabela 5:

Tabela 5. Densificação dos aços rápidos AISI M2 e M3:2 com a adição de NbC

Aço rápido	Densificação (%)
AISI M2 + 6% de NbC	92,883 ± 0,097
AISI M3:2+ 6% de NbC	95,423 ± 0,351

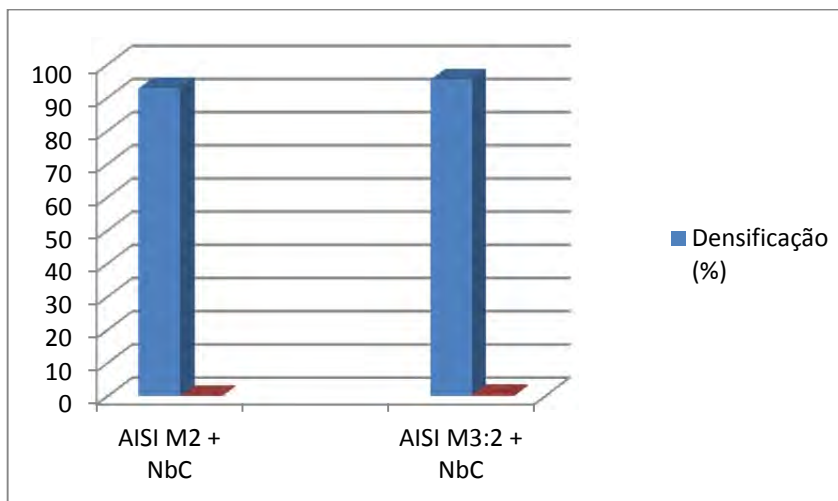


Figura 16. Resultados de densificação dos aços rápidos AISI M2 e M3:2 com a adição de carboneto de nióbio (NbC) sinterizados a vácuo.

3.7 Dureza dos Aços Rápidos AISI M2 e M3:2 com a Adição de Carboneto de Nióbio Sinterizados a Vácuo

Os resultados de dureza Vickers (HV) dos aços rápidos AISI M2 e M3:2 são apresentados na Tabela 6:

Tabela 6. Resultados de dureza Vickers dos aços rápidos AISI M2 e M3:2

Aço rápido	Dureza Vickers (Mpa)
AISI M2 + 6% de NbC	72,000 ± 2,660
AISI M3:2+ 6% de NbC	84,800 ± 1,080

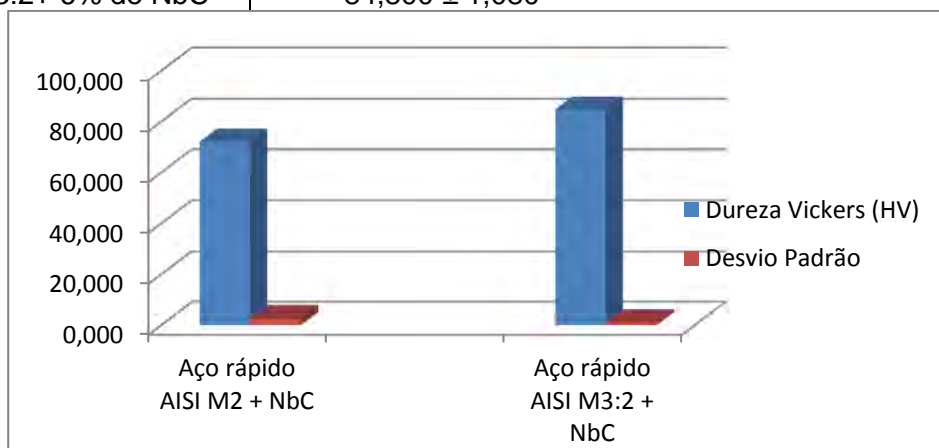


Figura 17. Resultados de dureza Vickers dos aços rápidos AISI M2 e M3:2 com adição de carboneto de nióbio (NbC) sinterizados a vácuo.

3.8 MEV dos Aços Rápidos AISI M2 e M3:2 com e sem a Adição de NbC

As Figuras 18,19, 20 e 21 apresentam as fotomicrografias de MEV dos aços rápidos AISI M2 e M3:2 com e sem a adição de 6% de NbC:

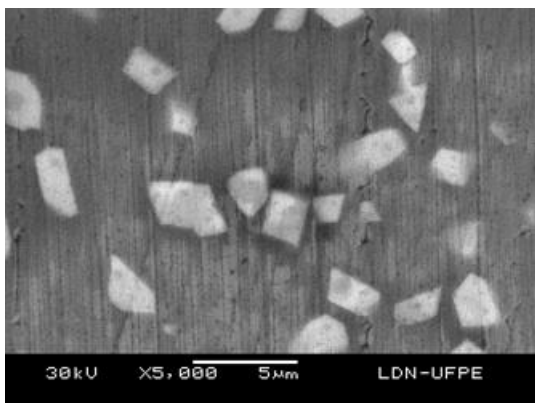


Figura 18. Imagem de MEV do aço rápido AISI M2 sem a adição de NbC.

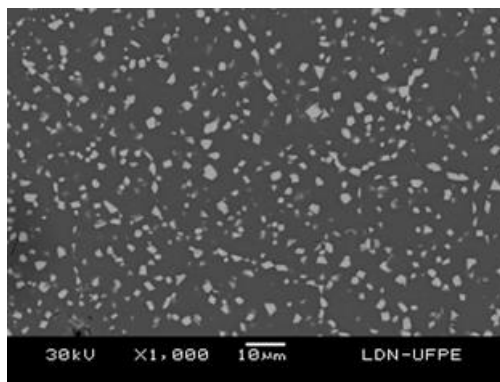


Figura 19. Imagem de MEV do aço rápido AISI M3:2 sem a adição de NbC.

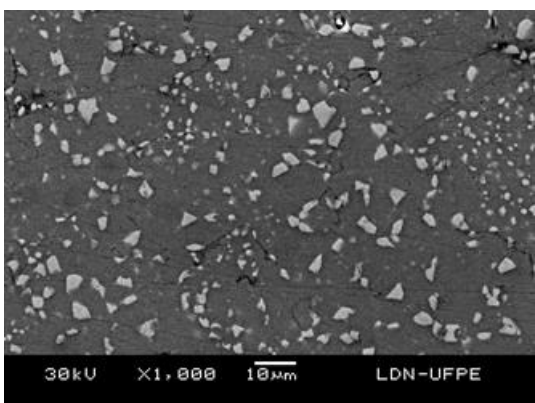


Figura 20. Imagem de MEV do aço rápido AISI M2 com a adição de NbC.

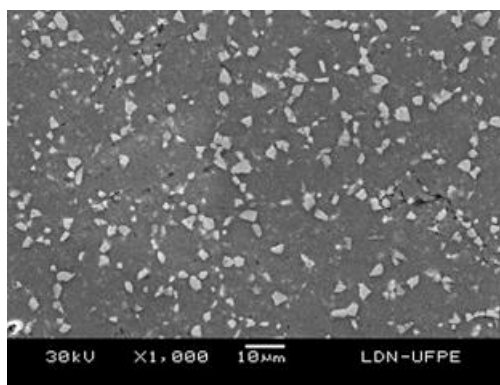


Figura 21. Imagem de MEV do aço rápido AISI M3:2 com a adição de NbC.

4 DISCUSSÃO

Os pós dos aços rápidos AISI M2 e M3:2 submetidos a um procedimento de moagem de alta energia num moinho do tipo vibratório ou SPEX foram analisados no que diz respeito a micro-análise através de uma técnica de espectroscopia de baixa energia dispersiva de raios-x (EDS). Observou-se que se obteve com sucesso a incorporação do carboneto de nióbio (NbC) nas partículas dos aços rápidos M2 e M3:2, para todas as condições de moagem de alta energia, como se verifica pelos picos correspondentes ao nióbio (Nb) nos espectros de baixa energia dispersiva de raios-x.

Constatou-se por meio dos resultados obtidos (MEV) que a moagem por 60 minutos em moinho de alta energia SPEX proporcionou, apesar da formação de plaquetas, boa distribuição do carboneto na matriz metálica, resultando em misturas mais homogêneas relativamente ao tempo de moagem de 30 minutos. Pode-se perceber que houve incorporação das partículas duras de carboneto na matriz de ferro, formando partículas compósitas. Devido a mais alta energia do SPEX, pós mais finos puderam ser obtidos em tempos menores de moagem, no entanto, para o tempo de 30 minutos foi constatada a presença de plaquetas, caracterizando microsoldagem de partículas de ferro, com correspondente formação de partículas de tamanho maior.

Obteve-se para os aços rápidos AISI M2 e M3:2 sem a adição de carboneto de nióbio (NbC) sinterizados a vácuo uma relativamente adequada densificação em conformidade com a literatura,⁽⁸⁾ não obstante resultados melhores podem ser

obtidos por uma melhor adequação da temperatura de sinterização desses aços rápidos ao molibdênio.

O gráfico da Figura 16 apresenta os resultados de densificação dos aços rápidos AISI M2 e M3:2 com a adição de carboneto de nióbio (NbC) sinterizados a vácuo. Observa-se uma melhor densificação para esses aços rápidos relativamente aos mesmos sem a adição da fase cerâmica de reforço. Os aços rápidos AISI M2 e M3:2 com e sem a adição de carboneto de nióbio apresentaram uma melhor densificação quando comparados aos seus similares classe AISI M2.

A adição do carboneto de nióbio (NbC) ao aço rápido AISI M2 pela observação das micrografias de microscopia eletrônica de varredura (MEV) não evidenciaram uma maior densificação, ou melhor, uma menor quantidade de porosidade aberta como seria de esperar para a temperatura de sinterização de 1250 °C devido a um maior teor de carbono proveniente da adição do acima citado carboneto de nióbio (NbC). No entanto, os resultados de densificação desse aço rápido AISI M2 com a adição do carboneto de nióbio apresenta uma melhoria acentuada de densificação com a incorporação da fase cerâmica de reforço relativamente ao aço rápido sem carboneto de nióbio.^(9,10)

O aço rápido ao molibdênio AISI M3:2 com adição de carboneto de nióbio (NbC) apresentou uma melhor densificação relativamente ao seu similar sem a incorporação da fase de reforço (NbC) o que é consistente com as micrografias de microscopia eletrônica de varredura (MEV) observadas e com a literatura.⁽¹¹⁾

5 CONCLUSÕES

1. O processo de moagem de alta energia (MAE) propiciou a inserção do carboneto de nióbio (NbC) nas matrizes dos aços rápidos AISI M2 e M3:2 como observado nas imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e nos espectros de Espectroscopia de Baixa Energia Dispersiva de Raios-X (EDS), promovendo ainda uma redução do tamanho de partícula com o aumento do tempo de moagem de 30 minutos para 60 minutos;
2. A técnica de Metalurgia do Pó (MP) de moagem de alta energia (MAE), seguida de compactação uniaxial a frio e sinterização a vácuo produziu pastilhas e discos dos aços rápidos AISI M2 e M3:2 com aceitáveis resultados de densificação;
3. Os resultados de densificação apresentaram-se um pouco abaixo do ideal (em torno de 98%);
4. Os resultados de dureza apresentaram-se relativamente baixos o que é interessante nesses aços rápidos ao molibdênio AISI M2 e M3:2 com e sem a adição de carboneto de nióbio (NbC) por que dispensa eventuais tratamentos térmicos de recozimento;
5. As micrografias de microscopia eletrônica de varredura (MEV) apresentaram uma melhor microestrutura para o aço rápido AISI M3:2 relativamente ao aço rápido AISI M2 com e sem a adição do carboneto de nióbio (NbC).

REFERÊNCIAS

- 1 Beiss, P., Wahling, R. and Duda, D. – Toughness of Vacuum Sintered P/M High Speed Steels- Modern Developments in Powder Metallurgy, Volumes 15-17, p-331-357, 1985.
- 2 Araujo Filho – Estudo Comparativo de Aços Rápidos AISI M3:2 Produzidos por Diferentes Processos de Fabricação – Tese de Doutorado- USP – 2006.

- 3 Neumeyer, T. A. and Kasak, A. - Grain size of high-speed tool steels - Metallurgical Transactions, Vol. 3, p. 2281, August, 1972.
- 4 Brewin, P. R. – PM High Speed Steels – Institute of Metals, p-296-300, 1991.
- 5 Capdevila, C., Chen, Y. L., Lassen, N. C. K., Jones, A. R. and Bhadeshia, H. K. D. H. - Heterogeneous deformation and recrystallisation of iron base oxide dispersion strengthened PM2000 alloy - Materials Science and Technology June Vol. 17 p. 693-699, 2001.
- 6 Ray, P. and Pal, P. K. – High Speed Steel Semis – Alternate Production Routes. World Conference on Powder Metallurgy, Vol 1, p. 159-169, 1990.
- 7 Baglyuk, G. A. and Poznyak, L. A. - Structure Formation During Activated Sintering of High Speed Steel – Theory and Technology of Sintering, Heat, and Chemical Heat-Treatment Processes, Powder Metallurgy and Metal Ceramics, Vol. 43, Nos. 11-12, p.570-575, 2004.
- 8 Igharo, M., Brewin, P. and Wood, J. - Development of sintered high speed steel alloys for wear applications - World Conference on Powder Metallurgy, Vol 1, p. 266-271, 1990.
- 9 ASTM A600-92a ‘Standard Specification for Tool Steel High Speed’.
- 10 Baglyuk, G. A. and Poznyak, L. A. - The Sintering of Powder Metallurgy High-Speed Steel With Activating Additions - Powder Metallurgy and Metal Ceramics, Vol. 41, Nos. 7-8, 2002.
- 11 Paula Fernanda da Silva, Alexandre Bellegard Farina e Mário Boccalini Júnior - Ligas “Aço MATRIZ + NbC” - Caracterização no Estado Bruto de Fundição - Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, v.4, n.3, p. 43-49,. 2008.