

# OBSERVAÇÕES FRACTOGRÁFICAS E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE AÇOS RÁPIDOS AISI M3:2 SINTERIZADOS A VÁCUO<sup>1</sup>

Oscar Olimpio de Araujo Filho<sup>2</sup>  
Cezar Henrique Gonzalez<sup>3</sup>  
Severino Leopoldino Urtiga Filho<sup>4</sup>  
Yogendra Prasad Yadava<sup>5</sup>  
Francisco Ambrozio Filho<sup>6</sup>

## Resumo

Aços rápidos são materiais de alta qualidade utilizados como ferramentas de corte e outras aplicações especiais. Devido a essas aplicações, aços rápidos devem apresentar propriedades mecânicas e tenacidade à fratura adequadas para severas condições de trabalho. Esse trabalho apresenta resultados de propriedades mecânicas e aspectos de fratura de um aço rápido ao molibdênio AISI M3:2 produzido por compactação uniaxial de pós de morfologia irregular atomizados a água seguida de sinterização a vácuo e submetido a tratamentos térmicos de endurecimento em diferentes temperaturas de austenitização, têmpera e triplo revenimento. Esse tipo de aço rápido foi submetido a ensaios de flexão em três pontos para avaliar a resistência à ruptura transversal. As superfícies de fratura dos corpos de prova desses aços rápidos foram observadas através de uma técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e seus aspectos foram correlacionados com os resultados de propriedade mecânica e as microestruturas obtidas.

**Palavras-chave:** Aço rápido AISI M3:2; Metalurgia do pó; Tratamento térmico; Fractografia.

## FRACTOGRAPHIC OBSERVATIONS AND MECHANICAL PROPERTIES OF AISI M3:2 VACUUM SINTERED HIGH-SPEED STEELS

### Abstract

High speed steels are high quality materials used as cutting tools and other special applications. In order to these applications, HSS must present suitable mechanical properties as fracture toughness according to the hard work services. In this work a MP AISI M3:2 high speed steel processed by vacuum sintering and hardened by different conditions of heat-treatment was submitted to bending test and had its property of transverse rupture strength evaluated. The surface fractures of the bending tests samples were observed by means of SEM and had their features related with the mechanical properties results.

**Key words:** AISI M3:2 HSS; Powder metallurgy; Heat treatment; Fractography.

<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> Engenheiro Mecânico. Doutor em Tecnologia Nuclear pelo (IPEN), CNEN/SP; Professor Adjunto I do Departamento de Engenharia Mecânica, UFPE, Recife, PE, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro Mecânico. Prof. Doutor Adjunto III do Departamento de Engenharia Mecânica, UFPE, Recife, PE, Brasil.

<sup>4</sup> Engenheiro Mecânico., Prof. Doutor Associado II do Departamento de Engenharia Mecânica, UFPE, Recife, PE, Brasil.

<sup>5</sup> Engenheiro Mecânico. Prof. Doutor Adjunto IV do Departamento de Engenharia Mecânica, UFPE, Recife, PE, Brasil.

<sup>6</sup> Engenheiro Metalurgista. Prof. Dr. do IPEN, CNEN/SP, USP, São Paulo, SP, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Aços rápidos são materiais para ferramentas largamente desenvolvidos para aplicações em operações de usinagem. Inicialmente, os aços rápidos destinaram-se à confecção de ferramentas de corte, tais como bits, brocas, alargadores, fresas, facas *fellows*, machos e fresas helicoidais. Posteriormente, aplicações como matrizes, punções e componentes estruturais em que o binômio, elevada solitação/alta temperatura, seja um requisito como no caso de mancais para aeronaves e componentes de bombas. Há duas classificações ou dois grupos, empregadas pela AISI relacionando 25 aços rápidos: aços rápidos ao molibdênio (grupo M) e aços rápidos ao tungstênio (grupo T). O molibdênio foi substituindo o tungstênio gradualmente em decorrência da escassez do último constituindo atualmente a maior parte dos aços rápidos produzidos (mais de 95% nos EUA).

A metalurgia do pó (MP) do inglês *Powder Metallurgy (PM)* está se tornando cada vez mais popular na produção de componentes de aço de 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>(1)</sup>. Tradicionalmente, a metalurgia do pó pode ser simplesmente definida como uma técnica em que um metal sólido, liga ou cerâmica na forma de partículas secas, normalmente com um diâmetro máximo inferior a 150  $\mu\text{m}$ , são convertidas em um componente de engenharia, agregando ainda uma forma, acabamento predeterminados próximos dos finais e possuindo propriedades que possibilitam a sua utilização na maioria dos casos sem ulteriores processamentos. <sup>(1-3)</sup> Constitui portanto, um processo largamente utilizado na manufatura de ferramentas de corte de alta performance de aço rápido disponibilizando itens na forma de barras, formas próximas da final (*near-net shape*) e insertos indexáveis para ferramentas de corte. <sup>(4,5)</sup> O desenvolvimento de uma distribuição fina e uniforme de carbonetos nos aços rápidos obtidos pelo processo convencional com aceitáveis propriedades mecânicas requer grandes reduções das secções o que acarreta elevados custos de produção. Segundo Mesquita e Barbosa, <sup>(6)</sup> várias opções têm sido propostas para refinar a estrutura dos aços rápidos, a maioria delas relacionadas com o aumento da taxa de resfriamento por ocasião da solidificação destacando-se a metalurgia do pó como a mais efetiva no refino da microestrutura inicial devido à elevada taxa de resfriamento durante a atomização. O processo da metalurgia do pó é tecnologicamente maduro e aços rápidos processados por essa técnica têm sido empregados em várias aplicações de usinagem e de trabalho a frio. A metalurgia do pó permite a obtenção de peças isentas de segregação (é uma característica tão importante que designa um processo, no caso o ASP, terminologia essa derivada das iniciais de *Anti-Segregation Process*), uniformidade da microestrutura e por conseguinte isotropia das propriedades mecânicas (o processo convencional produz microestruturas não-uniformes e anisotropia das propriedades mecânicas), uniformidade do tamanho de grão, uma dureza uniforme após o tratamento térmico, distribuição e tamanhos de carbonetos mais uniformes em secções maiores. <sup>(3,4)</sup> O tamanho dos grãos de austenita formados durante o tratamento de endurecimento é, geralmente, considerado como um importante fator na caracterização microestrutural dos aços rápidos. Grãos de austenita mais refinados são considerados vantajosos e trazem efeitos benéficos no que concerne às propriedades relevantes na performance das ferramentas de corte. A metalurgia do pó facilita a obtenção de estruturas de grãos

mais refinados nos aços rápidos.<sup>(2)</sup> Permite ainda, a obtenção de aços cujas composições inviabilizam a obtenção pelo processo convencional devido à segregação relacionada a problemas de trabalhabilidade a quente. Os tratamentos térmicos que se aplicam aos aços rápidos são basicamente os mesmos utilizados nos aços rápidos obtidos pelo processo convencional, no entanto, os primeiros têm uma resposta mais imediata e previsível devido à microestrutura mais uniforme e aos carbonetos mais refinados (tamanho ou espaçamento entre carbonetos menores).

Atualmente, aços rápidos sinterizados a vácuo não têm sido usados primariamente como materiais para ferramenta de corte. No entanto, a designação original foi preservada fazendo referência aos primeiros desenvolvimentos dessa classe de material que até então eram aplicados quase que exclusivamente como ferramenta de corte em operações de usinagem de metais, madeira, polímeros, etc... Nos dias de hoje, os aços rápidos têm sido substituídos em operações de usinagem por materiais com desempenho superior tais como metal duro (MD ou WC-Co), nitreto cúbico de boro (CBN) e Sialons.<sup>(5,6)</sup> Geralmente, aços rápidos sinterizados são produzidos via uma técnica convencional de compactação uniaxial a frio e sinterização a vácuo. Pós atomizados à água mais baratos e de qualidade mais baixa são utilizados. Entretanto, esses pós atomizados a água constituídos de partículas de morfologia irregular são particularmente apropriados para compactação uniaxial a frio pois possibilita o manuseio dos compactados a verde. Pós atomizados à água de aços rápidos podem ser compactados a frio em formas complexas com uma elevada produtividade em prensas mecânicas e hidráulicas. A densificação dos compactados ocorre pelo processo denominado de sinterização com fase líquida supersolidus. Existe uma diferença significativa entre a sinterização do metal duro (MD ou WC-Co) e a dos aços rápidos, ou seja, apesar do fato da densificação final ocorrer na presença de uma fase líquida em ambos os casos, recentes investigações acerca do metal duro (MD) mostra que a maior parte do processo de densificação (50% – 90%) ocorre no estado sólido e que a formação do líquido não altera a taxa de sinterização de maneira significativa. O processo de sinterização dos aços rápidos ocorre de maneira diferente, no sentido de que a densificação no estado sólido é negligenciável e que a sinterização começa efetivamente apenas depois que uma quantidade suficiente de líquido é formada nos contornos de grão e quando o compactado perde a sua rigidez.<sup>(3)</sup> De qualquer forma, na maioria dos casos, a sinterização dos aços rápidos ocorre a temperaturas relativamente elevadas (acima de 1.200°C). Entretanto, a vantagem principal dessa técnica de metalurgia do pó relativamente à sinterização com compactação isostática a quente é a produção em larga escala de produtos finais em formas pequenas e complexas agregando ainda pequenas tolerâncias dimensionais o que minimiza ou dispensa eventuais e ulteriores operações de acabamento.<sup>(7,8)</sup> Nesse trabalho pós atomizados a água de aços rápidos AISI M3:2 fornecidos pela Coldstream Inc., com e sem a adição de carbono na forma de grafite, foram compactados uniaxialmente a frio e sinterizados a vácuo e tiveram suas propriedades de resistência à ruptura transversal relacionadas com os aspectos das superfícies de fratura.

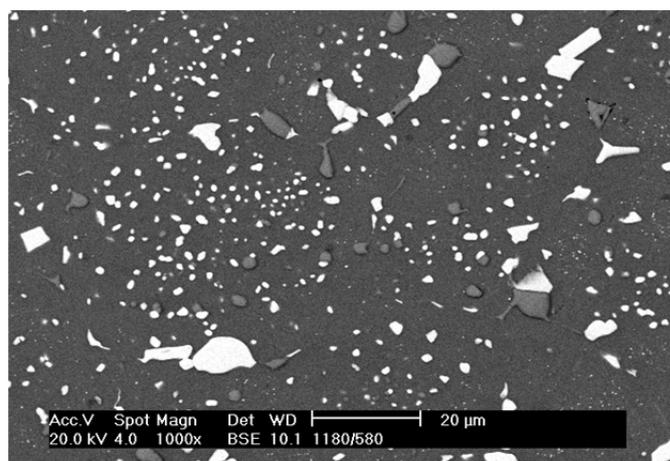
## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A composição química dos pós dos aços rápidos AISI M3:2 fornecido pela Coldstream Inc. é apresentada na Tabela 1.

**Tabela 1.** Composição química dos pós dos aços rápidos AISI M3:2

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

Os aços rápidos foram compactados uniaxialmente a frio a partir de pós atomizados a água, sinterizados a vácuo e submetidos a um adequado tratamento térmico de endurecimento, produzindo corpos de prova para o ensaio de flexão em três pontos para a determinação da resistência à ruptura transversal (TRS).



**Figura 1.** Micrografia de MEV do aço rápido AISI M3:2 sinterizado a vácuo a 1.263°C.

Após a sinterização, os aços rápidos AISI M3:2 foram submetidos ao tratamento térmico de endurecimento a 1.200°C e triplo revenimento a 540°C e rompidos para a determinação da resistência a ruptura transversal. As fractografias das superfícies de fratura foram obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Resistência à Ruptura Transversal

A Tabela 2 e o gráfico da Figura 2 apresentam os resultados de resistência à ruptura transversal (TRS) dos aços rápidos AISI M3:2 sinterizados a vácuo.

**Tabela 2.** Resistência à ruptura transversal do aço rápido AISI M3:2 sinterizados a vácuo

Temperatura de austenitização/Têmpera (°C)	1.140	1.160	1.180	1.200
TRS (MPa)	1.403 ± 313	1.314 ± 304	1.436 ± 302	1.083 ± 222

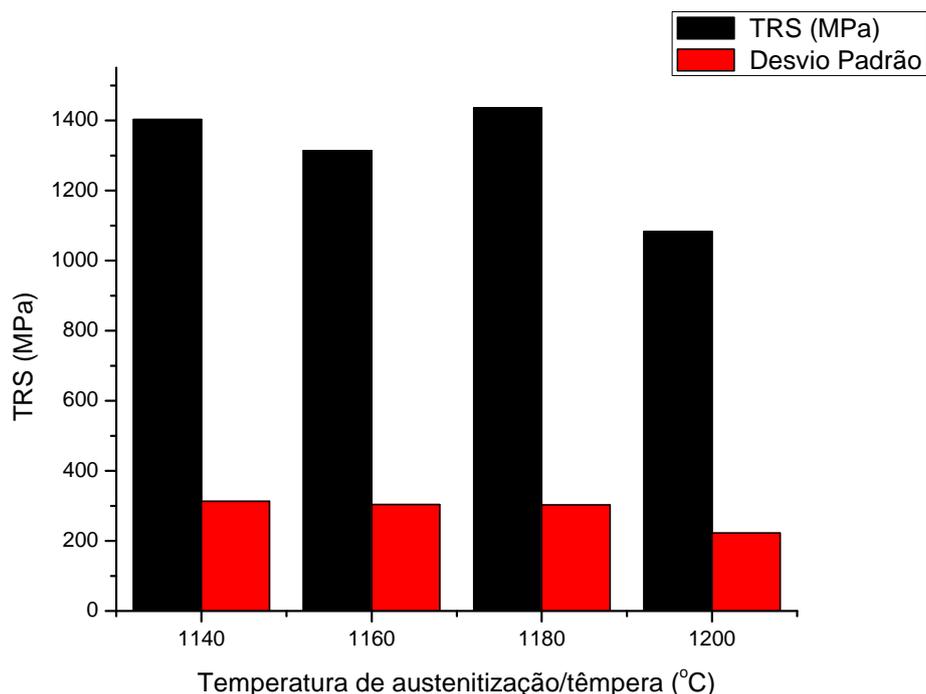


Figura 2. Resultados de TRS para o aço rápido AISI M3:2 sinterizados a vácuo

### 3.2 Dureza Rockwell C e Vickers dos Aços Rápidos AISI M3:2 Sinterizados a Vácuo

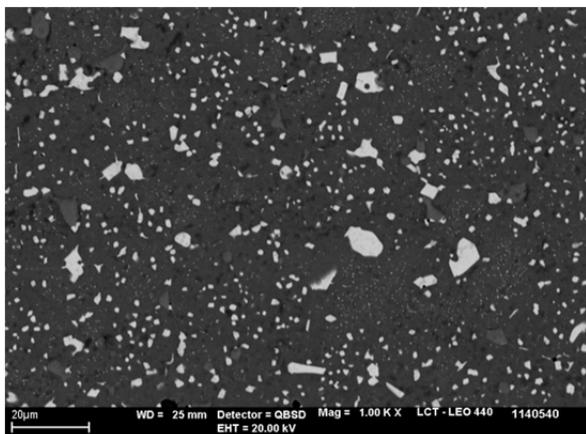
A Tabela 3 apresenta os resultados de dureza Rockwell C (HRC) e Vickers (HV) dos aços rápidos AISI M3:2 sinterizados a vácuo e submetido a diferentes procedimentos de tratamentos térmicos.

Tabela 3. Resultados de dureza Rockwell C (HRC) e Vickers (HV) dos aços rápidos AISI M3:2

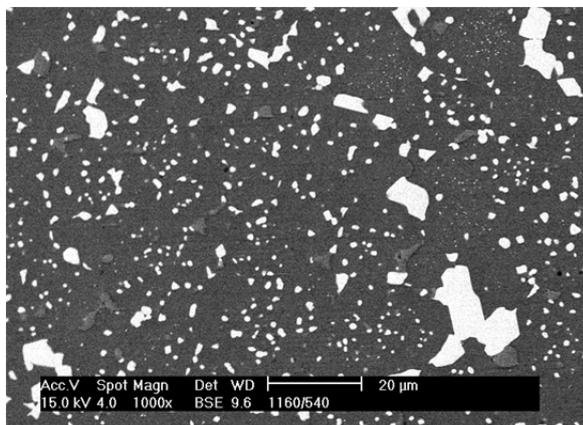
Temperatura de austenitização/Têmpera (°C)	1.140	1.160	1.180	1.200
Dureza Rockwell C (HRC)	62,7 ± 0,3	62,9 ± 0,2	63,9 ± 0,5	63,6 ± 0,5
Dureza Vickers (HV)	836 ± 3,4	898 ± 5,6	902 ± 13,8	907 ± 2,2

### 3.3 Microscopia Eletrônica de Varredura dos Aços Rápidos AISI M3:2 Sinterizados a Vácuo

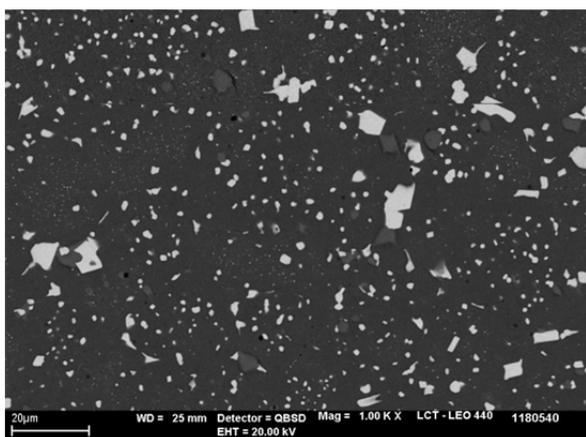
As Figuras 3 a 6 apresentam as micrografias de MEV dos aços rápidos AISI M3:2 sinterizados a vácuo submetidos a procedimentos de tratamento térmico de austenitização, têmpera ao ar e triplo revenimento nas temperaturas de 1.140°C, 1.160°C, 1.180°C e 1.200°C e 540°C, respectivamente. As microestruturas consistem de uma fase matriz de martensita revenida e carbonetos complexos dos tipos M<sub>6</sub>C (WFeC) e MC (VC).



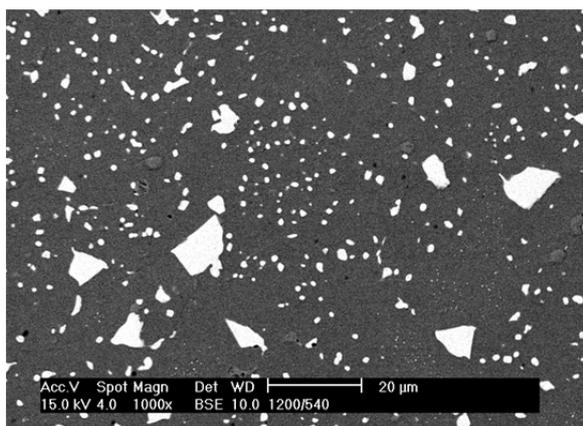
**Figura 3.** Micrografia de MEV do aço rápido AISI M3:2 sinterizado a vácuo, Austenitizado a 1.140°C e revenido a 540°C. Ataque químico: Nital a 3%. Elétrons retroespalhados.



**Figura 4.** Micrografia de MEV do aço rápido AISI M3:2 sinterizado a vácuo, Austenitizado a 1.160°C e revenido a 540°C. Ataque químico: Nital a 3%. Elétrons retroespalhados.



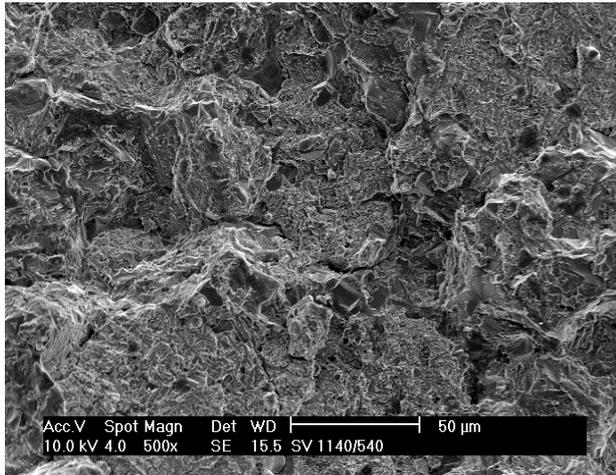
**Figura 5.** Micrografia de MEV do aço rápido AISI M3:2 sinterizado a vácuo, Austenitizado a 1.180°C e revenido a 540°C. Ataque químico: Nital a 3%. Elétrons retroespalhados.



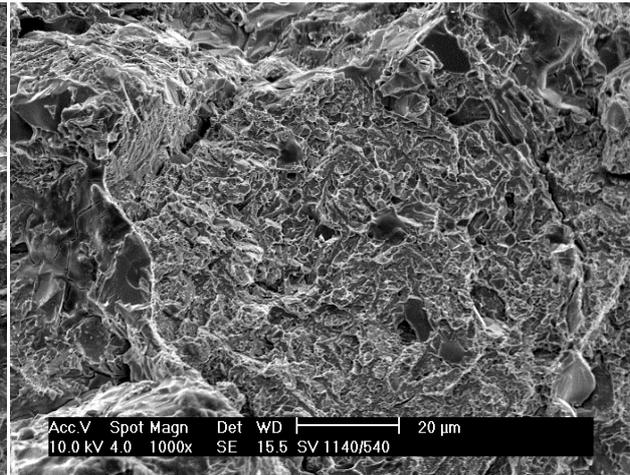
**Figura 6.** Micrografia de MEV do aço rápido AISI M3:2 sinterizado a vácuo, Austenitizado a 1.200°C e revenido a 540°C. Ataque químico: Nital a 3%. Elétrons retroespalhados.

### 3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura das Superfícies de Fratura dos Aços Rápidos AISI M3:2 Sinterizados a Vácuo

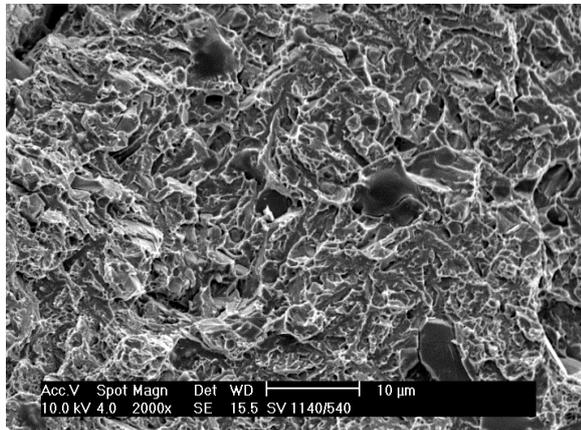
As Figuras 7 a 18 apresentam micrografias de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das superfícies de fratura dos aços rápidos ao molibdênio AISI M3:2 sinterizados a vácuo.



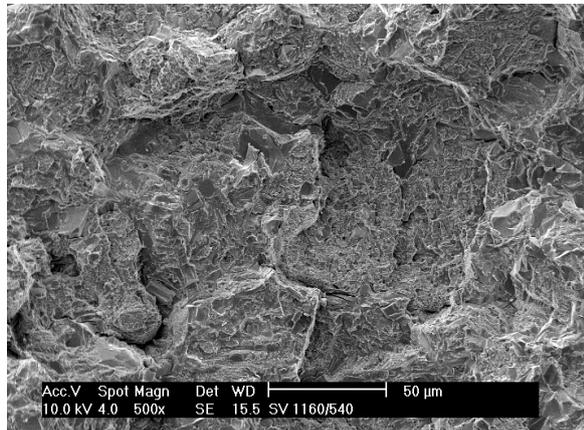
**Figura 7.** Imagem de MEV do aço rápido AISI M3:2 sinterizado a vácuo austenitizado a 1.140°C e triplamente revenido a 540°C.



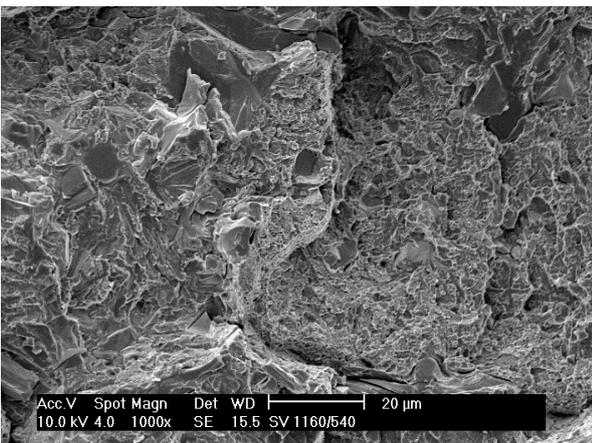
**Figura 8.** Imagem de MEV do aço rápido AISI M3:2 sinterizado a vácuo austenitizado a 1.140°C e triplamente revenido a 540°C.



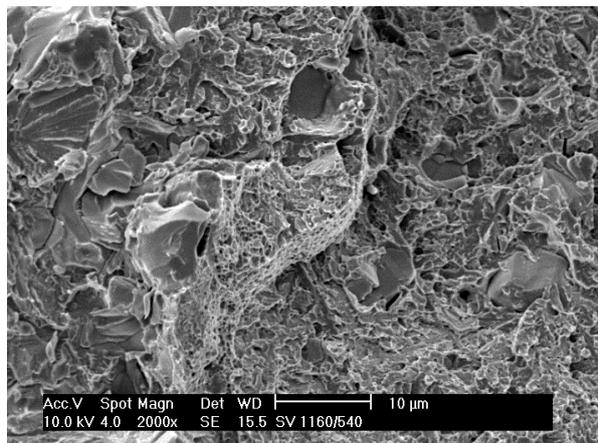
**Figura 9.** Imagem de MEV do aço rápido AISI M3:2 sinterizado a vácuo austenitizado a 1.140°C e triplamente revenido a 540°C.



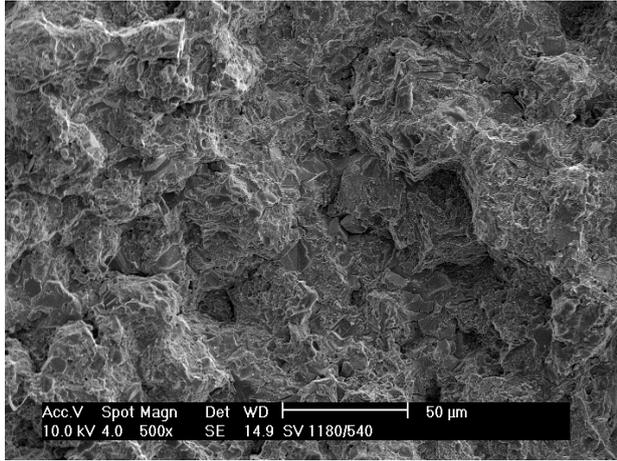
**Figura 10.** Imagem de MEV do aço rápido AISI M3:2 sinterizado a vácuo austenitizado a 1.160°C e triplamente revenido a 540°C.



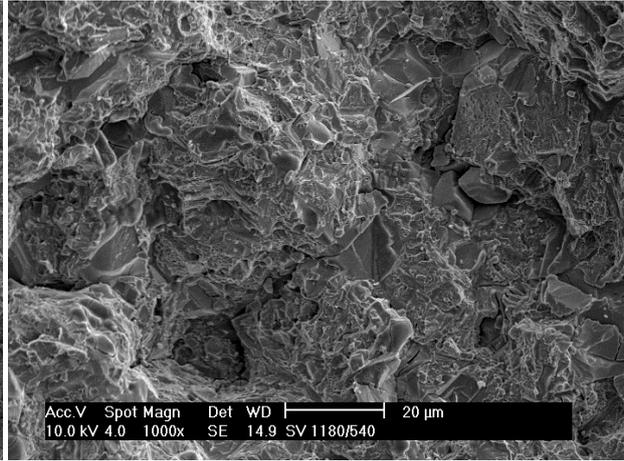
**Figura 11.** Imagem de MEV do aço rápido AISI M3:2 sinterizado a vácuo austenitizado a 1160°C e triplamente revenido a 540°C.



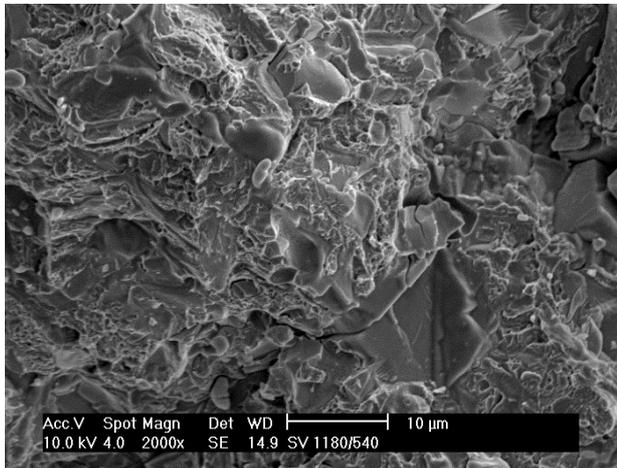
**Figura 12.** Imagem de MEV do aço rápido AISI M3:2 sinterizado a vácuo austenitizado a 1160°C e triplamente revenido a 540°C.



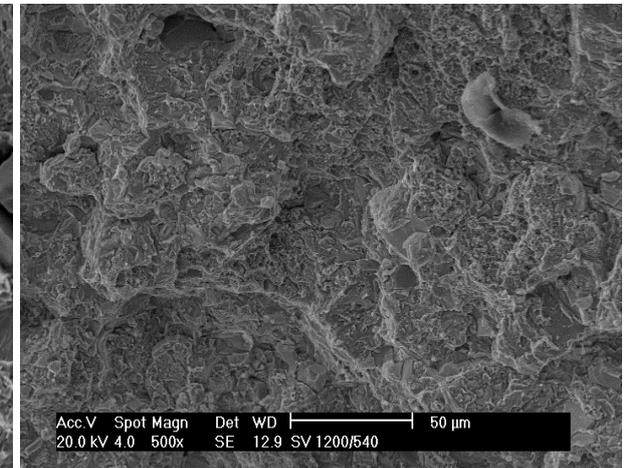
**Figura 13.** Imagem de MEV do aço rápido AISI M3:2 sinterizado a vácuo austenitizado a 1.180°C e triplamente revenido a 540°C.



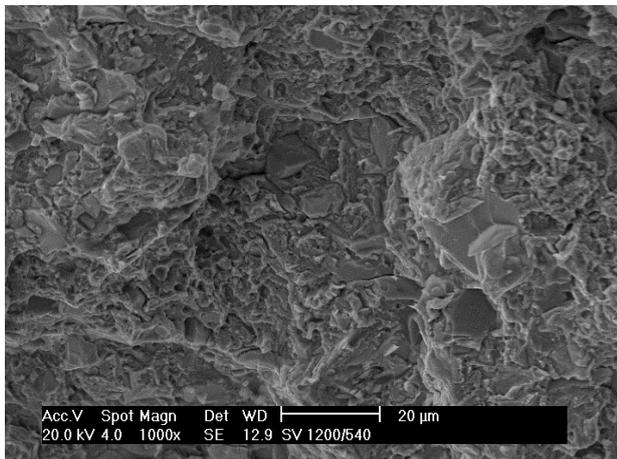
**Figura 14.** Imagem de MEV do aço rápido AISI M3:2 sinterizado a vácuo austenitizado a 1.180°C e triplamente revenido a 540°C.



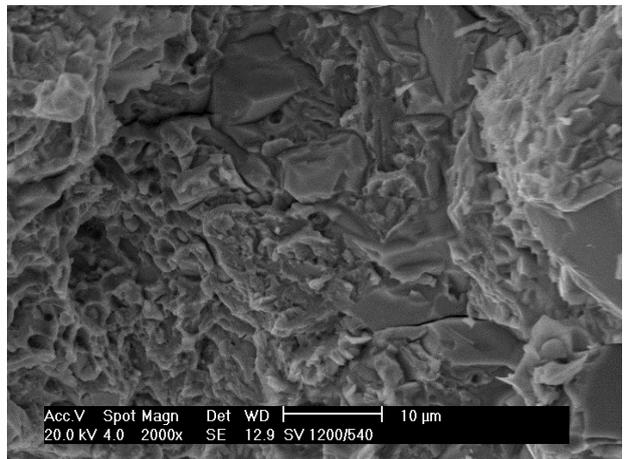
**Figura 15.** Imagem de MEV do aço rápido AISI M3:2 sinterizado a vácuo austenitizado a 1.180°C e triplamente revenido a 540°C.



**Figura 16.** Imagem de MEV do aço rápido AISI M3:2 sinterizado a vácuo austenitizado a 1.200°C e triplamente revenido a 540°C.



**Figura 17.** Imagem de MEV do aço rápido AISI M3:2 sinterizado a vácuo austenitizado a 1.200°C e triplamente revenido a 540°C.



**Figura 18.** Imagem de MEV do aço rápido AISI M3:2 sinterizado a vácuo austenitizado a 1.200°C e triplamente revenido a 540°C.

## 4 DISCUSSÃO

As Figuras de 5 a 16 apresentam as superfícies de fratura dos aços rápidos AISI M3:2 sinterizados a vácuo a partir de pós de morfologia irregular atomizados a água e submetidos a procedimentos de tratamento térmico de endurecimento (austenitização, seguida de têmpera ao ar e triplo revenimento) a 1.140°C, 1.160°C, 1.180°C e 1.200°C e triplo revenimento a 540°C. Em todas as micrografias das superfícies de fratura fica evidenciado características fractográficas típicas de aços rápidos produzidos com pós atomizados a água apresentando carbonetos de maiores dimensões e aspecto irregular mostrando também facetas de clivagem dos carbonetos maiores observados nas superfícies de fratura.<sup>(2)</sup> Os resultados de resistência à ruptura transversal e resistência à flexão (TRS) apresentam-se decrescentes para temperaturas de tratamento térmico de austenitização/têmpera crescentes. Os resultados de dureza Rockwell C e Vickers apresentam-se crescentes com aumento dessas temperaturas de tratamento térmico. Para as temperaturas de austenitização/têmpera menores (1.140°C e 1.160°C) o aspecto frágil da fratura comporta, no entanto, alguma porção de fratura do tipo taça-cone característica de fratura dúctil (Figuras 8, 9, 11 e 12). Já as superfícies de fratura para os mesmos aços austenitizados e temperados a 1.180°C e 1.200°C o aspecto da fratura é predominantemente frágil com alguma microdeformação.

Uma otimização das microestruturas dos aços rápidos AISI M3:2 sinterizados a vácuo com um controle mais acurado da temperatura de sinterização pode possibilitar um alcance de propriedades mecânicas melhoradas o que viabilizaria a utilização desses materiais de baixo custo como ferramentas de corte na fabricação de pastilhas para insertos reversíveis, fresas de topo, machos, alargadores, etc.<sup>(3)</sup>

## 5 CONCLUSÕES

- O aços rápidos AISI M3:2 sinterizados a vácuo a partir de pós atomizados a água e submetidos a austenitização e têmpera nas temperaturas de 1.140°C, 1.160°C, 1.180°C e 1.200°C e triplamente revenidos a 540°C, devido a sua microestrutura de martensita revenida com carbonetos grosseiros e de morfologia irregular apresentaram baixo resultados de resistência a flexão (resistência a ruptura transversal) e comportamento eminentemente frágil o que não recomenda a sua utilização como ferramenta de corte mas possibilita a sua utilização em aplicações em que o requisito seja a resistência ao desgaste;
- em todas as micrografias das superfícies de fratura dos aços rápidos AISI M3:2 sinterizados a vácuo fica evidenciado características fractográficas típicas de aços rápidos produzidos com pós atomizados a água apresentando carbonetos de maiores dimensões e aspecto irregular mostrando também facetas de clivagem dos carbonetos maiores observados nas superfícies de fratura;
- uma otimização das microestruturas dos aços rápidos AISI M3:2 sinterizados a vácuo com um controle mais acurado da temperatura de sinterização pode possibilitar um alcance de propriedades mecânicas melhoradas o que viabilizaria a utilização desses materiais de baixo custo como ferramentas de corte na fabricação de pastilhas para insertos reversíveis, fresas de topo, machos, alargadores etc.; e

- os resultados de resistência à ruptura transversal e resistência à flexão (TRS) apresentam-se decrescentes para temperaturas de tratamento térmico de austenitização/têmpera crescentes. Os resultados de dureza Rockwell C e vickers apresentam-se crescentes com aumento dessas temperaturas de tratamento térmico. Para as temperaturas de austenitização/têmpera menores (1.140°C e 1.160°C) o aspecto frágil da fratura comporta, no entanto, alguma porção de fratura do tipo taça-cone característica de fratura dúctil (Figuras 8, 9, 11 e 12). Já as superfícies de fratura para os mesmos aços austenitizados e temperados a 1.180°C e 1.200°C o aspecto da fratura é predominantemente frágil com alguma microdeformação.

### **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), ao IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares) a FACEPE (Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco), ao CNPq e a CAPES.

### **REFERÊNCIAS**

- 1 HOYLE, G. High Speed Steels. London: Butterworth, 1988.
- 2 Andrade, A. H., Cordeiro de Souza, O, Araujo Filho, O.O., Ambrozio Filho, F Observações Fractográficas Sobre a Resistência Mecânica de Aços Rápidos Sinterizados a Vácuo – 60º Congresso anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – Belo Horizonte, 2005.
- 3 Araujo Filho – Estudo Comparativo de Aços Rápidos AISI M3:2 Produzidos por Diferentes Processos de Fabricação – Tese de Doutorado- USP – 2006.
- 4 Boccalini, M. and Goldstein, H.- Solidification of high speed steels, International Materials Reviews, Vol. 46, No. 2, 2001.
- 5 Wilson, R. – Metallurgy and Heat Treatment of Tool Steels. McGraw-Hill Book Company (UK) Limited, 1975. 11. Beiss, P. and Wähling R. - Transverse Rupture Strength and Plastic Work of Bending of Two PM Tool Steels- World Conference on Powder Metallurgy , Vol 1, p. 140-143, 1990.
- 6 Mesquita, R. A. and Barbosa, C. A.- Spray Forming High Speed Steel – Properties and processing, Materials Science and Engineering A 383, p. 87-95, 2004.
- 7 How important is P/M HSS compared with ferrous P/M in general. International Journal of Powder Metallurgy 36/8 p-33, November/December, 2000.
- 8 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.