



# TENACIDADE À FRATURA DE AÇOS RÁPIDOS AISI M3:2 SINTERIZADOS A VÁCUO<sup>1</sup>

Oscar Olimpio de Araujo Filho<sup>2</sup>  
Wanderson Santana da Silva<sup>3</sup>  
Paula Fernanda da Silva<sup>4</sup>  
Mauricio David Martins das Neves<sup>5</sup>  
Rodrigo Magnabosco<sup>6</sup>  
Hélio Goldenstein<sup>7</sup>  
Francisco Ambrozio Filho<sup>8</sup>

## Resumo

O propósito desse trabalho é estudar e avaliar a propriedade de tenacidade à fratura ( $K_{ICV}$ ) do aço rápido AISI M3:2 produzido por uma técnica de Metalurgia do Pó (MP). O aço rápido MP M3:2 foi fabricado a partir de pós fornecidos pela Coldstream Inc. com e sem a adição de 0,3% de carbono, compactado uniaxialmente a frio e sinterizado a vácuo produzindo materiais com densidades próximas da teórica para essa classe de aço rápido. A seguir os sinterizados foram submetidos a um tratamento térmico de endurecimento de austenitização, seguida de têmpera e triplo revenimento. Corpos de prova de tenacidade à fratura ( $K_{ICV}$ ) foram fabricados segundo a metodologia Chevron e rompidos para a determinação do  $K_{IC}$ . A microestrutura foi avaliada por MEV, a estrutura por DRX e o tamanho de carbonetos primários e tamanho de grão austenítico também foram avaliados. Não houve variação significativa na tenacidade à fratura ( $K_{ICV}$ ) para os dois aços rápidos AISI M3:2 para as diferentes temperaturas de austenitização investigadas.

**Palavras-chave:** Aços rápidos M3:2; Metalurgia do pó;  $K_{ICV}$ ; Caracterização.

## FRACTURE TOUGHNESS OF VACUUM SINTERED AISI M3:2 HIGH SPEED TOOL STEELS

### Abstract

The aim of this work is to study and evaluate the property of fracture toughness ( $K_{ICV}$ ) of an AISI M3:2 high speed tool steel produced by a Powder Metallurgy technique. The P/M M3:2 high speed steel was manufactured by cold uniaxial compaction of irregular water atomized powders with and without 0.3% of carbon followed by sintering under vacuum producing a material with density near to the theoretical. Then the samples were submitted to a heat treatment procedure and after all Chevron Notch samples were manufactured and the tests were carried out according to ASTM recommendations in order to determine the fracture toughness ( $K_{ICV}$ ). The microstructures were evaluated by SEM. The structures were evaluated by XRD. The primary mean carbide sizes and austenitic grain sizes were determined by using a digital analyzer Quantikov software.

**Key-words:** M3:2 high speed steel; Powder metallurgy;  $K_{ICV}$ ; Characterization.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Mecânico, Prof. Dr. Colaborador da PPGEM do DEMEC da UFPE.

<sup>3</sup> Engenheiro Metalurgista, Prof. Doutor do Departamento de Engenharia de Materiais da UFRN.

<sup>4</sup> Engenheira Metalurgista, Aluna de Pós-Graduação nível doutorado da Escola de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da EPUSP.

<sup>5</sup> Engenheiro Metalurgista, Prof. Dr. do IPEN-CNEN/SP - São Paulo – SP – Brasil.

<sup>6</sup> Engenheiro Metalurgista, Prof. Dr. do Centro Universitário da FE- São Paulo – SP – Brasil.I.

<sup>7</sup> Engenheiro Metalurgista, Prof. Dr. da Escola de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da EPUSP.

<sup>8</sup> Engenheiro Metalurgista, Prof. Dr. do Centro Universitário da FEI- São Paulo – SP – Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Os aços rápidos podem ser obtidos pela via convencional, ou seja, fusão seguida de vazamento em uma lingoteira, conformação mecânica, tratamentos térmicos (recozimento, austenitização, têmpera e revenimento) e usinagem (retificação). A metalurgia do pó é um processo que possibilita a obtenção do material quando o processo convencional não é factível, ou seja, quando o processo convencional, por ocasião da solidificação, forma eutéticos produzindo um material com estrutura dendrítica e segregação, o que torna a microestrutura grosseira e não-uniforme. A mais séria consequência da segregação de carbonetos em uma grande escala é o efeito fragilizante.<sup>(1)</sup> Esses carbonetos podem se constituir em rotas favoráveis de propagação de trincas e devido a sua presença há uma redução na energia requerida para a fratura, ou seja, um decréscimo na tenacidade à fratura.<sup>(2,3)</sup>

A tenacidade à fratura dos aços rápidos é uma propriedade de considerável importância prática e, geralmente, implica na medida da capacidade do material em absorver cargas de impacto sem deformações plásticas significativas ou falha catastrófica. Uma ferramenta de corte requer a manutenção de tolerâncias dimensionais precisas, freqüentemente, sob condições de corte intermitente envolvendo cargas de impacto repetitivas, em que não se pode permitir nenhuma deformação irreversível ou inelástica. Por essa razão, a ductilidade de uma maneira isolada é de significado questionável como critério do desempenho da ferramenta.

A literatura que trata de ensaios de tenacidade à fratura de aços rápidos é modesta. Pode-se definir o “conceito de tenacidade” aplicada aos aços rápidos como:

- a capacidade de suportar deformação antes de quebrar (ensaio de resistência à flexão);
- a capacidade de oferecer resistência à deformação permanente (resistência ao escoamento).

Uma definição alternativa foi sugerida por Johnson que definiu tenacidade como sendo a quantidade de energia medida devido à deformação plástica em um ensaio estático de flexão ou torção.<sup>(3)</sup> O trabalho de Johnson demonstrou que não existe necessariamente uma correlação entre a tenacidade, definida como tal, e a vida da ferramenta submetida a cortes intermitentes.

No presente, é geralmente aceito que a tenacidade à fratura dos aços rápidos é uma propriedade importante. Entretanto, uma definição adequada de tenacidade ainda fica a dever. A influência de parâmetros estruturais como tamanho de grão bem como a forma e distribuição dos carbonetos na tenacidade à fratura ainda é controversa.

A tenacidade à fratura dos aços rápidos é relativamente baixa na faixa de dureza na qual os mesmos são utilizados e para qual são normalmente tratados termicamente. A melhoria da tenacidade à fratura dos aços rápidos passa pela otimização do projeto das ligas e dos procedimentos aplicados aos tratamentos térmicos.<sup>(4)</sup> No presente trabalho determinou-se a tenacidade à fratura ( $K_{ICV}$ ) desses aços utilizando-se metodologia Chevron que tem como vantagem dispensar o pré-trincamento de fadiga (ASTM E 1304 – 89).<sup>(5)</sup>

Corpos de prova Chevron apresentam significativa vantagem econômica comparativamente a outras configurações de corpos de prova para a determinação da tenacidade à fratura de ligas metálicas e de outros materiais como as cerâmicas e os vidros. Os requisitos relativos a equipamentos e uma redução significativa do viável. Esses corpos de prova foram originalmente usados na determinação da tenacidade à fratura de materiais frágeis nos quais a introdução de pré-trincas de

fadiga consistia numa dificuldade. Esses materiais exibiam comportamento linear elástico próximo do ideal e requeriam apenas a carga máxima de falha para a determinação da tenacidade à fratura. A utilização da metodologia Chevron foi estendida a materiais dúcteis que requeriam corpos de prova grandes para a determinação da tenacidade à fratura via outros métodos. Os delgados corpos de prova Chevron fornecem bom estado de deformação plana nas extremidades da trinca possibilitando a utilização de corpos de prova menores na determinação de resultados válidos de tenacidade à fratura. Corpos de prova Chevron podem ser ainda utilizados na determinação da tenacidade à fratura de materiais não disponíveis em grandes secções (tamanhos) e outros materiais que seriam economicamente proibitivos de ensaiar lançando-se mão de outras configurações de corpos de prova. A interpretação dos resultados é simplificada pela utilização dessa metodologia e os corpos de prova apresentam-se apenas com 40% da espessura e 2% do peso dos corpos de prova usados por outros métodos de determinação da tenacidade à fratura.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

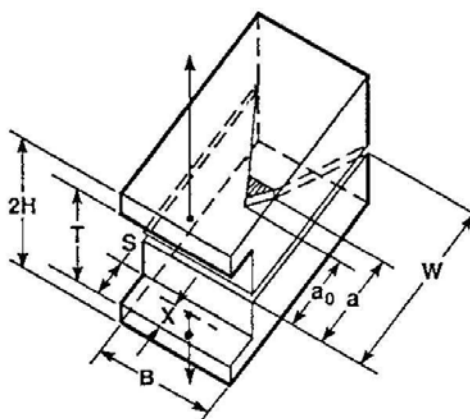
O aço rápido AISI M3:2 foi processado a partir de pós metálicos de morfologia irregular atomizados a água, compactados uniaxialmente a frio a uma pressão de compactação de 700 MPa e sinterizados a vácuo a uma temperatura de 1.263°C, obtendo-se uma microestrutura aceitável e densidades superiores a 98% da teórica para essa classe de aços rápidos. A Tabela 1 apresenta a composição química do pó do aço rápido AISI M3:2 fornecido pela Coldstream Inc. Adicionou-se posteriormente 0,3% de carbono na forma de grafite em massa aos pós fornecidos pela Coldstream Inc. no sentido de corrigir o teor de carbono desse pó e enquadrá-lo na norma da ASTM. Esse pó com a adição de 0,3% de carbono também foram submetidos a compactação uniaxial a frio e sinterizados a 1240 °C e submetidos aos mesmos procedimentos experimentais utilizados no material sem a adição de carbono.

**Tabela 1.** Composição química do pó do aço rápido AISI M3:2, massa % e o balanço é o ferro

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

Após a obtenção, amostras foram submetidas ao tratamento térmico de endurecimento que consistiu em austenitização a 1.140°C, 1.160°C, 1.180°C e 1.200°C e revenimento triplo a 540 °C. As amostras tiveram suas durezas Vickers e Rockwell C, tamanhos de carbonetos primários, tamanhos de grão austenítico determinados e que foram objetos de trabalhos anteriores.<sup>(6)</sup> As Figuras 1, 2, 3 e 4 apresentam os detalhes e a geometria dos corpos de prova Chevron, do corpo de prova de TRS rompido e do aparato utilizado no ensaio de tenacidade à fratura ( $K_{ICV}$ ).

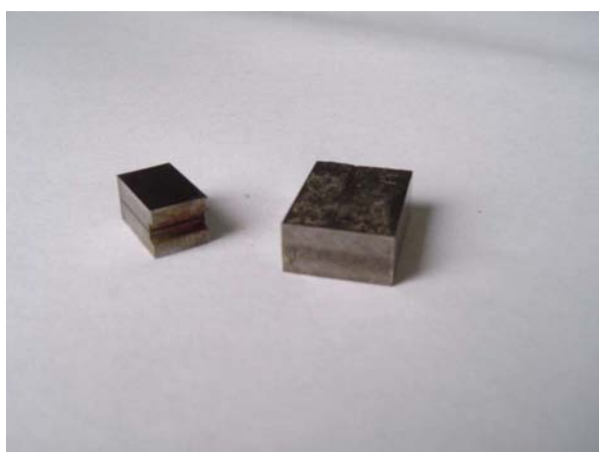
As amostras foram submetidas a ensaio de tenacidade à fratura utilizando-se a metodologia Chevron, segundo a norma ASTM E 1304 – 97 (re-aprovada em 2002). O procedimento utilizado na metodologia Chevron, desde a confecção do corpo-de-prova até a validação do ensaio é discutido no Boletim Técnico BT/PMT/0501.<sup>(7)</sup>



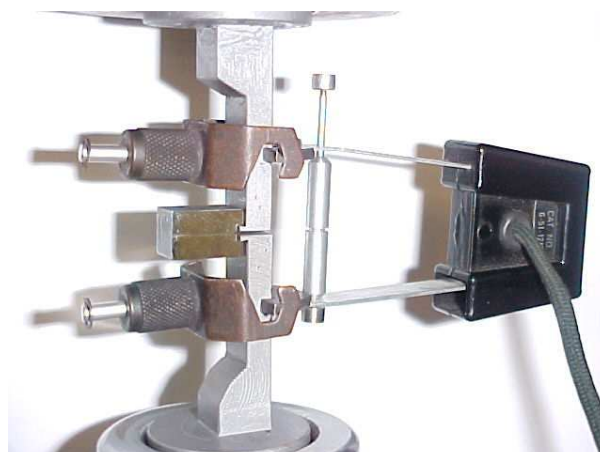
**Figura 1.** Geometria dos corpos-de-prova para ensaio de tenacidade segundo a metodologia Chevron.

**Tabela 2.** Dimensões do corpo de prova para ensaio de tenacidade segundo a metodologia Chevron

Parâmetros	Símbolo	Dimensão	Tolerância
Largura do corpo de prova (CP)	B	6,3	0,005
Comprimento útil do corpo de prova	W	9,135	0,005
Distância da extremidade do CP à linha de carga	X	0,63	0,005
Comprimento total do CP	(W+X)	9,765	0,005
Altura do CP	2H	5,481	0,005
Distância entre a linha de carga e a ponta do entalhe	$a_0$	3,0303	0,005
Distância entre a extremidade do CP e a ponta do entalhe	$a_0 + X$	3,6603	0,003
Profundidade da “boca” do CP	S	0,945	0,003
Altura da “boca” do CP	T	2,205	0,005
Espessura do entalhe (eletro-erosão a fio)	t	<0,189	-
Ângulo do entalhe Chevron	$\Phi$	54,5°	0,5°



**Figura 2.** Corpo de prova Chevron usinado a partir do corpo de prova de TRS rompido.



**Figura 3.** Aparato utilizado no ensaio de  $K_{ICV}$ .

Os ensaios foram realizados em Equipamento Universal de Ensaio Instron – Modelo -5567, com célula de carga de 5kN, disponível no Centro Universitário da FEI. Utilizou-se velocidade de avanço de 0,2 mm/min e frequência de coleta de dados de 10Hz.

Para a determinação da tenacidade à fratura do material, medida pela metodologia Chevron –  $K_{ICV}$ , utilizou-se a equação a seguir:

$$K_{ICV} = \frac{P_{\max}}{B\sqrt{W}} Y_C^*$$

onde,  $P_{\max}$  é a carga máxima obtida durante o ensaio, B e W são dimensões do corpo de prova (figura 1) e  $Y_C^*$  é o fator de intensificação de tensão geométrico mínimo, definido pela geometria do corpo-de-prova, ou seja, independente do material. Para determinação do  $Y_C^*$ , utilizou-se a tabela 3 da norma ASTM 1304-97,<sup>(7)</sup> onde, a partir da relação W/B (dimensões do corpo de prova) obtém-se o valor de  $Y_C^*$ .

### 3 RESULTADOS

Os resultados de dureza Vickers (HV), dureza Rockwell C (HRC) e tamanho de carbonetos primários, tamanhos de grãos austeníticos e tenacidade à fratura ( $K_{ICV}$ ) são apresentados nas Tabelas 2 e 3.

**Tabela 2.** Durezas Vickers (HV) e Rockwell C (HRC), tamanhos de carbonetos primários, tamanhos de grãos austeníticos e tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ )

M3:2 SV	HV	HRC	Tamanho de carbonetos primários ( $\mu\text{m}$ )	Tamanho de grão austenítico ( $\mu\text{m}$ )	Tenacidade à fratura, $K_{ICV}$ ( $\text{MPa} \times \text{m}^{1/2}$ )
1140/540	690 ± 6	60 ± 0,6	2,161 ± 0,124	11,8 ± 0,2	21,6 ± 0,4
1160/540	690 ± 4	60 ± 0,4	1,921 ± 0,078	9,5 ± 0,2	21,7 ± 0,9
1180/540	690 ± 6	60 ± 0,6	2,280 ± 0,123	11,7 ± 0,2	20,7 ± 1,3
1200/540	740 ± 4	62 ± 0,4	2,056 ± 0,086	12,4 ± 0,6	21,3 ± 1,5

**Tabela 3.** Durezas Vickers (HV) e Rockwell C (HRC), tamanhos de carbonetos primários, tamanhos de grãos austeníticos e tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ ) do aço rápido AISI M3:2 com adição de 0,3% de carbono (grafite)

M3:2 +0,3%C SV	HV	HRC	Tamanho de carbonetos primários ( $\mu\text{m}$ )	Tamanho de grão austenítico ( $\mu\text{m}$ )	Tenacidade à fratura, $K_{ICV}$ ( $\text{MPa} \times \text{m}^{1/2}$ )
1140/540	836 ± 3,4	62,7 ± 0,3	1,812 ± 0,302	11,3 ± 0,5	18,45 ± 0,39
1160/540	898 ± 5,6	62,9 ± 0,2	1,677 ± 0,123	11,5 ± 0,3	16,52 ± 1,26
1180/540	902 ± 13,8	63,9 ± 0,5	1,855 ± 0,131	11,6 ± 0,4	15,54 ± 1,33
1200/540	907 ± 2,2	63,6 ± 0,5	1,466 ± 0,153	12,6 ± 0,8	18,45 ± 1,26

Os resultados de tenacidade à fratura  $K_{ICV}$  dos aço rápidos AISI M3:2 sinterizado a vácuo com e sem a adição de 0,3% de carbono submetidos aos tratamentos térmicos especificados acima são apresentados no gráfico da Figura 4:

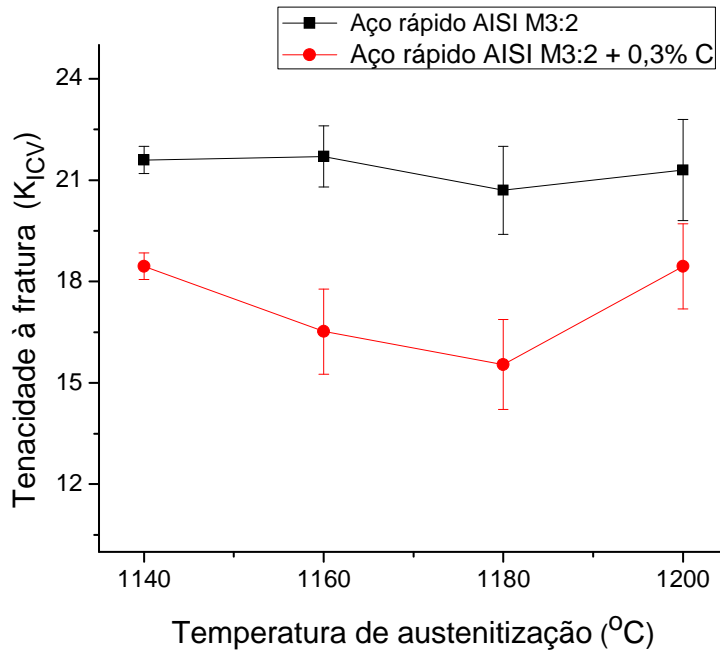


Figura 4. Resultados de tenacidade à fratura  $K_{ICV}$  do aço rápido AISI M3:2 sinterizado a vácuo.

As Figuras de números 6 a 21 apresentam pares de micrografias de MEV e difração de raios – X do aço rápido AISI M3:2 com e sem a adição de 0,3% de carbono sinterizado a vácuo submetido ao tratamento térmico de endurecimento anteriormente especificado.

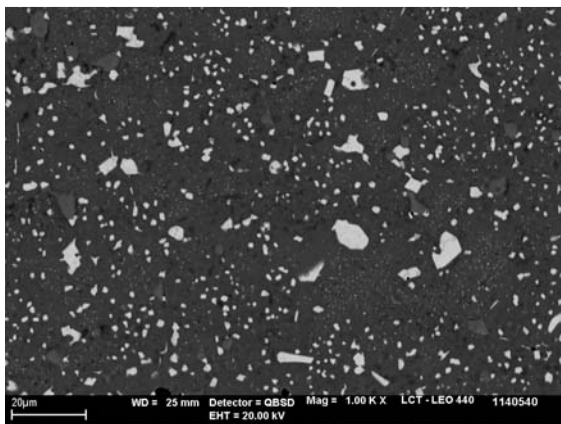


Figura 6. MEV do M3:2 1.140°C/540°C.

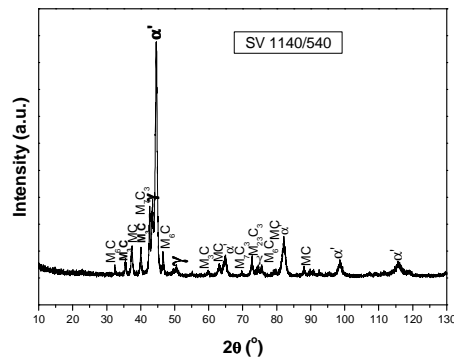


Figura 7. DRX do M3:2 1.140°C/540°C.

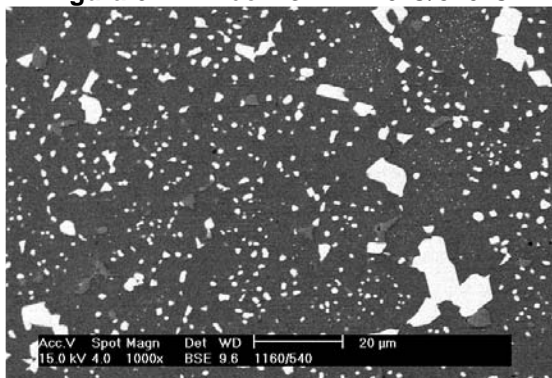
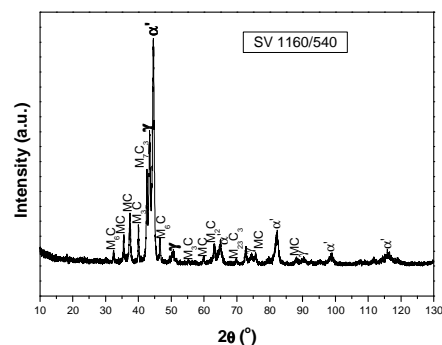


Figura 8. MEV do M3:2 1.160°C/540°C.



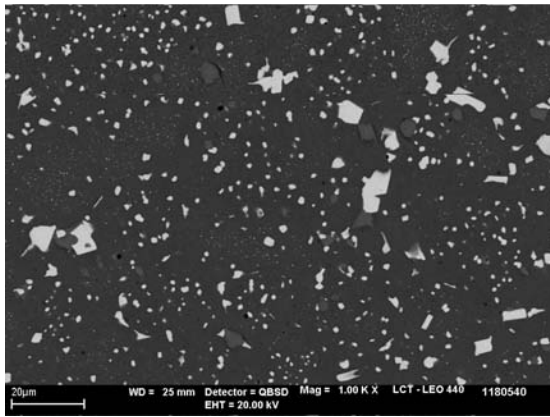


Figura 10. MEV do M3:2 1.180°C/540°C.

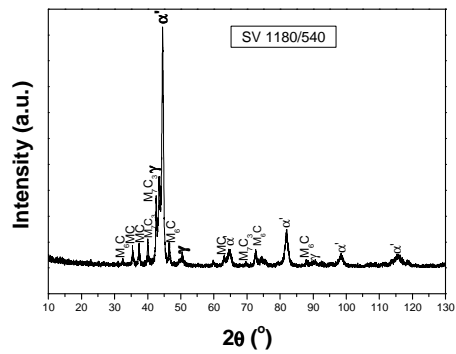


Figura 11. DRX do M3:2 1.180°C/540°C.

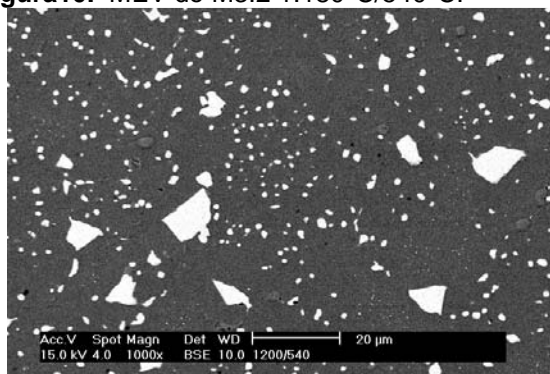
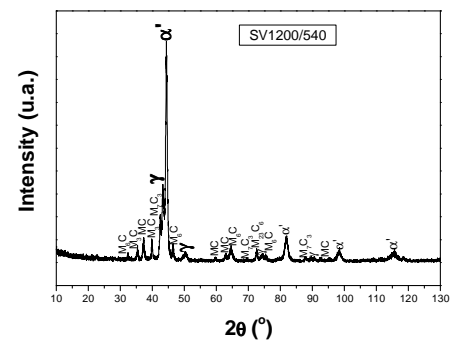


Figura 12. MEV do M3:2 1.200°C/540°C.







2. Os baixos resultados de dureza também podem ter favorecido os elevados resultados de tenacidade à fratura  $K_{ICV}$ ;
3. Não houve variação significativa da tenacidade à fratura obtida por meio de ensaio Chevron para os aços rápidos AISI M3:2 com e sem a adição de 0,3% de carbono na forma de grafite mesmo quando submetidas a diferentes temperaturas de austenitização;
4. Os resultados até agora disponíveis não são conclusivos no que concerne aos valores de tamanho de grão austenítico e sua influência no  $K_{ICV}$ .

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao IPEN Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, ao Departamento de Engenharia Mecânica DEMEC da Universidade Federal de Pernambuco, ao Centro Universitário da FEI - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, à Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais da Universidade de São Paulo, ao CNPq e às agências de fomento FAPESP e FACEPE.

## REFERÊNCIAS

- 1 1 Bocalini, M. and Goldstein, H.- Solidification of high speed steels, International Materials Reviews, Vol. 46, No. 2, 2001.
- 2 Ray, P. and Pal, P. K. – High Speed Steel Semis – Alternate Production Routes. World Conference on Powder Metallurgy, Vol 1, p. 159-169, 1990.
- 3 Johnson, A R.-Fracture toughness of AISI M2 and M7 high speed steel, Metallurgical Transactions A, Vol. 8A, p. 891-897, June 1977.
- 4 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.
- 5 ASTM E 1304 – 97 (2002), Standard Test Method for Plane-Strain (Chevron-Notch) Fracture Toughness of Metallic Materials, ASM Standards.
- 6 Araujo Filho, O. O. - Estudo Comparativo de Aços Rápidos AISI M3:2 Produzidos por Diferentes Processos de Fabricação Tese de doutorado submetida ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN para obtenção do título de doutor, São Paulo, 2006.
- 7 SILVA, W.S.; MENDANHA, A.; GOLDENSTEIN, H. Estudo da Tenacidade à Fratura de Aços de Alta Resistência Mecânica Utilizando a Metodologia Chevron. BT/PMT/0501 – Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, São Paulo, 2005.
- 8 Santana da Silva, W. – Estudo da Tenacidade à Fratura do Aço Rápido M2 Fundido, Modificado e Tratado Termicamente. Dissertação de mestrado submetida à Escola Politécnica da USP para obtenção do título de mestre, São Paulo, 2001.
- 9 ASTM standard A600-92a 'Standard Specification for Tool Steel High Speed', ASTM 2004.