

## **PROPRIEDADES DOS AÇOS RÁPIDOS AISI M3:2 PRODUZIDOS POR METALURGIA CONVENCIONAL E TÉCNICAS DE METALURGIA DO PÓ**

O. O. Araujo Filho <sup>(1)</sup>, O. C. S. Ribeiro <sup>(1)</sup>, R. A. Nogueira <sup>(1)</sup>, M. D. M. Neves <sup>(1)</sup>, L. F. Muniz <sup>(1)</sup>, F. Ambrozio Filho <sup>(2)</sup>

(1) IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Av. Prof. Lineu Prestes  
n. 2242 – USP – Cidade Universitaria – Butanta – São Paulo- São Paulo – CEP:  
05508-000 – e-mail: oscarof@bol.com.br.

(2) Centro Universitário da FEI.

### **RESUMO**

Aços rápidos AISI M3:2 produzidos por metalurgia convencional e por diferentes técnicas de metalurgia do pó são objetos desse trabalho de pesquisa. O aço rápido Sinter 23, obtido por sinterização com compactação isostática a quente, o aço rápido M3:2 obtido por compactação uniaxial a frio e sinterização com fase líquida com e sem a adição de 0,3%C (na forma de grafite) e o aço rápido convencional VWM3C foram submetidos ao tratamento térmico de endurecimento e tiveram suas propriedades de resistência à ruptura transversal, tamanho médio de carboneto primário e dureza avaliadas. Ensaio de dureza Rockwell C foram realizados para verificar o quão efetivo foi o tratamento térmico. Amostras dos aços rápidos foram fabricadas e submetidas ao tratamento térmico e rompidas em ensaios de flexão em três pontos no sentido de se determinar a resistência à ruptura transversal. As microestruturas foram avaliadas por Microscopia Eletrônica de Varredura.

Palavras-chave: Aços rápidos M3:2, metalurgia do pó, tratamento térmico.

### **INTRODUÇÃO**

O desenvolvimento de uma distribuição refinada e uniforme de carbonetos nos aços rápidos obtidos pelo processo convencional requer uma grande redução durante o trabalho de conformação a quente o que contribui para uma elevação dos custos de produção. Por outro lado, as técnicas de metalurgia do pó podem ser vistas como um processo alternativo que possibilita a produção de componentes com uma densidade próxima da teórica, uma microestrutura aceitável, segregação reduzida e a obtenção de uma distribuição homogênea de carbonetos <sup>(1)</sup>. Essa otimização na microestrutura conduz a uma redução acentuada na distorção e trincas durante o tratamento térmico proporcionando ainda propriedades mecânicas melhoradas como resistência e tenacidade. Essa melhoria se estende para a usinabilidade e aumento da vida da ferramenta <sup>(2)</sup>. O propósito desse trabalho é estabelecer comparações entre as propriedades de aços rápidos AISI M3:2 produzidos pela metalurgia convencional e os obtidos por diferentes técnicas de metalurgia do pó <sup>(3)</sup>. O Sinter 23, um aço rápido comercial fornecido pela Villares Metals, obtido por sinterização com compactação isostática a quente. Um outro aço rápido produzido a partir do pó do aço rápido M3:2 por compactação uniaxial a frio com sinterização com fase líquida com e sem a adição de 0,3%C (grafite) e o aço rápido VWM3C também fornecido pela Villares Metals produzido pela metalurgia convencional. Os aços rápidos comerciais (Sinter 23 e VWM3C) foram avaliados utilizando-se corpos de prova fabricados na direção do trabalho de conformação a quente (laminação) e na direção transversal à laminação. A isotropia dos aços rápidos comerciais foi avaliada. Portanto, um total de seis aços rápidos M3:2 tiveram suas propriedades investigadas nesse trabalho.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Dois aços rápidos ao molibdênio M3:2 comerciais o Sinter 23 e o VWM3C e dois aços rápidos M3:2 sinterizados a vácuo foram objeto de estudo neste trabalho. O aço rápido comercial Sinter 23, fabricado a partir de pó atomizado a gás, por sinterização com compactação isostática a quente seguida de conformação a quente foi fornecido pela Villares Metals como um tarugo de diâmetro de 57 mm no estado recozido. As microestruturas dos aços rápidos Sinter 23 e VWM3C “como recebido” consistem de uma matriz de ferrita com carbonetos ricos em tungstênio, molibdênio

e vanádio. A composição química do Sinter 23 e do VWM3C são apresentadas na tabela 1. Amostras utilizadas no ensaio de flexão em três pontos para a determinação da resistência à ruptura transversal (TRS) foram usinadas e submetidas ao tratamento térmico de endurecimento que consiste em austenização durante 3 minutos a quatro diferentes temperaturas (1140, 1160, 1180 e 1200 °C) seguida de têmpera ao ar e posterior revenimento triplo durante 2 horas a 540, 560 (presumível pico de dureza secundária). A necessidade de revenimento triplo se deve ao aumento da austenita retida devido ao elevado teor de carbono presente nesses aços rápidos. Todos os tratamentos térmicos foram executados em banho de sal <sup>(4)</sup>. Após o tratamento térmico as amostras foram retificadas nas suas dimensões finais de 6,35 × 12,7 × 31,7 mm, rompidas num ensaio de flexão em três pontos com o objetivo de determinar a resistência à ruptura transversal. A resistência à ruptura transversal foi avaliada em amostras usinadas na direção transversal e na direção do trabalho de conformação a quente (forjamento ou laminação) possibilitando portanto, a avaliação da isotropia dos dois aços comerciais. Pelo menos seis amostras foram ensaiadas para cada condição de tratamento térmico.

Tabela 1 – Composição química dos aços rápidos. Massa por cento (balanço é o ferro).

	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	S	P
Sinter23	1,31	0,64	0,36	4,04	4,98	6,16	3,02	0,01	0,021
VWM3C	1,21	0,38	1,52	4,88	4,65	5,77	2,42	-	0,05

As amostras dos aços rápidos M3:2 sinterizados a vácuo com e sem a adição de 0,3% de carbono (grafite) foram compactadas a frio numa prensa a uma pressão de 700 MPa obtendo-se densificações superiores a 70% para os compactados. A composição química do pó do aço rápido M3:2 fornecido pela Coldstream Inc. é apresentada na tabela 2. A caracterização do pó e a sinterização dos aços rápidos M3:2 com e sem a adição de carbono (grafite) foi objeto de trabalhos anteriores. As amostras dos aços rápidos M3:2 sinterizados a vácuo foram fabricadas sob condições de produção a uma temperatura de sinterização de 1263 °C para o aço rápido sem a adição de carbono (grafite) e 1240 °C para o aço rápido com a adição de carbono (grafite) durante 1 hora, submetidas a subseqüentes tratamentos térmicos de recozimento e endurecimento e finalmente usinadas nas suas dimensões finais.

As sinterizações produziram microestruturas aceitáveis e densidades de 98% da densidade do material (8,16 g/cm<sup>3</sup>). As figuras 1 e 2 mostram micrografias de MEV dos materiais. A secção transversal após a usinagem foi de 5,5 × 11 mm<sup>2</sup>. O tratamento térmico de recozimento foi necessário uma vez que as amostras apresentaram durezas da ordem de 49 HRC e 53 HRC para os aços sem e com a adição de carbono (grafite), respectivamente e também para aliviar tensões internas que resultaram dos ciclos de sinterização <sup>(5)</sup>. O recozimento também se faz necessário para facilitar as operações de usinagem na fabricação dos corpos de prova <sup>(6,7)</sup>. Medidas de dureza obtidas após o recozimento mostraram uma redução nessa propriedade para patamares em torno de 20 HRC para ambos os aços rápidos. O procedimento utilizado no tratamento térmico bem como nos ensaios de flexão em três pontos foram exatamente os mesmos empregados para o Sinter 23 e o VWM3C.

Tabela 2 – Composição química do pó do aço rápido M3:2.

	C	W	Mo	Cr	V	Mn	Si
Wt%	0,98	5,68	6,2	3,97	2,92	0,30	0,20

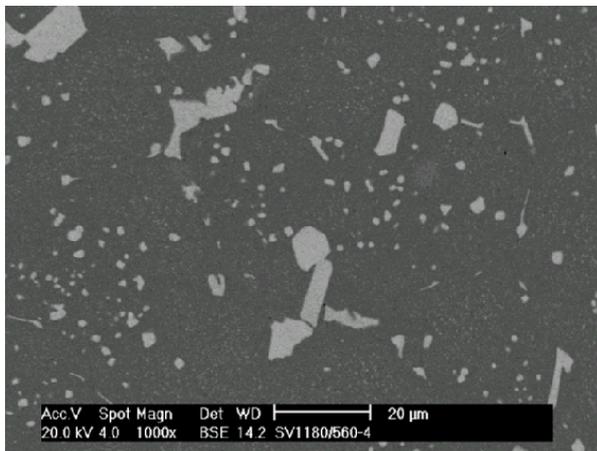


Fig.1 – Micrografia de MEV do aço rápido M3:2 sinterizado a vácuo. Aumento: 1000x. Ataque químico: Nital a 3%.

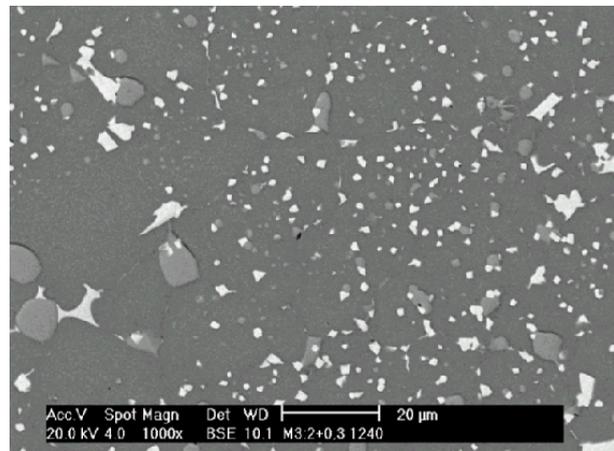


Fig. 2 – Micrografia de MEV do aço rápido M3:2 sinterizado a vácuo com a adição de carbono (grafite). Aumento: 1000x. Ataque químico: Nital a 3%.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

As figuras 3,4,5,6,7,8,9 e 10 apresentam as micrografias de MEV dos aços rápidos austenitizados a 1140 e 1200 °C e submetidas ao revenimento a 560 °C.

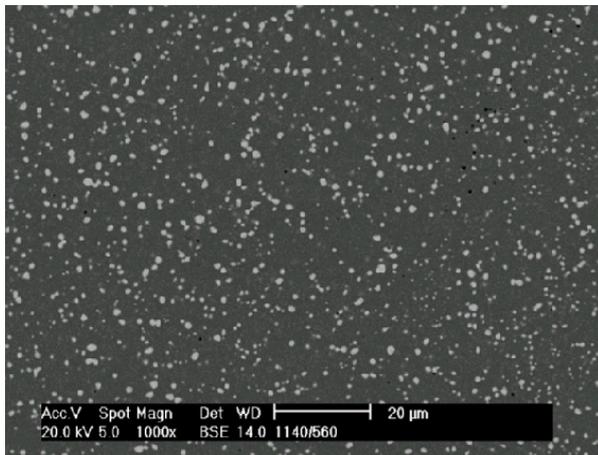


Fig. 3 – Micrografia de MEV do aço rápido Sinter 23 austenitizado a 1140 °C e revenido a 560 °C. Aumento: 1000 ×. Ataque químico: Nital a 3%.

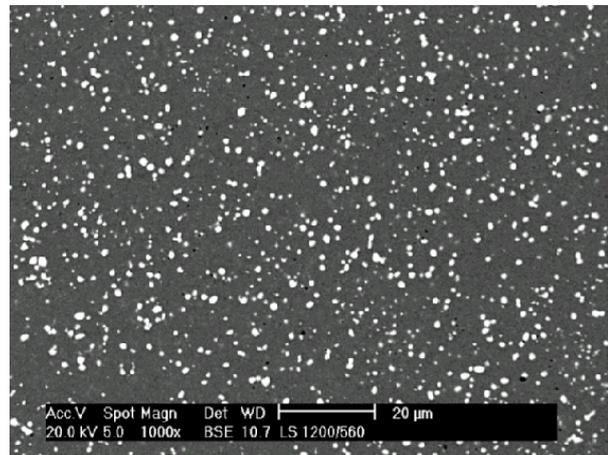


Fig. 4 – Micrografia de MEV do aço rápido Sinter 23 austenitizado a 1200 °C e revenido a 560 °C. Aumento: 1000 ×. Ataque químico: Nital a 3%.

A resistência à ruptura transversal e o tamanho médio de carboneto primário dos aços rápidos AISI M3:2 são apresentados nos gráficos das figuras 11, 12, 13 e 14:

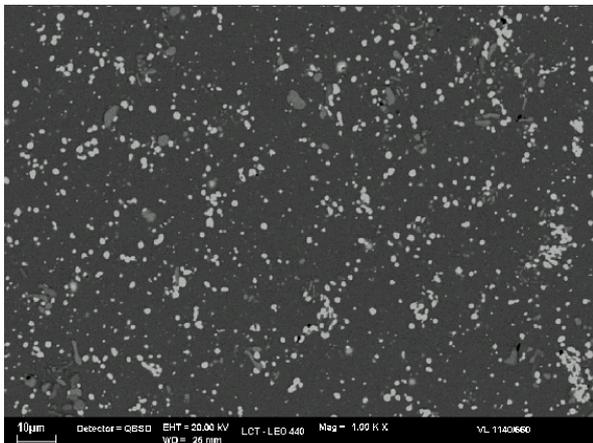


Fig. 5 – Micrografia de MEV do aço rápido VWM3C austenitizado a 1140 °C e revenido a 560 °C. Aumento: 1000 ×. Ataque químico: Nital a 3%.

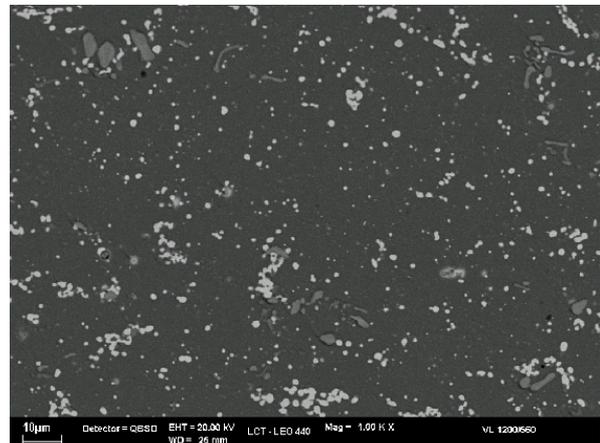


Fig. 6 – Micrografia de MEV do aço rápido VWM3C austenitizado a 1200 °C e revenido a 560 °C. Aumento: 1000 ×. Ataque químico: Nital a 3%.

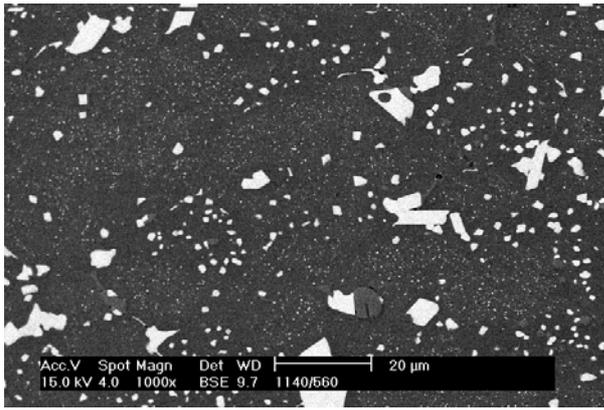


Fig. 7 – Micrografia de MEV do aço rápido M3:2 sinterizado a vácuo austentizado a 1140 °C e revenido a 560 °C. Aumento: 1000 ×. Ataque químico: Nital a 3%.

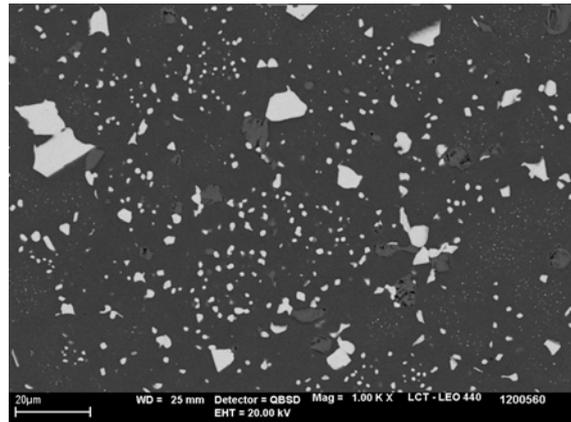


Fig. 8 – Micrografia de MEV do aço rápido M3:2 sinterizado a vácuo austentizado a 1200 °C e revenido a 560 °C. Aumento: 1000 ×. Ataque químico: Nital a 3%.

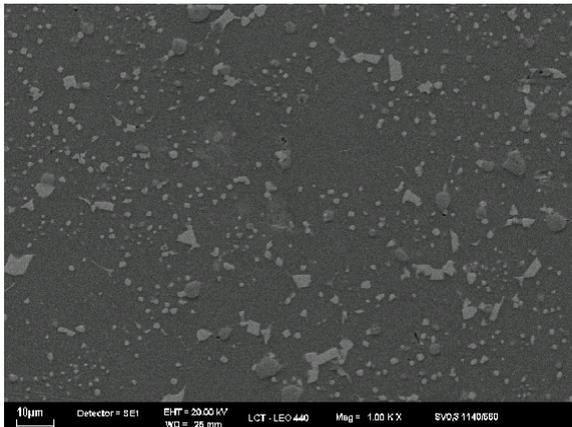


Fig. 9 – Micrografia de MEV do aço rápido M3:2 com a adição de grafite sinterizado a vácuo austentizado a 1140 °C e revenido a 560 °C. Aumento: 1000 ×. Ataque químico: nital a 3%.

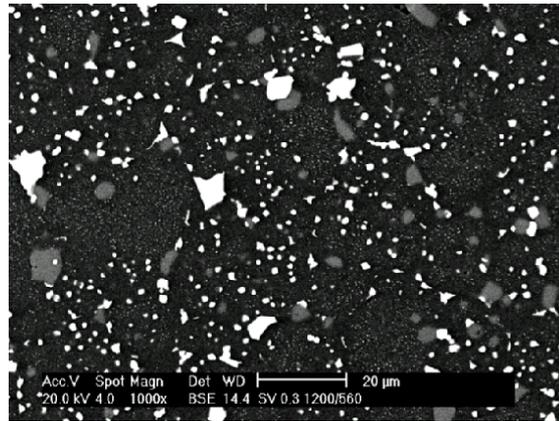


Fig. 10 – Micrografia de MEV do aço rápido M3:2 com a adição de grafite sinterizado a vácuo austentizado a 1200 °C e revenido a 560 °C. Aumento: 1000 ×. Ataque químico: nital a 3%.

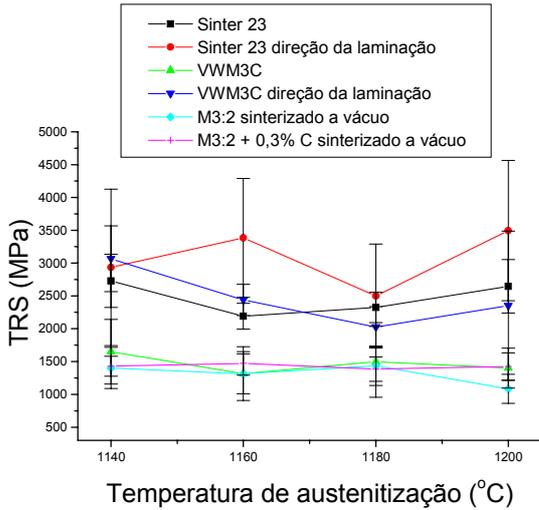


Fig 11 – TRS em função da temperatura de austenitização para temperatura de revenimento de 540 °C.

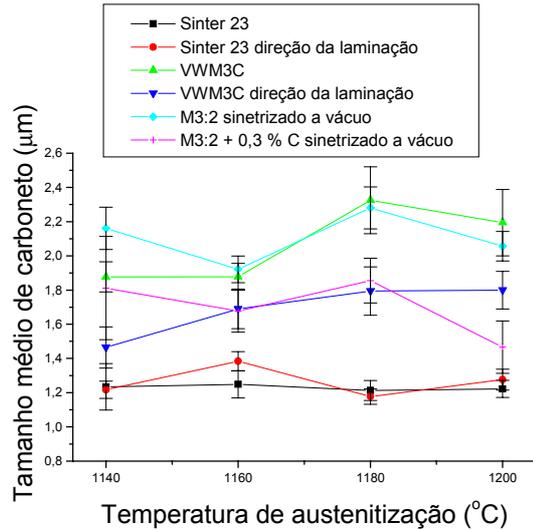


Fig 12 – Tamanho médio de carboneto primário em função da temperatura de austenitização para temperatura de revenimento de 540 °C.

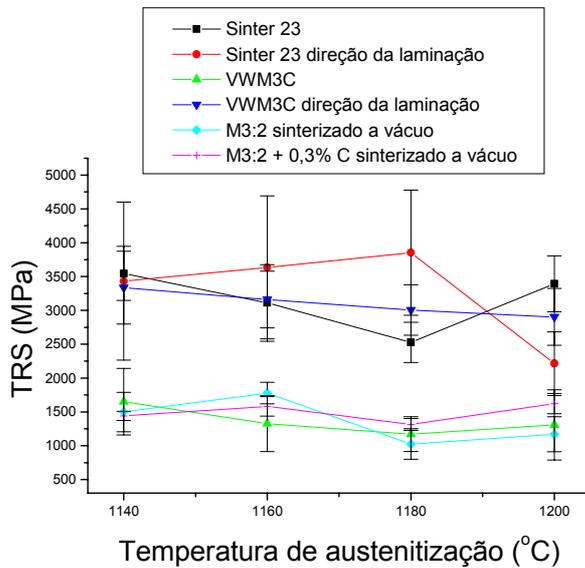


Fig 13 – TRS em função da temperatura de austenitização para para temperatura de revenimento de 560 °C.

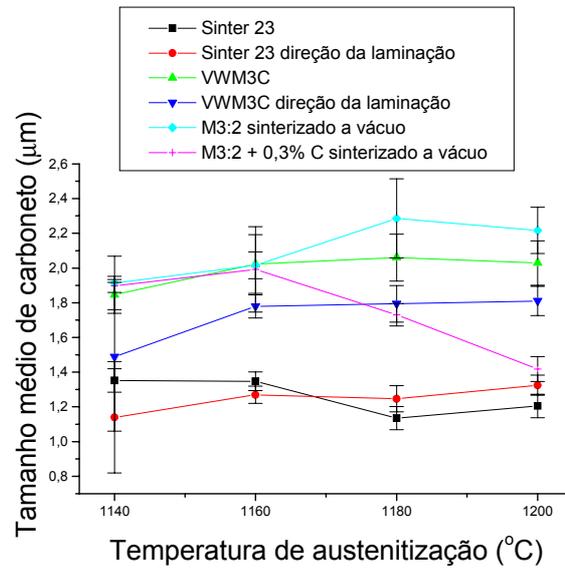


Fig 14 – Tamanho médio de carboneto primário em função da temperatura de austenitização para temperatura de revenimento de 560 °C.

De uma maneira geral, existe definitivamente uma relação entre a resistência à ruptura transversal (TRS) e o tamanho médio de carboneto primário para todos os seis aços rápidos AISI M3:2 investigados e para todas as condições de tratamento térmico de endurecimento investigadas. Tamanhos (diâmetros) maiores de carbonetos primários resultaram em menores magnitudes da resistência à ruptura transversal e o contrário também se verifica, ou seja, tamanhos menores de carbonetos primários proporcionaram resultados de resistência à ruptura transversal melhoradas. Isotropia expressa em percentagem uma relação entre a propriedade mecânica na direção do trabalho de conformação a quente (laminação) e a propriedade mecânica na direção transversal ao mesmo.

Quantificou-se a isotropia dos aços rápidos comerciais Sinter 23 e VWM3C utilizando-se os resultados de resistência á ruptura transversal (TRS) para as várias condições de tratamento térmico estudadas. A figura 15 apresenta gráfico das isotropias dos aços rápidos Sinter 23 e VWM3C. O aço rápido Sinter 23 apresentou uma isotropia média de 80%, resultado esse consistente com o tamanho médio de carboneto primário menor e a melhor distribuição dos mesmos quando comparado ao aço rápido convencional VWM3C que teve 52,2 % como resultado de isotropia média.

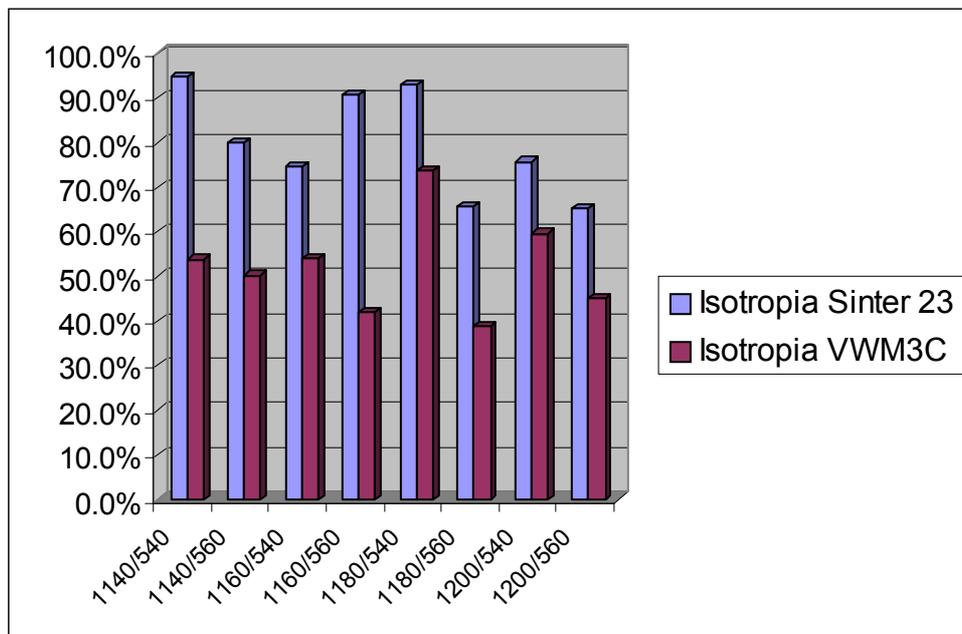


Fig. 15 – Resultados da isotropia dos aços rápidos Sinter 23 e VWM3C.

Os resultados de dureza do Sinter 23 para todas as condições de endurecimento são apresentados na tabela 3.

Tabela 3 – Resultados de dureza HRC para todas as condições de tratamento térmico.

Austenitização/revenimento	1140 °C	1160 °C	1180 °C	1200 °C
540 °C	66,3 ± 0,4	66,8 ± 0,4	67,4 ± 0,2	67,1 ± 0,2
560 °C	65,6 ± 0,2	65,5 ± 0,4	66,1 ± 0,4	67,1 ± 0,6

A resistência à ruptura transversal do Sinter 23 decresce de uma maneira geral com o aumento da temperatura de austenitização para ambas as temperaturas de revenimento de 540 e 560 °C. No entanto, verifica-se que, essa tendência de queda com o aumento da temperatura de austenitização, é revertida para a temperatura de austenitização de 1200 °C, para ambas as temperaturas de revenimento. Os resultados de TRS medidos para as temperaturas de revenimento de 540 e 560 °C indicam que os valores mais elevados foram observados para a temperatura de austenitização de 1140 °C. O melhor resultado para o TRS corresponde à condição de temperatura de austenitização de 1140 °C e revenimento a 560 °C que nos fornece um valor de 3546 MPa (Tabela 4). Os resultados verificados para a resistência à ruptura transversal estão em conformidade com os resultados obtidos pelo fabricante do material <sup>(8)</sup>.

Tabela 4 – Resultados de TRS para todas as condições de endurecimento (MPa).

Austenitização/revenimento	1140 °C	1160 °C	1180 °C	1200 °C
540 °C	2729 ± 405	2192 ± 196	2325 ± 229	2647 ± 408
560 °C	3546 ± 399	3110 ± 568	2527 ± 298	3392 ± 413

As micrografias de MEV do aço rápido Sinter 23 mostraram uma distribuição mais uniforme, refinada e com carbonetos menores comparativamente ao aço rápido M3:2 sinterizado a vácuo. O engrossamento observado na microestrutura dos aços rápidos M3:2 sinterizado a vácuo com e sem a adição de grafite pode ser atribuído a aproximação da densidade teórica para esse material durante a sinterização. Os resultados de dureza para o aço rápido M3:2 sinterizado a vácuo sem e com a adição de grafite após o tratamento térmico apresentaram níveis muito abaixo do esperado (Tabelas 5 e 6).

Tabela 5 – Resultados de dureza do aço rápido M3:2 sinterizado a vácuo sem a adição de grafite para todas as condições de tratamento térmico (HRC).

Austenitização/revenimento	1140 °C	1160 °C	1180 °C	1200 °C
540 °C	60 ± 0,6	60 ± 0,4	60 ± 0,6	62 ± 0,4
560 °C	57 ± 0,4	57 ± 0,4	58 ± 0,6	60 ± 0,4

Tabela 6 – Resultados de dureza do aço rápido M3:2 sinterizado a vácuo com a adição de grafite para todas as condições de tratamento térmico (HRC).

Austenitização/revenimento	1140 °C	1160 °C	1180 °C	1200 °C
540 °C	62,7 ± 0,3	62,9 ± 0,2	63,9 ± 0,5	63,6 ± 0,5
560 °C	63,1 ± 0,7	62,2 ± 0,2	62,9 ± 0,5	62,4 ± 0,4

Os resultados de TRS para o aço rápido M3:2 sinterizado a vácuo também se apresentaram bem abaixo do esperado comparativamente aos encontrados na literatura <sup>(7)</sup> (Tabela 7).

Tabela 7 – Resultados de TRS do aço rápido M3:2 sinterizado a vácuo para todas as condições de tratamento térmico (MPa).

Austenitização/revenimento	1140 °C	1160 °C	1180 °C	1200 °C
540 °C	1403 ± 313	1314 ± 304	1436 ± 302	1083 ± 222
560 °C	1498 ± 291	1777 ± 159	1024 ± 226	1170 ± 259

Tabela 8 – Resultados de dureza do aço rápido convencional VWM3C para todas as condições de tratamento térmico (HRC).

Austenitização/revenimento	1140 °C	1160 °C	1180 °C	1200 °C
540 °C	63,2 ± 0,8	65,7 ± 0,3	65,2 ± 0,1	65 ± 0,1
560 °C	62,5 ± 0,2	64,3 ± 0,4	64,5 ± 0,3	64 ± 0,9

## CONCLUSÕES

1. De uma maneira geral, existe definitivamente uma relação entre a resistência à ruptura transversal (TRS) e o tamanho médio de carboneto primário para todos

os seis aços rápidos AISI M3:2 investigados e para todas as condições de tratamento térmico de endurecimento investigadas;

2. O Sinter 23 apresentou na sua microestrutura uma distribuição mais uniforme, refinada com carbonetos menores quando comparado com o aço rápido M3:2 sinterizado a vácuo. Daí a melhor resposta do Sinter 23 ao tratamento térmico, o que pode ser avaliado também pelas propriedades mecânicas;
3. A resistência à ruptura transversal do Sinter 23 decresce de uma maneira geral com o aumento da temperatura de austenitização para ambas as temperaturas de revenimento de 540 e 560 °C. No entanto, verifica-se que essa tendência de queda com o aumento da temperatura de austenitização é revertida para a temperatura de austenitização de 1200 °C, para ambas as temperaturas de revenimento. Os resultados de TRS medidos para as temperaturas de revenimento de 540 e 560 °C indicam que os valores mais elevados foram observados para a temperatura de austenitização de 1140 °C;
4. Os resultados de dureza para o aço rápido M3:2 sinterizado a vácuo após o tratamento térmico apresentaram níveis muito abaixo do esperado. No máximo atingiu-se 62 HRC. A adição de carbono na forma de grafite foi efetiva no sentido de melhorar a resposta ao tratamento térmico (atingiu-se 63,9 HRC na melhor condição);
5. Os resultados de TRS para o aço rápido M3:2 sinterizado a vácuo também se apresentaram bem abaixo do esperado comparativamente aos encontrados na literatura. Os resultados do aço rápido M3:2 sinterizado a vácuo com a adição de grafite foram da mesma magnitude do mesmo aço sem a adição de grafite e não foram apresentadas.

## REFERÊNCIAS

1. 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.

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. 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.
4. Wilson, R. – **Metallurgy and Heat Treatment of Tool Steels**. McGraw-Hill Book Company (UK) Limited, 1975.
5. Brewin, P. R., Toloui, B., Nurthen, P. D., Fellgett, J. A., Wood, J. V., Igharo, M., Coleman, D. S. and Shaikh, Q. – Effect of process variables and microstructure on properties of sintered high speed steel for wear applications. **Powder Metallurgy**, Vol. 32, N. 4, p-285-290, 1989.
6. Kaiser, F. and Cohen, M. - Carbides in high-speed steel - Their nature and quantity. **Metal Progress**, p.79-85, Junho, 1952.
7. Hoyle, G. – **High Speed Steels**. Butterworth & Co. (Publishers) Ltd, 1988.
8. Mesquita, R. A. and Barbosa, C. A.- High Speed Steel Produced Through Conventional Casting, Spray Forming and Powder Metallurgy. **6<sup>TH</sup> International Tooling Conference**. p. 325-337,2002.

## **PROPERTIES OF AISI M3:2 HIGH SPEED STEELS PRODUCED THROUGH CONVENTIONAL CASTING AND POWDER METALLURGY TECHNIQUES**

### **ABSTRACT**

The main aim of this work is to study the influence of the heat treatment on the properties of two M3:2 high speed steel obtained by different powder metallurgy techniques and a conventional one of the same class. M3:2 Sinter 23 obtained by hot isostatic pressing, a vacuum sintered steel obtained by cold compaction of M3:2 and liquid phase sintering and a conventional VWM3C were submitted to hardening in order to determine the influence of this treatment on their properties. The effectiveness of the heat treatment was determined by hardness tests (Rockwell C hardness). Samples of the three PM high speed steels were manufactured and submitted to the heat treatment described above and fractured in three point bending tests in order to determine the influence of the heat treatment on the transverse rupture strength (TRS).

Key-words: M3:2 high speed steel, powder Metallurgy, heat treatment.