

## **INFLUÊNCIA DO MÉTODO DE COMPACTAÇÃO E DAS TEMPERATURAS E ETAPAS DE TRATAMENTO NA MICROESTRUTURA E DUREZA DO AÇO RÁPIDO AISI T15 SINTERIZADO A VÁCUO**

E. P. R. Lima<sup>1</sup>, R. A. Nogueira<sup>1</sup>, O. O. de Araújo Filho<sup>1</sup>, M. D. M. das Neves<sup>1</sup>, F. Ambrozio Filho<sup>1</sup>.

Av. Prof. Lineu Prestes nº. 2242 – USP, Cidade Universitária, Butantã, São Paulo-SP  
CEP: 05508-000. E-mail: [emmanuel@eprl.com.br](mailto:emmanuel@eprl.com.br)

<sup>1</sup>IPEN-CNEN/SP – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

### **RESUMO**

*O pó do aço rápido AISI T15 fornecido pela Coldstream Inc. foi compactado utilizando-se uma pressão de aproximadamente 350 MPa para o CIP e 700 MPa para o compactado uniaxialmente. Em seguida, o material foi sinterizado em um forno a vácuo na temperatura de 1270°C. Posteriormente, diferentes amostras dos materiais foram submetidas aos tratamentos de recozimento a 870°C, austenitização a 1135 e 1235°C e revenimento a 560°C. Medidas de densidade e de dureza do material sinterizado e tratado foram obtidas. Para constatar as fases presentes e avaliar as microestruturas obtidas foram realizadas análises em difração de raios X e MEV, além de microanálise em EDS. Espera-se neste trabalho obter um material de altas densidade e dureza, com uma distribuição e tamanhos dos carbonetos relativamente uniformes, além de determinar a influência dos métodos de compactação e tratamentos na microestrutura e dureza do aço rápido AISI T15 sinterizado a vácuo.*

Palavras-Chave: Metalurgia do pó, aços rápidos, CIP, sinterização com fase líquida.

### **INTRODUÇÃO**

Os aços rápidos recebem esta denominação devido a sua capacidade de reter elevadas durezas (1000 HV ou 65-70 HRC) mesmo se utilizados no corte rápido de

materiais <sup>(1)</sup>. Outra importante característica destes aços é a capacidade de manter durezas elevadas se submetidos a temperaturas de até 600°C <sup>(2)</sup>. Este fato habilita os aços rápidos como matéria-prima para a confecção de ferramentas de corte (tais como fresas, brocas e ferramentas de torneamento), além de matrizes de estampagem, prensagem e forjamento que necessitem de elevada resistência ao desgaste. A microestrutura destes materiais é composta basicamente por carbonetos primários, cuja principal função é fornecer proteção contra desgaste abrasivo, e uma matriz de martensita revenida reforçada por carbonetos finamente dispersos <sup>(3)</sup>. Por conter um elevado teor de carbono, além de tungstênio, vanádio e cobalto, o aço rápido AISI T15 apresenta uma excelente resistência à abrasão e uma elevada dureza a quente <sup>(4)</sup>.

Os aços rápidos podem ser obtidos convencionalmente - por fusão, lingotamento e trabalho mecânico dos lingotes - ou ainda por metalurgia do pó, onde o pó de determinada liga é compactado a frio, mecanicamente (prensa uniaxial em matriz metálica) ou isostaticamente (CIP), e sinterizado em formas muito próximas das que se deseja obter o produto final, obtendo inclusive uma maior isotropia de propriedades <sup>(1)</sup>.

A sinterização é um processo de extrema importância na metalurgia do pó, pois tem como objetivo principal atingir melhores propriedades mecânicas e uma considerável eliminação da porosidade <sup>(5)</sup>. As transformações no material podem ocorrer tanto no estado sólido como em presença de uma fase líquida transiente ou permanente. A sinterização com fase líquida (sinterização supersólida) é muito importante e constitui um interessante método de densificação de compactados. Este envolve a sinterização de um pó pré-ligado a uma temperatura entre a linha *solidus* e *liquidus*, fornecendo um líquido resultante da fusão parcial da fase sólida, favorecendo, portanto, os mecanismos de difusão, dissolução e, em alguns casos, re-precipitação <sup>(6)</sup>.

O objetivo deste trabalho é a obtenção do aço rápido AISI T15, sinterizado a vácuo com presença de fase líquida, a partir de dois processos de compactação diferentes: compactação uniaxial em matriz metálica e compactação isostática a frio (CIP). Espera-se com isso obter um material de altas densidade (98% da densidade teórica) e dureza, com uma distribuição e tamanhos dos carbonetos relativamente uniformes, além de determinar a influência dos métodos de compactação e tratamentos na microestrutura e dureza do aço rápido AISI T15.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O pó do aço rápido AISI T15 atomizado a água foi fornecido pela Coldstream Inc. e caracterizado por difração de laser (granulometria), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios X (DRX). A composição química do aço rápido AISI T15 é apresentada na tabela 1.

Tabela 1. Composição química do pó do aço rápido AISI T15.

Elementos	C	W	Co	V	Cr	Mo	Si	Fe
% em peso	1,59	12,08	4,95	4,91	4,05	0,82	0,28	Bal.

As amostras do pó do aço rápido foram compactadas por dois métodos diferentes, compactação isostática a frio – CIP (*Cold Isostatic Pressing*), utilizando-se um molde cilíndrico de borracha, e compactação uniaxial a frio em matriz metálica, a uma pressão de aproximadamente 350 MPa (50.000 psi) para o primeiro e 700 MPa para o segundo. Após a compactação, medidas de densidade a verde do material foram realizadas. Em seguida, os compactados foram sinterizados com presença de fase líquida em um forno resistivo a vácuo, a uma temperatura de 1270°C ( $\pm 3^\circ\text{C}$ ) por uma hora.

Finalizada a sinterização, medidas de densidade do material sinterizado foram realizadas. Posteriormente, ambos os materiais foram submetidos aos tratamentos térmicos de recozimento a 870°C por uma hora. Por fim, amostras distintas dos materiais foram submetidas ao tratamento de austenitização a 1135 e 1235°C (têmpera ao ar) com subseqüentes revenimentos (simples, duplo e triplo) a 560°C por uma hora (figura 1). Todos os tratamentos térmicos foram realizados em banho de sal <sup>(7)</sup>. Finalizados os tratamentos, os materiais foram submetidos à preparação metalográfica (embutimento, lixamento, polimento com pasta de diamante 1  $\mu\text{m}$  e ataque químico com Nital a 3%) para realização da análise microestrutural em microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microanálise por energia dispersiva – EDS. A análise microestrutural e a microanálise por EDS foram realizadas em um microscópio eletrônico de varredura Philips XL-30. Por fim, foram realizadas medidas de dureza Rockwell C (10 medidas em cada corpo de prova) utilizando-se uma carga de 150 kg.

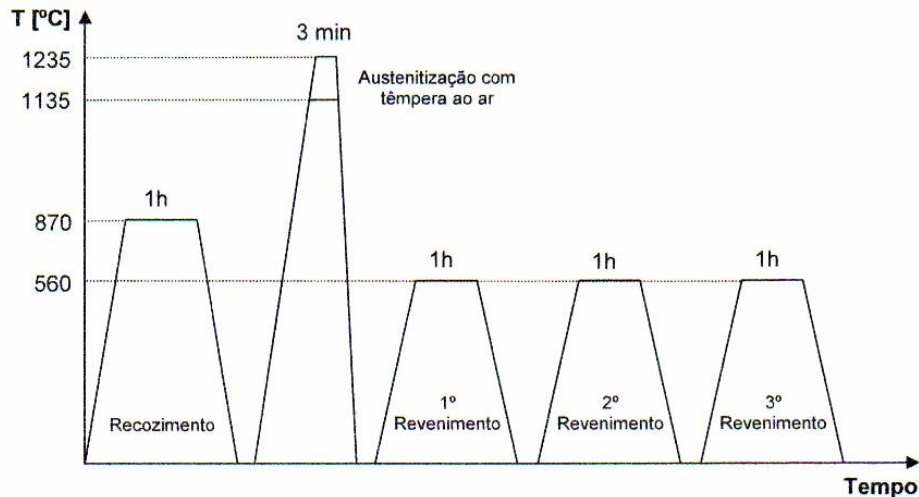


Figura 1. Tratamentos térmicos em banho de sal do aço rápido AISI T15.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados referentes à caracterização do pó do aço rápido AISI T15 são mostrados nas figuras 2 e 3. O material estudado apresenta uma morfologia bastante irregular devido a atomização a água, com diferentes tamanhos e formas de partículas, como mostrado na figura 2. A análise granulométrica por difração de laser mostrou que o pó possui uma distribuição de tamanho de partículas bimodal, na qual o diâmetro médio de partícula encontrado foi de 65,18  $\mu\text{m}$ .

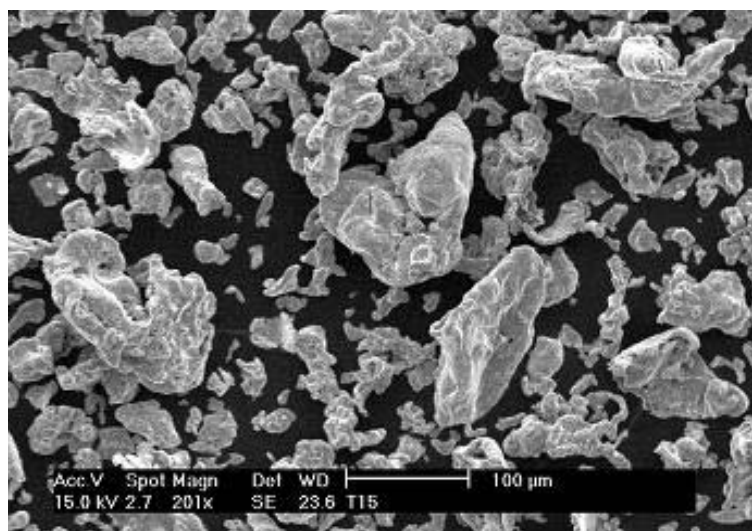


Figura 2. Micrografia de MEV do pó do aço rápido AISI T15 atomizado a água fornecido pela Coldstream Inc. Aumento: 200 x.

O resultado da difração de raios X mostrado na figura 3 indica que o pó do aço rápido estudado consiste de uma matriz de ferrita ( $\alpha$ ) com carbonetos do tipo  $M_6C$  (rico em tungstênio) e  $MC$  (rico em vanádio ou tungstênio) <sup>(8)</sup>.

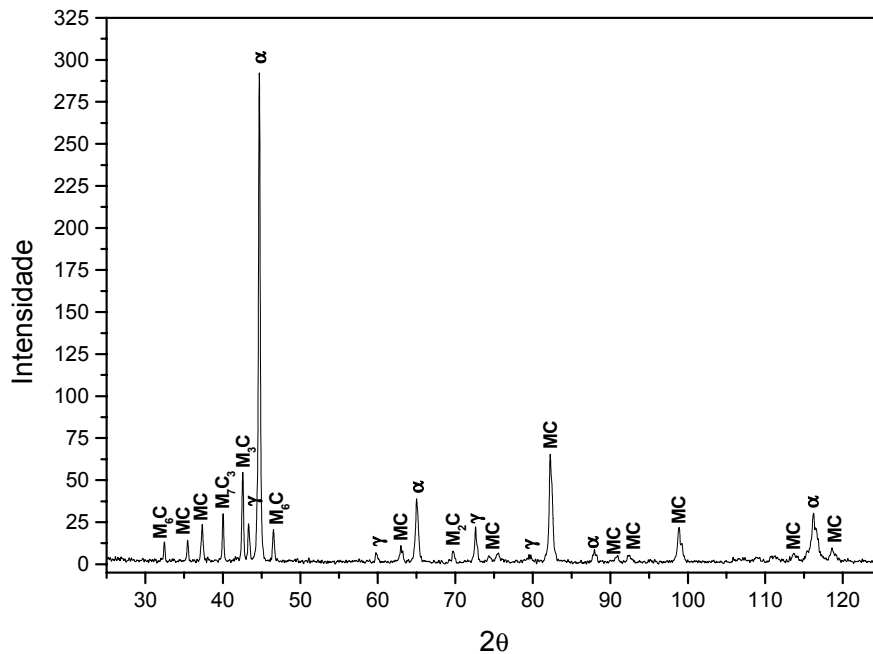


Figura 3. Difractograma do pó do aço rápido AISI T15 atomizado a água fornecido pela Coldstream Inc. (Cu- $\kappa\alpha$ )

O material compactado isostaticamente a frio a uma pressão de 350 MPa apresentou uma densidade a verde de  $5,18 \text{ g/cm}^3$ , o que equivale a aproximadamente 63% da densidade do aço rápido AISI T15 fundido ( $8,23 \text{ g/cm}^3$ ). O compactado uniaxialmente em matriz metálica a uma pressão de 700 MPa apresentou uma densidade a verde de aproximadamente  $6,29 \text{ g/cm}^3$ , o que equivale a 76,4 % da densidade do material fundido. Após sinterizado, as densidades obtidas para as duas condições foram, respectivamente,  $7,90$  (96%) e  $8,16 \text{ g/cm}^3$  (99%).

As figuras 4 e 5 apresentam as microestruturas do aço rápido AISI T15 compactado isostaticamente a frio e sinterizado a vácuo com presença de fase líquida. Podemos observar na figura 5 que, apesar de estarem relativamente bem dispersos, os carbonetos apresentam tamanhos razoavelmente diferentes, principalmente no que se refere aos carbonetos mais escuros, e se localizam, na sua maioria, nos contornos dos grãos. Também é possível observar na micrografia da figura 5 que o material apresenta uma baixa quantidade de poros, os quais são muito pequenos, e que o tamanho de grão encontrado é inferior a  $20 \mu\text{m}$ .

As figuras 6 e 7 apresentam as microestruturas do aço rápido AISI T15 compactado uniaxialmente em matriz metálica e sinterizado a vácuo com fase líquida.

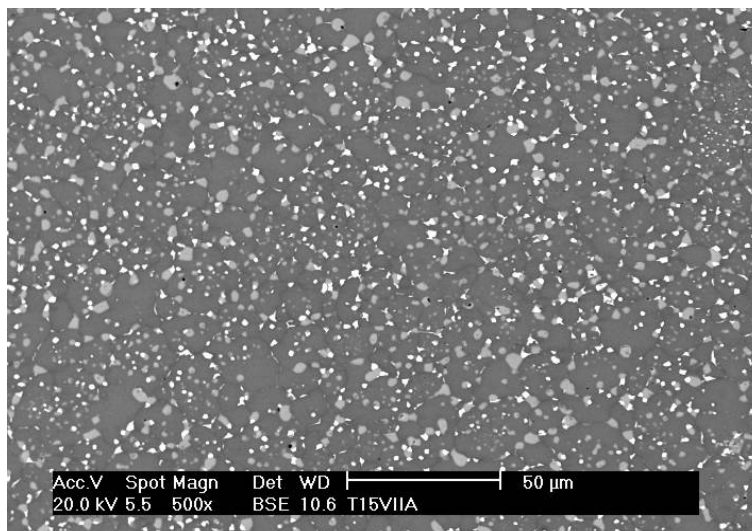


Figura 4. Micrografia de MEV do aço rápido AISI T15 compactado isostaticamente a frio a 350 MPa e sinterizado a vácuo a 1270°C. Aumento: 500 x.

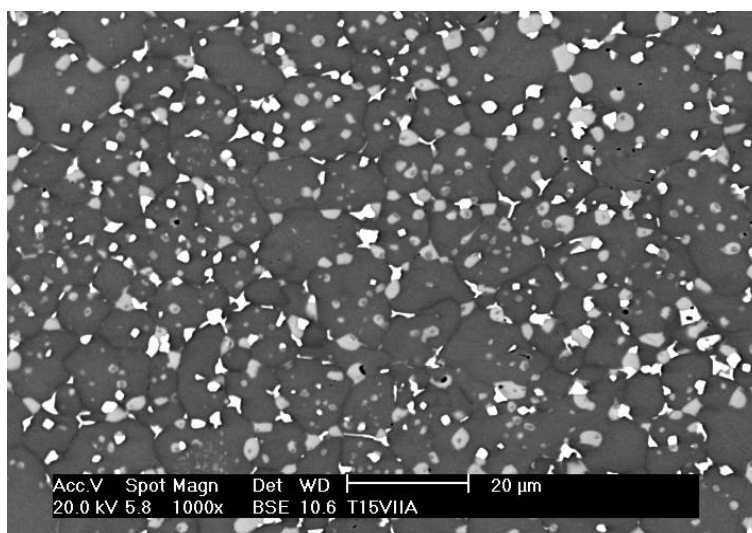


Figura 5. Micrografia de MEV do aço rápido AISI T15 compactado isostaticamente a frio a 350 MPa e sinterizado a vácuo a 1270°C. Aumento: 1000 x.

No que diz respeito ao tamanho dos carbonetos, os mais claros (brancos) apresentam dimensões não superiores a 3 µm, em média, já os carbonetos mais escuros (cinzas), podem chegar a aproximadamente 8 µm de diâmetro (figura 7).

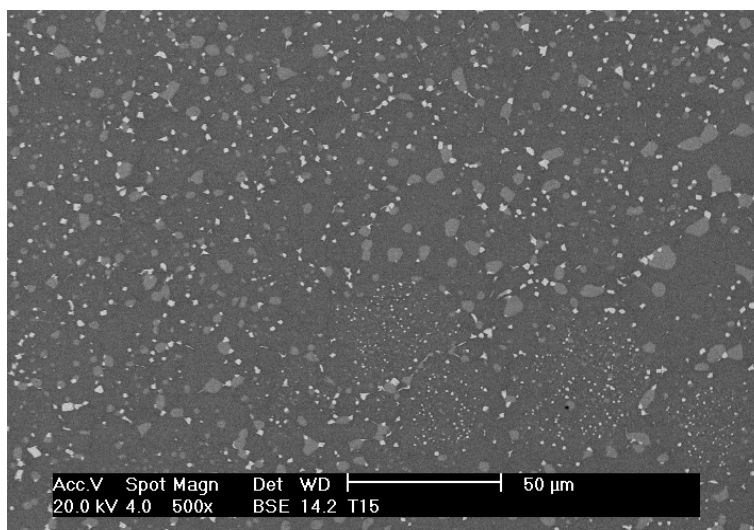


Figura 6. Micrografia de MEV do aço rápido AISI T15 compactado uniaxialmente a frio a 700 MPa e sinterizado a vácuo a 1270°C. Aumento: 500x.

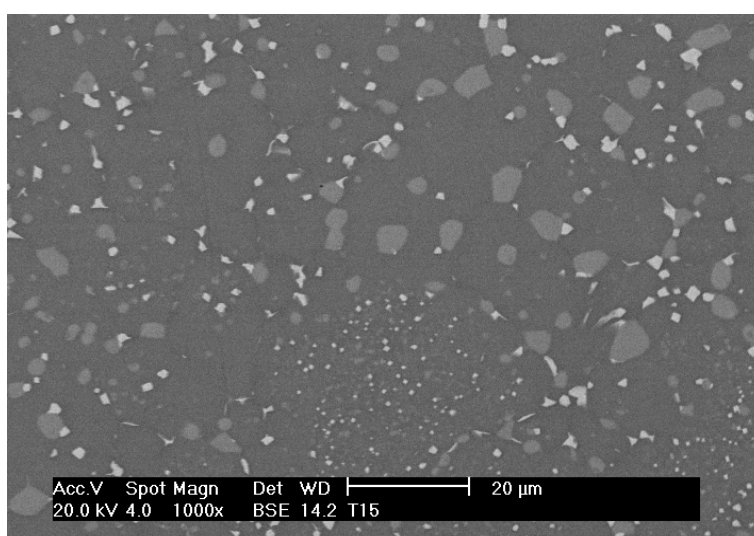


Figura 7. Micrografia de MEV do aço rápido AISI T15 compactado uniaxialmente a frio a 700 MPa e sinterizado a vácuo a 1270°C. Aumento: 1000x.

Os resultados das microanálises químicas em EDS realizadas nos carbonetos indicam que o carboneto cinza é do tipo MC (rico em vanádio e tungstênio) e o branco é do tipo  $M_6C$  (rico em tungstênio).

É possível observar na micrografia da figura 7 que não só a concentração, mas o tamanho dos carbonetos, principalmente os mais claros ( $M_6C$ ), são bem menores que os encontrados no material compactado isostaticamente a frio. Podemos notar, também, que há uma grande diferença nos tamanhos dos carbonetos (ainda maior

que a encontrada para o material compactado isostaticamente a frio), assim como, regiões de maior concentração de carbonetos (apresentando carbonetos menores). Isso pode ser justificado pelo gradiente de pressão de compactação aplicado ocasionado pelo preenchimento irregular da matriz, uma vez que esta possui uma seção de área relativamente grande ( $\sim 17,35 \text{ cm}^2$ ).

Com relação ao material compactado isostaticamente e tratado termicamente, podemos observar nas figuras 8 e 9 que há um sensível aumento na concentração de carbonetos, principalmente com relação aos carbonetos brancos ( $M_6C$ ).

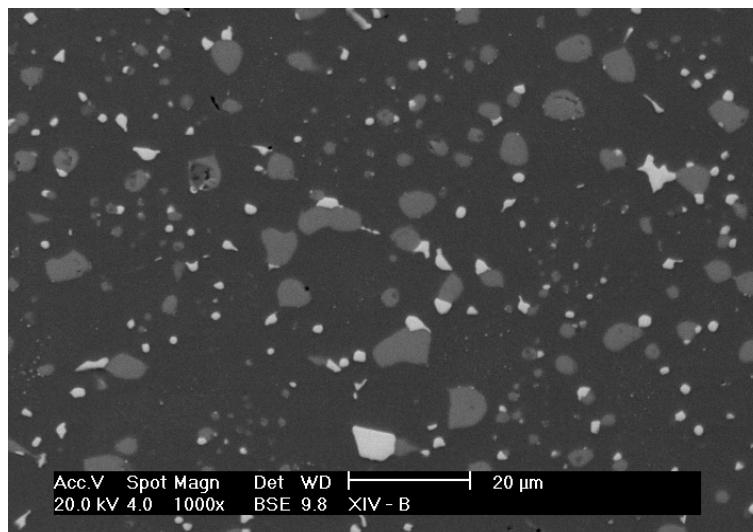


Figura 8. Micrografia de MEV do aço rápido AISI T15 compactado isostaticamente a frio, sinterizado a vácuo a 1270°C e austenitizado a 1235°C. Aumento: 1000x.

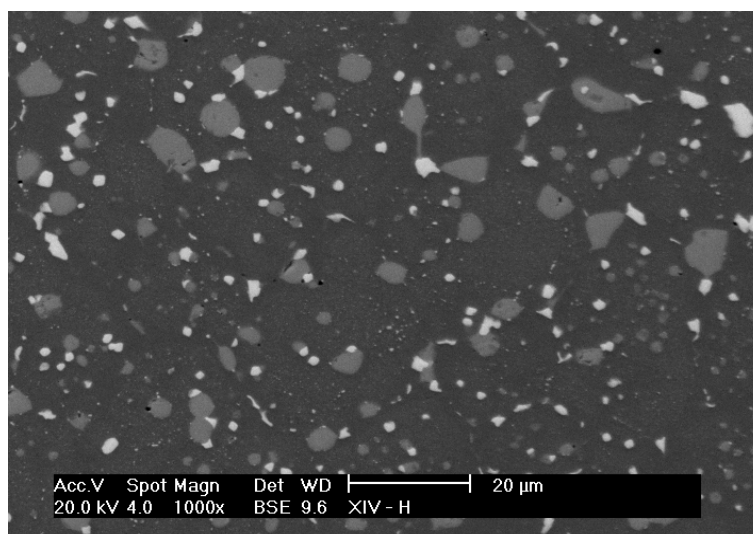


Figura 9. Micrografia de MEV do aço rápido AISI T15 compactado isostaticamente a frio, sinterizado a vácuo a 1270°C, austenitizado a 1235°C e revenido (triplo) a 560°C. Aumento: 1000x.



Para o material compactado uniaxialmente esse aumento na concentração de carbonetos brancos ( $M_6C$ ) é ainda maior (figuras 10 e 11). Podemos observar, também, que para os materiais temperados e revenidos a distribuição desses carbonetos é mais uniforme, contudo ainda apresenta grandes diferenças em seus tamanhos e formas. No entanto, no que se refere aos carbonetos escuros (MC), podemos observar que não há diferenças significativas no tamanho e na forma destes em função das condições de tratamentos térmicos investigadas.

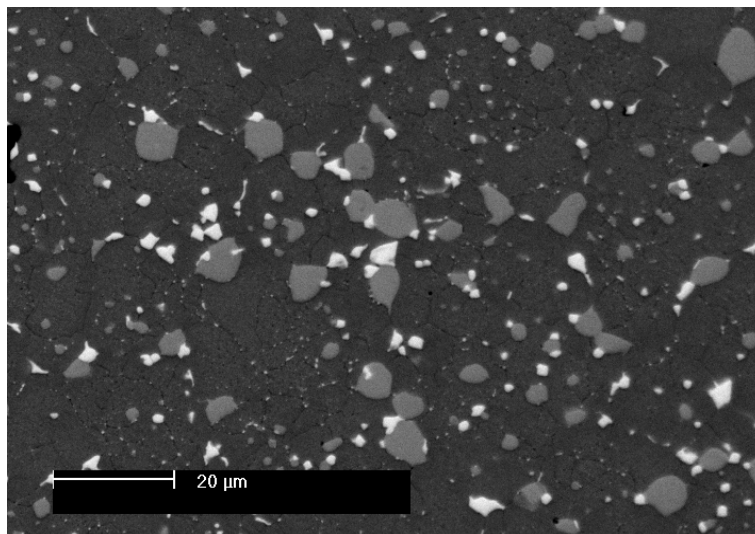


Figura 10. Micrografia de MEV do aço rápido AISI T15 compactado uniaxialmente a frio, sinterizado a vácuo a 1270°C e austenitizado a 1235°C. Aumento: 1000x.

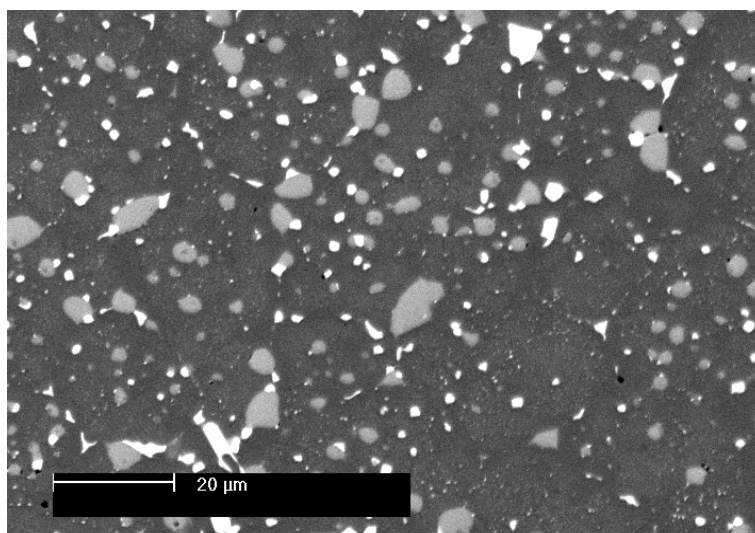


Figura 11. Micrografia de MEV do aço rápido AISI T15 compactado uniaxialmente a frio, sinterizado a vácuo a 1270°C, austenitizado a 1235°C e revenido (triplo) a 560°C. Aumento: 1000x.

No que diz respeito à dureza do material sinterizado, verificamos que apesar da lenta taxa de resfriamento utilizada (1,4°C/min) o valor médio encontrado para o aço rápido AISI T15 compactado isostaticamente a frio foi de  $64,30 \pm 1,43$  HRC, não apresentando valores inferiores a 62,00 HRC. Já para o material compactado uniaxialmente a dureza média encontrada foi de  $51,27 \pm 0,71$  HRC.

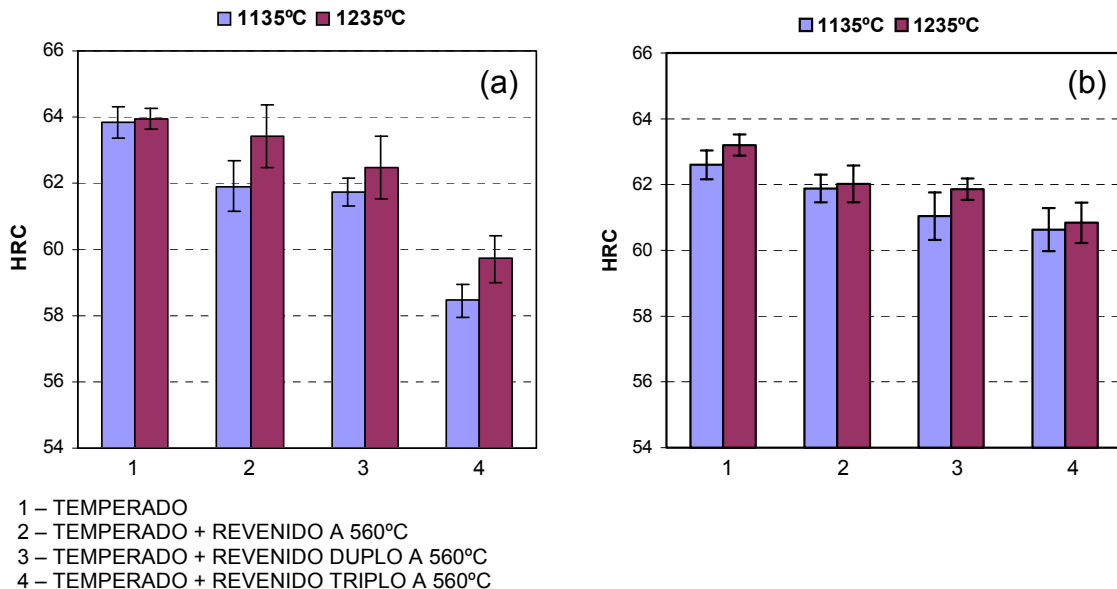


Figura 12. Durezas Rockell C para o material compactado isostaticamente (a) e uniaxialmente (b) em função das temperaturas e das etapas dos tratamentos térmicos efetuados.

Para ambos os materiais a dispersão nos valores desta propriedade foi muito baixa, resultado este que pode ser justificado pela boa uniformidade de distribuição dos carbonetos na matriz, como mostrado nas figuras 4, 5, 6 e 7. Com relação aos materiais tratados termicamente, observamos, de uma maneira geral, uma diminuição na diferença da dureza entre o compactado isostaticamente e o compactado uniaxialmente, quando comparados aos apenas sinterizados. Podemos constatar também, através da observação da figura 12, uma queda gradual desta propriedade à medida que as etapas de tratamento são realizadas (desde a têmpera até o revenimento triplo), para as duas temperaturas de austenitização (1135 e 1235°C). Os valores encontrados para a dureza dos materiais temperados a 1235°C são ligeiramente maiores que os temperados a 1135°C (figura 12). Essas diferenças se apresentam maiores para o material compactado isostaticamente que para o compactado uniaxialmente.

## CONCLUSÕES

Foi possível obter a partir dos dois métodos de compactação o aço rápido AISI T15 sinterizado a vácuo com presença de fase líquida. Para ambos os métodos, o material obtido apresentou uma boa distribuição de carbonetos e uma baixíssima porosidade, apesar das diferenças entre as densidades, tamanho de carbonetos e dureza encontradas.

A elevada retração ocorrida durante a sinterização no material compactado isostaticamente a frio (33%) aliada a grande quantidade de fase líquida formada pode ter proporcionado uma maior precipitação e crescimento dos carbonetos primários nos contornos de grãos (MC e  $M_6C$ ).

Mesmo utilizando-se uma baixa taxa de resfriamento ( $1,4^\circ\text{C}/\text{min}$ ) na sinterização dos materiais, elevados valores para a dureza foram obtidos, principalmente para o material compactado isostaticamente a frio. A diferença encontrada nos valores da dureza entre os dois métodos de compactação (apenas sinterizados), estão de acordo com os resultados em microscopia eletrônica, nos quais o material que apresenta uma maior quantidade e tamanho médio de carbonetos possui uma dureza mais elevada.

A queda gradual da dureza encontrada para ambos os materiais em função das etapas de tratamento, apesar do aumento da concentração de carbonetos ( $M_6C$ ), pode ser atribuída a uma redução do teor de carbono da matriz em detrimento da nucleação de carbonetos primários, principalmente nos contornos dos grãos.

De uma maneira geral, o material submetido a maior a temperatura de austenitização ( $1235^\circ\text{C}$ ) apresentou uma maior a dureza, independentemente do método de compactação e das etapas de tratamento.

## REFERÊNCIAS

1. Hoyle, G., 1988, "High speed steels". Butterworth & Co, London.
2. Roberts, G. A. and Cary, R. A., 1980, "Tool steels". Metals Park: ASM, 4 ed., pp. 627-772.
3. Kar, P. K.; Saha, B. P.; Upadhyaya, G. S., 1993, "Properties of sintered T15 and T42 high speed steels". The International Journal of Powder Metallurgy, Vol. 29, nº 2, pp. 139-148.

4. Igharo, M., Brewin, P. and Wood, J., 1990, "Development of sintered high speed steel alloys for wear applications". World Conference on Powder Metallurgy, Vol. 1, pp. 266-271.
5. Igharo, M and Wood, J., 1990, "Effects of consolidation parameter on properties of sintered high speed steel". Powder Metall, Vol. 23, Nº 1, pp. 70-76.
6. Lenel, V. and Fritz, 1980, "Metallurgy principles and applications". Metall Powder Industries Federation, New Jersey.
7. Wilson, R. 1975, "Metallurgy and heat treatment of tool steels". McGraw-Hill Book Company (UK) Limited.
8. Brewin, P. R., Toloui, B., Nurthen, P. D., Fellget, J. A., Wood, J. V., Igharo, M., Coleman, D. S. and Shaikh, Q., 1989, "Effect of process variables and microstructure on properties of sintered high speed steel for wear applications". Powder Metallurgy, Vol. 32, Nº 4, pp. 285-290.

## INFLUENCE OF THE PRESSING METHOD AND THE TEMPERATURES AND STAGES OF TREATMENT IN THE MICROSTRUCTURE AND HARDNESS OF VACUUM SINTERIZED AISI T15 HIGH SPEED STEEL

### ABSTRACT

The powder of the AISI T15 high speed steel supplied by Coldstream Inc. was pressed at approximately 350 MPa to CIP and 700 MPa to uniaxial pressed. After that, the material was sintering in a vacuum furnace at 1270°C. Later on, different samples of the materials were submitted to recovering treatments at 870°C, hardening at 1135 and 1235°C and tempering at 560°C. Density and hardness measures of the sinterized and treated material were obtained. To verify the present phases and evaluate the microstructures obtained were realized analysis in X-ray diffraction, SEM and microanalysis in EDS. It is waited in this work obtain a high density and hardness material with distribution and sizes of the carbides relatively uniform and determine the influence of the pressing methods and treatments in the microstructure and hardness of the vacuum sinterized AISI T15 high speed steel.

Keywords: Powder metallurgy, high speed steels, CIP, liquid phase sintering.