

INFLUÊNCIA DAS TEMPERATURAS DE TRATAMENTO NA MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO RÁPIDO AISI T15 OBTIDO POR DIFERENTES PROCESSOS

E. P. R. Lima¹, M. D. M. Neves¹, C. H. L. Silva², S. Delijaicov³, F. Ambrozio Filho³

¹IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

Av. Lineu Prestes 2242, Cidade Universitária, CEP: 05508-000, São Paulo/SP/Brasil

E-mail: emmanuel@epri.com.br

²HURTH INFER BRASIL

³UniFEI - Centro Universitário da FEI

RESUMO

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência das temperaturas de tratamento na microestrutura e propriedades mecânicas do aço rápido AISI T15 obtido por diferentes processos: compactação isostática a quente – HIP (comercial) sinterização a vácuo com fase líquida. Todos os materiais foram submetidos aos tratamentos térmicos de recozimento a 870°C, austenitização a 1210 e 1235°C e revenimentos triplos a 540, 550 e 560°C. Finalizados os tratamentos, foram realizadas medidas de dureza Rockwell C e, para se avaliar a tenacidade do material, ensaios de flexão em três pontos (resistência à ruptura transversal - TRS). Posteriormente, os materiais foram submetidos à preparação metalográfica para realização da análise microestrutural em microscopias óptica e eletrônica de varredura (MEV), microanálise por energia dispersiva – EDS e difração de raios X. Por fim, foram avaliadas e correlacionadas cada propriedade analisada com os diferentes tratamentos realizados.

Palavras-chave: Metalurgia do pó, aços rápidos, AISI T15, tratamentos térmicos.

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 [1]. Outra importante característica destes aços é a capacidade de manter

durezas elevadas se submetidos a temperaturas de até 600°C [2]. 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 [3]. 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 [4].

Os aços rápidos AISI T15 são normalmente produzidos por técnicas de metalurgia do pó. Dentre as rotas de fabricação que utilizam esta tecnologia duas das mais difundidas são: a prensagem isostática a quente (HIP) e a sinterização com fase líquida. A primeira utiliza pós de aço rápido atomizado com gás inerte e prensados isostaticamente a quente, em temperatura e pressão da ordem de 1100°C e 100 MPa, respectivamente [5]. Na segunda técnica, os pós são atomizados a água e compactados em prensas uniaxiais ou isostáticas e posteriormente sinterizados sob vácuo ou atmosfera protetora, em temperaturas da ordem de 1260 +/- 15°C, onde ocorre a formação de fase líquida [6], favorecendo, portanto, os mecanismos de difusão, dissolução e re-precipitação [7].

Os aços sinterizados são tratados termicamente de maneira análoga aos aços obtidos por fundição, lingotamento e conformação, ou seja, têmpera seguida de revenimento. Os sinterizados tendem a responder mais rapidamente e com melhor previsibilidade aos tratamentos térmicos, devido a sua microestrutura mais fina e uniforme. Nos tratamentos térmicos, independentemente das seqüências de processamento ocorrem os processos: dissolução de carbonetos, precipitação de carbonetos pró-eutetóides, transformação da austenita em martensita e precipitação de carbonetos na martensita.

Neste trabalho é avaliada a influência das temperaturas de tratamento na microestrutura, tenacidade e dureza de aços rápidos AISI T15 obtidos por dois processos diferentes.

MATERIAIS E MÉTODOS

O pó do aço rápido AISI T15 atomizado a água foi fornecido pela Coldstream Inc., enquanto que o aço rápido comercial compactado isostaticamente a quente (*HIP – Hot Isostatic Pressing*) foi fornecido, na forma de tarugo, pela Eramet Latin

América LTDA. As composições químicas dos dois aços rápidos são mostradas na tabela (I).

Tabela I. Composição química do aço rápido AISI T15 [% peso].

Elementos	C	W	Co	V	Cr	Mo	Si	Fe
Sinterizado a vácuo	1,59	12,08	4,95	4,91	4,05	0,82	0,28	Bal.
Comercial	1,56	12,00	4,97	4,93	3,91	0,43	0,50	Bal.

Primeiramente, amostras do pó do aço rápido foram compactadas uniaxialmente a frio em matriz metálica a uma pressão de aproximadamente 700 MPa e sinterizadas a vácuo, com presença de fase líquida, a uma temperatura de 1275°C ($\pm 3^\circ\text{C}$) por uma hora. Medidas de densidade antes e após a sinterização foram realizadas. Em seguida, amostras dos dois materiais (comercial e sinterizado a vácuo) foram submetidas aos seguintes tratamentos térmicos: recozimento a 870°C, austenitização a 1210 e 1235°C (têmpera ao ar) e revenimentos triplo a 540, 550 e 560°C. Todos os tratamentos térmicos foram realizados em banho de sal [8].

Concluídos os tratamentos térmicos, amostras dos materiais foram submetidas à preparação metalográfica (lixamento, polimento e ataque químico com solução de Picral a 4%) para realização da análise microestrutural em microscopias óptica e eletrônica de varredura (MEV) e microanálise por energia dispersiva - EDS. A análise microestrutural (MEV) e a microanálise por EDS foram realizadas em um microscópio eletrônico de varredura Philips XL-30. Para se avaliar a eficácia dos tratamentos térmicos e a tenacidade dos materiais, foram realizadas medidas de dureza Rockwell C (10 impressões em cada corpo de prova) e ensaios de flexão em três pontos (TRS), respectivamente. As medidas de tamanho de grão e diâmetro dos carbonetos foram determinadas por meio digital utilizando-se o software analisador de imagens "Quantikov". Por fim, foram avaliados e correlacionados cada parâmetro analisado com os diferentes materiais e tratamentos utilizados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As densidades obtidas para as amostras compactadas antes e após a sinterização foram de $6,19 \pm 0,08 \text{ g/cm}^3$ e $8,07 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$, o que corresponde a respectivamente, 75,21% e 98,06% da densidade do aço rápido AISI T15 obtido por fusão e lingotamento. O material comercial apresentou uma densidade de $8,18 \pm$

0,02 g/cm³ (99,39%). Conforme esperado, as densidades das amostras compactadas isostaticamente a quente apresentaram valores superiores em consequência da maior eficiência deste processo na eliminação da porosidade [9].

O resultado da caracterização estrutural dos aços rápidos AISI T15 por difração de raios X mostrado na figura 1 indica que os materiais consistem de uma matriz de ferrita (α) com carbonetos do tipo M_6C (rico em W) e MC (rico em V ou W).

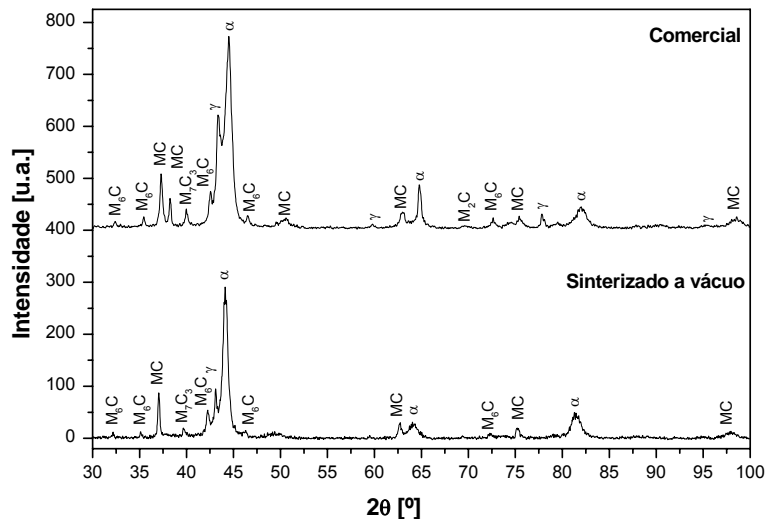


Figura 1. Difractograma do aço rápido AISI T15 (Cu- $K\alpha$).

A figura 2 apresenta micrografias (MEV e óptica) do aço rápido AISI T15 sinterizado a vácuo, temperado a 1235°C e revenido triplo a 540°C, contendo carbonetos do tipo MC e M_6C numa matriz martensítica revenida.

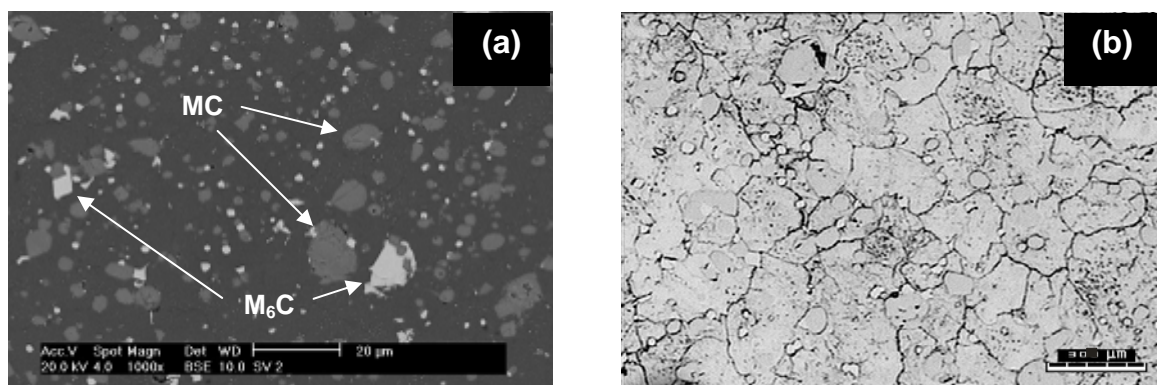


Figura 2. Micrografia de MEV (a) e óptica (b) do aço rápido AISI T15 austenitizado a 1235°C e revenido triplo a 540°C.

Além disso, podemos observar na figura (2a) que a quantidade e o tamanho dos carbonetos do tipo MC (cinza) são bem superiores que os dos carbonetos

eutéticos do tipo M_6C (brancos). Isso pode ser justificado pela baixa solubilidade na austenitização dos carbonetos do tipo MC [1] aliada à menor difusão durante o revenimento, devido à temperatura mais baixa, dificultando ainda mais a dissolução e a re-precipitação dos carbonetos. A identificação dos carbonetos foi realizada por microanálise de energia dispersiva – EDS.

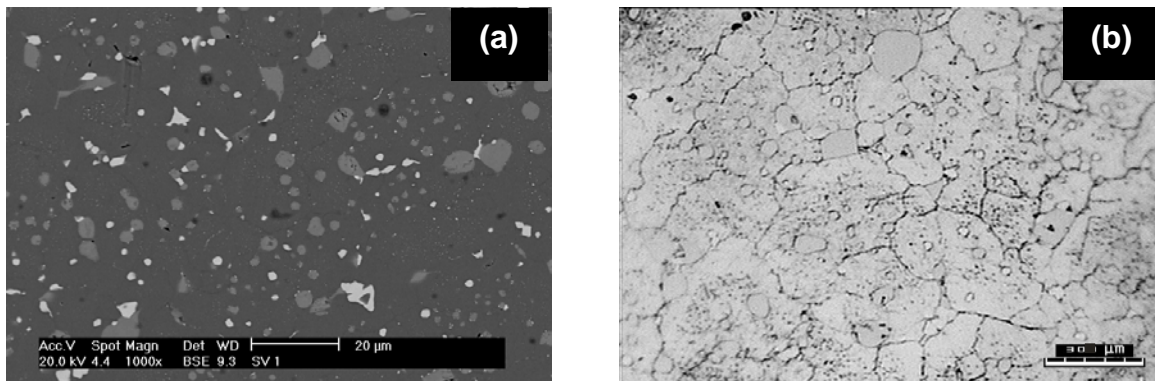


Figura 3. Micrografia de MEV (a) e óptica (b) do aço rápido AISI T15 austenitizado a 1235°C e revenido triplo a 550°C.

No que diz respeito às amostras tratadas a 550 e 560°C (revenimento triplo), verifica-se um aumento na quantidade de carbonetos do tipo M_6C (brancos), como mostrado nas figuras 3 e 4. Nenhuma alteração nos tamanhos de grão é verificada.

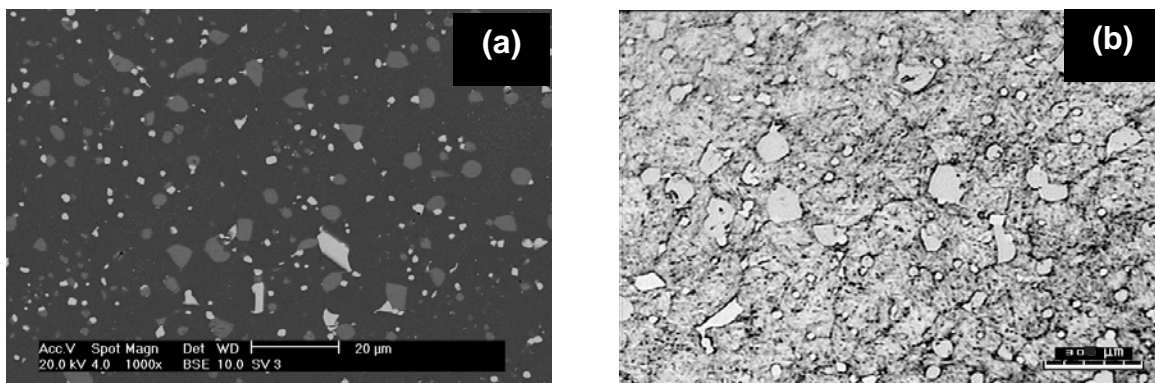


Figura 4. Micrografia de MEV (a) e óptica (b) do aço rápido AISI T15 austenitizado a 1235°C e revenido triplo a 560°C.

No que diz respeito às amostras do aço rápido comercial podemos observar na figura 5 que tanto os carbonetos quanto os grãos austeníticos apresentam um tamanho bem menor quando comparados aos do aço rápido sinterizado a vácuo. Além disso, podemos notar que há uma distribuição mais uniforme dos carbonetos (MC e M_6C) na matriz e uma menor dispersão nos seus tamanhos e morfologias.

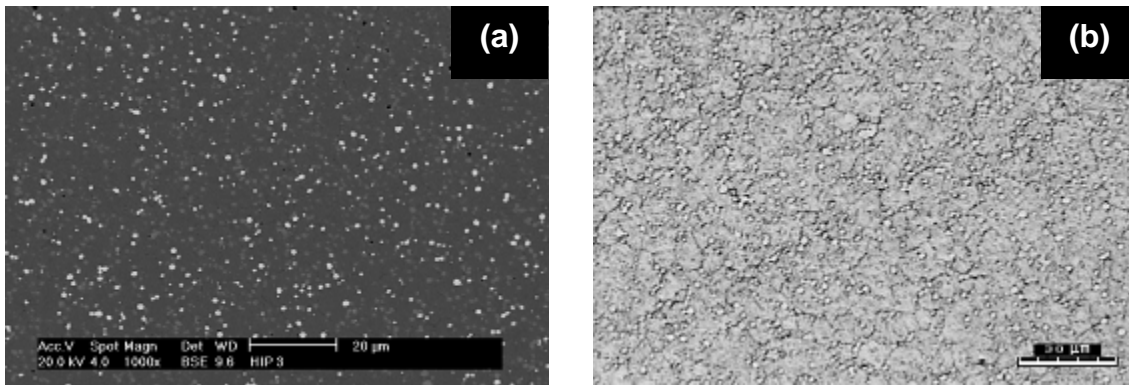


Figura 5. Micrografia de MEV (a) e óptica (b) do aço rápido AISI T15 austenitizado a 1235°C e revenido triplo a 540°C.

As amostras revenidas a 550°C (figura 6) apresentam basicamente as mesmas características das tratadas a 540°C, não apresentando diferenças morfológicas relevantes apesar da maior temperatura de tratamento.

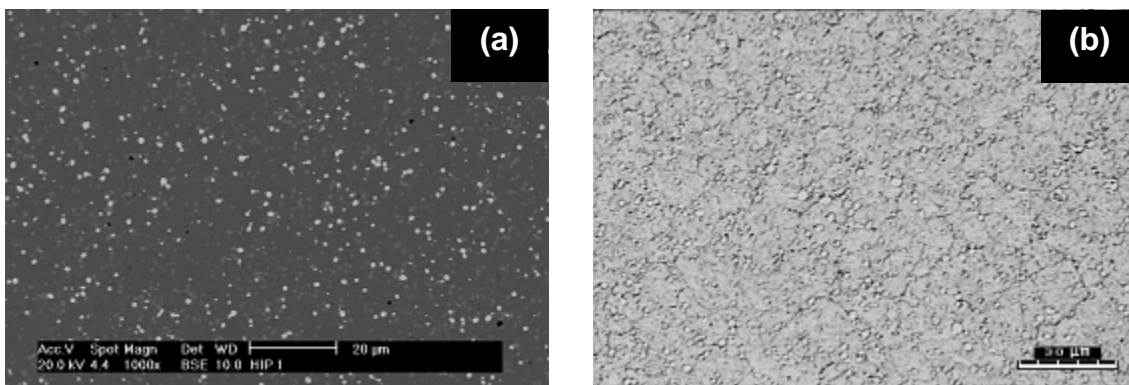


Figura 6. Micrografia de MEV (a) e óptica (b) do aço rápido AISI T15 austenitizado a 1235°C e revenido triplo a 550°C.

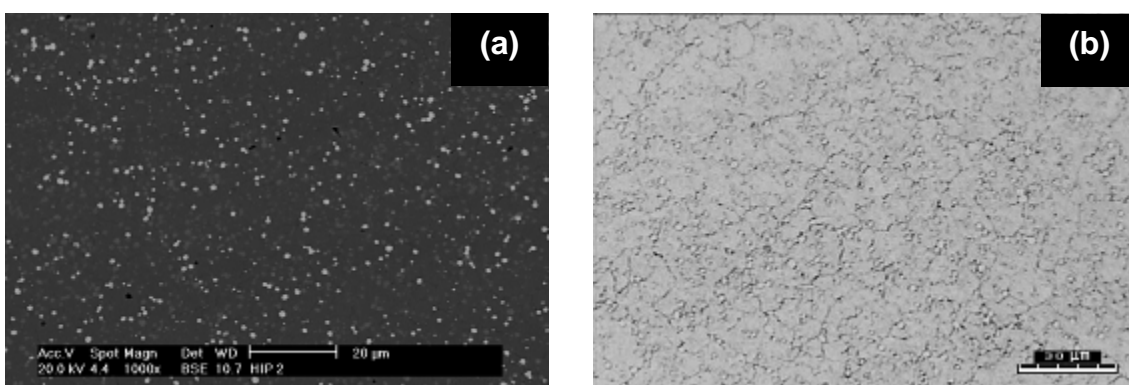


Figura 7. Micrografia de MEV (a) e óptica (b) do aço rápido AISI T15 austenitizado a 1235°C e revenido triplo a 560°C.

No entanto, as amostras revenidas a 560°C (figura 7) apresentam uma concentração de carbonetos sensivelmente menor que as encontradas para as outras temperaturas de tratamento.

O fato do aço rápido compactado isostaticamente a quente (comercial) apresentar tamanhos de carbonetos e grãos bem menores que os do sinterizado a vácuo se deve a maior eficiência do processo (temperaturas de sinterização mais baixas) e a utilização de pós mais finos e uniformes (atomizados a gás) [9].

A figura 8 apresenta micrografias (MEV e óptica) do aço rápido AISI T15 sinterizado a vácuo, austenitizado a 1210°C e revenido triplo a 540°C, contendo carbonetos do tipo MC e M₆C numa matriz martensítica revenida.

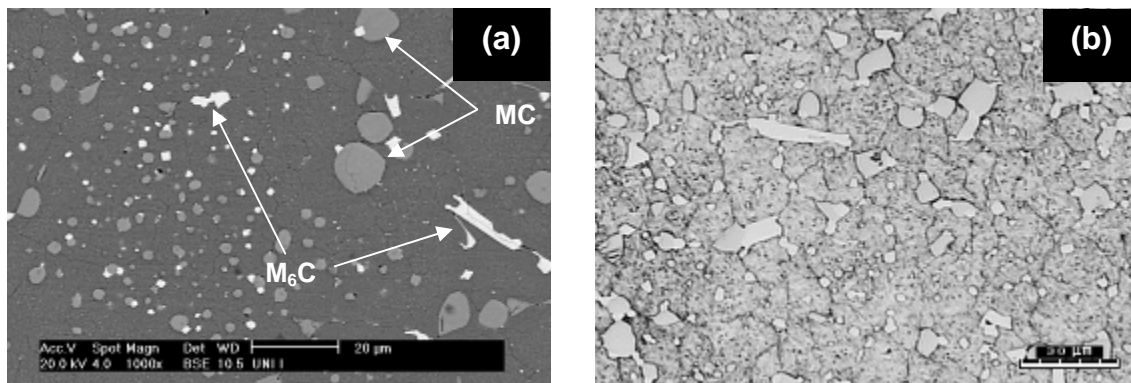


Figura 8. Micrografia de MEV (a) e óptica (b) do aço rápido AISI T15 austenitizado a 1210°C e revenido triplo a 540°C.

Com relação ao material austenitizado a 1235°C, o tratado a 1210°C apresenta tamanhos de grão bem menores.

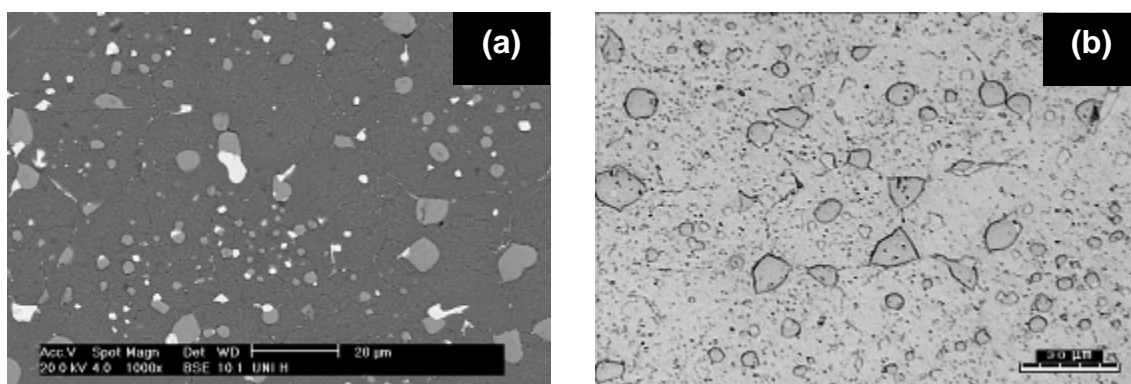


Figura 9. Micrografia de MEV (a) e óptica (b) do aço rápido AISI T15 austenitizado a 1210°C e revenido triplo a 550°C.

As amostras revenidas a 550°C não apresentaram diferenças significativas na morfologia dos carbonetos, no entanto, com relação a sua distribuição, esta se mostrou um pouco mais dispersa (figura 9a). Resultado semelhante foi obtido com relação aos tamanhos de grão (figura 9b), indicando um elevado grau de heterogeneidade microestrutural para este material.

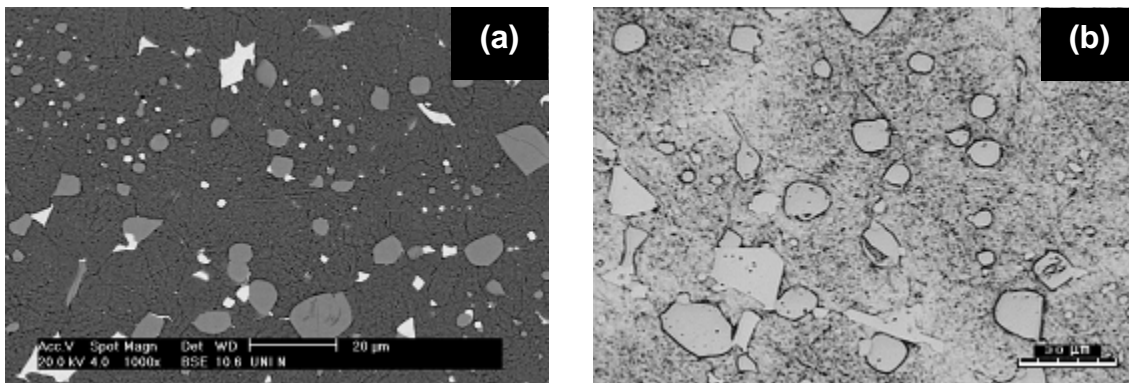


Figura 10. Micrografia de MEV (a) e óptica (b) do aço rápido AISI T15 austenitizado a 1210°C e revenido triplo a 560°C.

No que diz respeito às amostras revenidas a 560°C, verifica-se um aumento da dispersão dos tamanhos de carbonetos, principalmente dos do tipo MC (figura 10a). Além disso, também é possível verificar uma maior diferença na distribuição dos carbonetos pela matriz (figura 10b). Tais resultados sugerem que para esta temperatura de revenimento (560°C) possa estar ocorrendo dissolução ou coalescimento dos carbonetos menores (M_6C) simultaneamente ao crescimento e precipitação dos do tipo MC e M_2C [10].

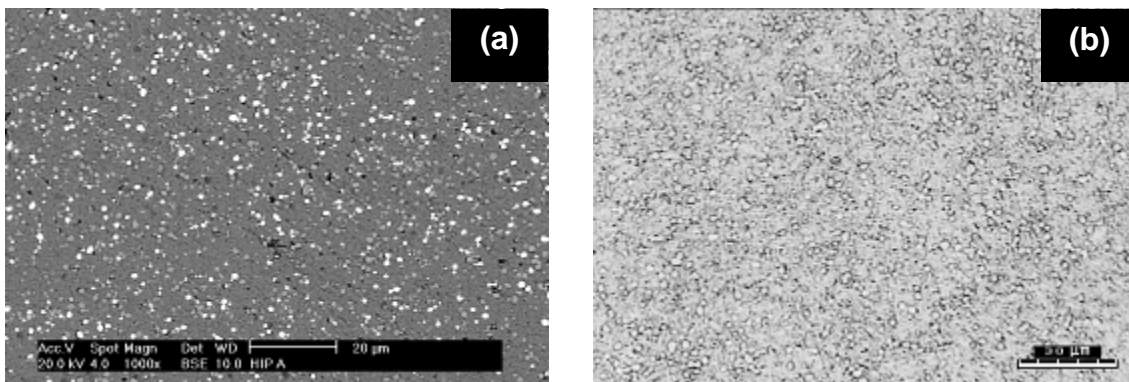


Figura 11. Micrografia de MEV (a) e óptica (b) do aço rápido AISI T15 austenitizado a 1210°C e revenido triplo a 540°C.

Da mesma maneira que para o material austenitizado a 1235°C, o aço rápido comercial tratado a 1210°C apresentou tamanhos de grão e de carbonetos bem menores (figura 11) quando comparados aos do aço rápido sinterizado a vácuo. Podemos observar nas figuras (11a) e (11b) uma distribuição uniforme dos carbonetos (MC e M_6C) pela matriz, assim como, uma maior concentração dos carbonetos do tipo M_6C (brancos) além de um menor tamanho de grão quando comparados com o material obtido pelo mesmo processo e austenitizado a 1235°C.

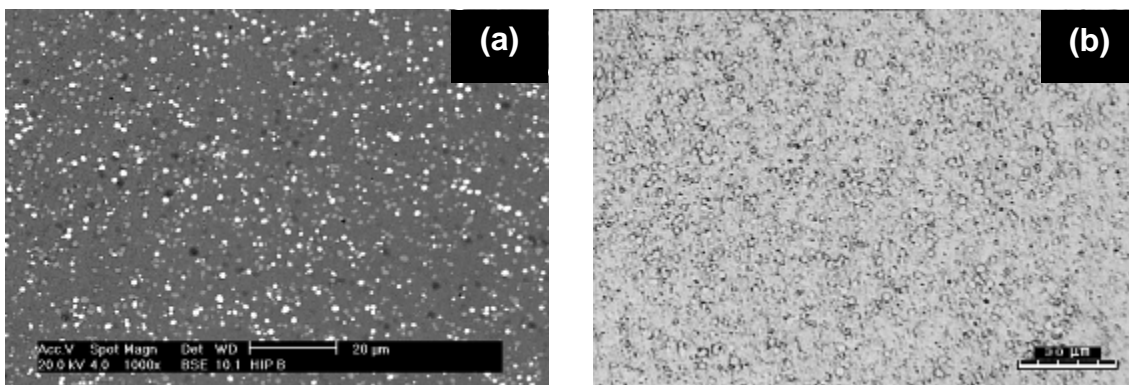


Figura 12. Micrografia de MEV (a) e óptica (b) do aço rápido AISI T15 austenitizado a 1210°C e revenido triplo a 550°C

Com relação ao material submetido ao triplo revenimento a 550°C, podemos observar na figura 12 que não houve alterações significativas com relação à morfologia e distribuição dos carbonetos, havendo apenas um discreto aumento no tamanho dos grãos quando comparado com o tratado a 540°C (figura 12b).

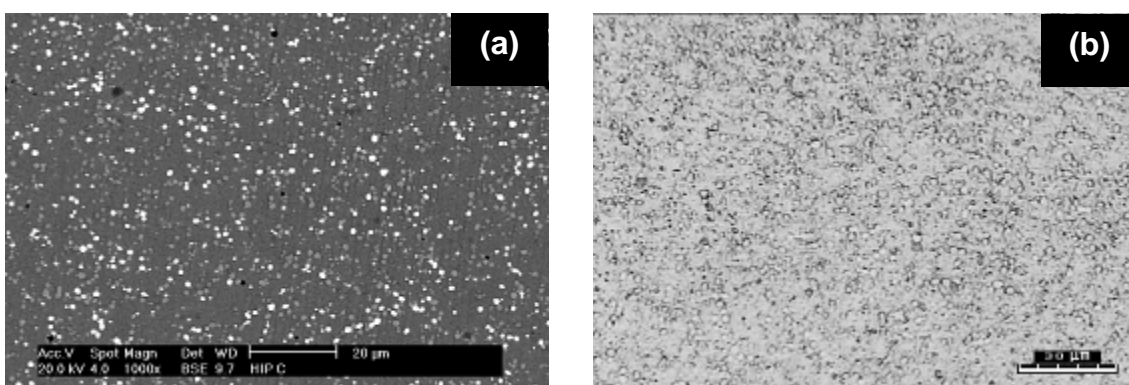


Figura 13. Micrografia de MEV (a) e óptica (b) do aço rápido AISI T15 austenitizado a 1210°C e revenido triplo a 560°C.

Um sensível aumento dos tamanhos de grão e de carbonetos foi encontrado para o material revenido a 560°C (figura 13). Também é possível notar um discreto aumento da concentração dos carbonetos do tipo M₆C (brancos), os quais apresentam diâmetros sensivelmente maiores que os do tipo MC (cinza).

Uma análise comparativa pode ser realizada a partir das tabelas II e III, onde são apresentados os tamanhos médios dos grãos, os diâmetros médios dos carbonetos e os valores de dureza Rockwell C e de resistência à ruptura transversal (TRS).

Tabela II. Medidas do tamanho de grão austenítico, diâmetro médio dos carbonetos, dureza Rockwell C e resistência à ruptura transversal (TRS) para o aço rápido AISI T15 austenitizado a 1235°C.

Material - Revenimento	Tamanho de grão [μm]	Φ Carbonetos [μm]	Dureza [HRc]	TRS [MPa]
SV - 3 x 540°C	31,047 ± 5,201	1,1922 ± 0,91718	64,64 ± 0,30	1071 ± 133
SV - 3 x 550°C	38,810 ± 4,443	1,0334 ± 0,73629	63,66 ± 0,36	1171 ± 134
SV - 3 x 560°C	44,372 ± 6,443	1,0893 ± 0,75368	63,57 ± 0,39	1206 ± 218
HIP - 3 x 540°C	11,537 ± 2,311	0,7120 ± 0,29110	67,19 ± 0,21	1549 ± 68
HIP - 3 x 550°C	12,898 ± 1,405	0,7887 ± 0,21962	66,40 ± 0,18	1577 ± 85
HIP - 3 x 560°C	16,870 ± 2,081	0,8150 ± 0,24741	65,89 ± 0,15	1746 ± 98

Tabela III. Medidas do tamanho de grão austenítico, diâmetro médio dos carbonetos, dureza Rockwell C e resistência à ruptura transversal (TRS) para o aço rápido AISI T15 austenitizado a 1210°C.

Material - Revenimento	Tamanho de grão [μm]	Φ Carbonetos [μm]	Dureza [HRc]	TRS [MPa]
SV - 3 x 540°C	19,754 ± 4,897	1,1326 ± 0,8913	65,36 ± 0,32	1409 ± 148
SV - 3 x 550°C	20,586 ± 6,488	1,0517 ± 0,7095	64,50 ± 0,27	1445 ± 101
SV - 3 x 560°C	20,941 ± 6,823	1,0848 ± 0,7360	63,91 ± 0,23	1579 ± 180
HIP - 3 x 540°C	09,247 ± 2,121	0,6764 ± 0,2765	67,41 ± 0,25	2050 ± 82
HIP - 3 x 550°C	10,697 ± 1,914	0,7493 ± 0,2086	66,86 ± 0,41	2180 ± 79
HIP - 3 x 560°C	10,844 ± 2,002	0,7743 ± 0,2350	65,90 ± 0,35	2312 ± 92

SV – Material compactado uniaxialmente a frio e sinterizado a vácuo

HIP – Material compactado isostaticamente a quente

Os maiores tamanhos médios de grão e de carbonetos para cada temperatura de tratamento utilizada (austenitização e revenimento) foram encontrados para o aço rápido sinterizados a vácuo. Além disso, os materiais austenitizados a 1210°C apresentaram tamanhos de grão bem menores que os tratados a 1235°C.

Com relação às propriedades mecânicas, observamos uma discreta diminuição da dureza em função do aumento da temperatura de revenimento para os dois materiais estudados. Um comportamento inverso é verificado para a resistência à ruptura transversal (TRS). Tais resultados, aliados a trabalhos anteriores [11], sugerem que o intervalo no qual se atinge a maior dureza (pico de dureza secundário) se encontra abaixo dos 550°C, dessa forma, o aumento da temperatura de revenimento contribui apenas para o alívio das tensões internas provocadas na têmpera e para o aumento da ductilidade do material. Também é possível observar que o aço rápido compactado isostaticamente a quente foi o que apresentou os maiores valores de dureza e de TRS. Este comportamento pode ser justificado pelo menor tamanho de grão e pela maior uniformidade microestrutural (morfologia e distribuição) encontrada para este material.

CONCLUSÕES

1. Foi possível obter o aço rápido AISI T15 por sinterização a vácuo com fase líquida. A densidade relativa obtida para o material sinterizado a vácuo 98,06%;
2. Devido a sua microestrutura mais uniforme e refinada, o aço rápido AISI T15 compactado isostaticamente a quente (comercial) é o que apresentou as melhores propriedades mecânicas (dureza e resistência à ruptura transversal);
3. O pico de dureza secundário para os aços rápidos AISI T15 comercial e sinterizado a vácuo corresponde à temperatura de 540°C para o triplo revenimento.
4. Os baixos valores de resistência à ruptura transversal apresentados para o aço rápido sinterizado a vácuo podem ser atribuídos aos elevados tamanhos de grão e à baixa uniformidade microestrutural (distribuição e tamanhos dos carbonetos) encontrados;
5. A temperatura de austenitização de 1210°C foi a que produziu os menores tamanhos de grão e as melhores propriedades mecânicas.

REFERÊNCIAS

- [1] Hoyle, G., Butterworth & Co, London 1988.
- [2] Roberts, G. A. and Cary, R. A., Metals Park: ASM, 1980, 4 ed., p. 627-772.

- [3] Kar, P. K.; Saha, B. P.; Upadhyaya, G. S., The International Journal of Powder Metallurgy, 1993, Vol. 29, nº 2, p. 139-148.
- [4] Igharo, M., Brewin, P. and Wood, J, World Conference on Powder Metallurgy, 1990, Vol. 1, p. 266-271.
- [5] Hellmann, P.; Larker, H.; Pfeifer, J. B.; Stromblad, I. Powder metal., 1971, v. 4A, p. 573-582.
- [6] Bee, J. V.; Brewin, P. R.; Wood, J. V., MPR, 1988, p. 170-190.
- [7] Lenel, V. Fritz., Metal powder industries federation, New Jersey, 1980.
- [8] Wilson, R., McGraw-Hill, London, 1975, p. 163-181.
- [9] Koizumi, M.; Nishihara, M., Elsevier, London and New York, 1991.
- [10] Nogueira, R. A.; Ribeiro, O. C. S.; Neves, M. D. M.; Salgado, L.; Ambrozio Filho, F. IV PTECH, Guarujá-SP, 2003.
- [11] Lima, E. P. R., Neves, M. D. M., Nogueira, R. A., Oliveira, L. G. C., Ambrozio Filho, F., VI PTECH, Búzios-RJ, Brazil, 2007.

INFLUENCE OF THE HEAT TREATMENT ON MICROSTRUCTURE AND
MECHANICAL PROPERTIES OF AISI T15 HIGH SPEED STEELS MADE OF
DIFFERENT PROCESSES

ABSTRACT

The purpose of this study is to evaluate the influence of the heat treatment on microstructure and mechanical properties of AISI T15 high speed steels made of different processes: HIP (commercial) and liquid phase vacuum sintering. All the materials were submitted to the annealing treatment at 870°C, quenching at 1210 and 1235°C and triple tempering at 540, 550 and 560°C. Concluded the treatments, Rockwell C measurements of hardness were accomplished and, to evaluate the toughness of the material, TRS (Transverse Rupture Strength) tests were done. Later on, the materials were submitted to the metallographic preparation for microstructure analysis in optical microscopy, SEM, EDX and X-ray diffraction. Finally, each property analyzed was evaluated and correlated with the different treatments accomplished.

Key-words: Powder metallurgy, high speed steels, AISI T15, heat treatments.