

## ANÁLISE DO DESGASTE DE FERRAMENTAS DE CORTE DE AÇOS RÁPIDOS SUBMETIDOS A DIFERENTES TEMPERATURAS DE TRATAMENTO

E. P. R. Lima<sup>1</sup>, M. D. M. Neves<sup>1</sup>, L. P. Barbosa<sup>1</sup>, S. Delijaicov<sup>2</sup>, F. Ambrozio Filho<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>IPEN – 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  
<sup>2</sup>UniFEI - Centro Universitário da FEI

### RESUMO

*O objetivo deste trabalho é a análise do desgaste de ferramentas de aços rápidos AISI T15 produzidos por diferentes processos (HIP e SV) e temperaturas de tratamento. Os materiais foram submetidos aos tratamentos térmicos de recozimento a 870°C, austenitização a 1235 e 1210°C com subseqüentes revenimentos triplos a 540, 550 e 560°C. Em seguida, foram realizadas medidas de densidade, dureza e ensaios de flexão em três pontos (TRS). Para avaliar as microestruturas obtidas foram realizadas análises em microscopias óptica e eletrônica de varredura. Posteriormente, foram confeccionadas por eletroerosão pastilhas intercambiáveis segundo norma específica. A operação utilizada no presente trabalho foi o fresamento de chapas de aço SAE 1045 normalizadas. Para medir os esforços de usinagem, foi utilizado um transdutor constituído basicamente de uma mesa instrumentada com quatro células de carga montadas com sensores do tipo “Strain Gages”. Por fim, foram determinados e analisados comparativamente os desgastes das ferramentas.*

Palavras-chave: Aços rápidos, AISI T15, desgaste, tratamentos térmicos.

### INTRODUÇÃO

A resistência ao desgaste está diretamente relacionada com a eficiência de corte do aço rápido. Essa propriedade depende além da composição da liga e dos tipos de carbonetos, da correta combinação entre tenacidade e dureza <sup>(1)</sup>.

O aço rápido AISI T15 é tratado termicamente de maneira análoga aos aços obtidos por fundição, lingotamento e conformação, ou seja, têmpera seguida de

múltiplos revenimentos a fim de se obter a máxima dureza possível. Isso se faz necessário porque a quantidade de austenita retida diminui com o aumento do número de ciclos de revenimento <sup>(2)</sup>, assim como, há uma precipitação de carbonetos secundários ( $M_2C$ ), responsáveis pelo pico de dureza secundário dos aços rápidos <sup>(2, 3)</sup>.

Neste trabalho é estudada comparativamente a influência das temperaturas de tratamento na resistência ao desgaste de flanco de ferramentas do aço rápido AISI T15, obtidas a partir de dois processos distintos, submetidas a ensaios de usinagem.

## 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 (1).

Tabela 1. 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 1235 e 1210°C (têmpera ao ar) e revenimentos triplos a 540, 550 e 560°C. Todos os tratamentos térmicos foram realizados em banho de sal <sup>(4)</sup>.

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. 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”.

Numa segunda etapa, foram confeccionadas por eletroerosão pastilhas intercambiáveis segundo norma ISO 1832-1977 com o intuito de se analisar o seu desempenho com relação ao desgaste. As pastilhas (insertos) são quadradas, de 12,70 mm de lado, com cantos arredondados de 1,20 mm de raio e espessura de 3,18 mm. A operação utilizada para se avaliar as forças de corte envolvidas e o desgaste destas ferramentas no presente trabalho foi o fresamento de chapas de aço SAE 1045 recozidas e normalizadas, sem a utilização de fluido de corte. O critério de parada utilizado para fim de experimento foi o desgaste de flanco – VB igual a 0,90 mm. Os parâmetros de usinagem utilizados são mostrados na tabela (2).

Por fim, foram avaliados e correlacionados cada parâmetro analisado com os diferentes materiais e condições utilizadas.

Tabela 2. Parâmetros de corte e aquisição de dados utilizados.

| Parâmetro                   | Valor |
|-----------------------------|-------|
| Arestas de corte            | 02    |
| Diâmetro da ferramenta [mm] | 50    |
| Profundidade de corte [mm]  | 0,5   |
| Rotação [rpm]               | 300   |
| Avanço [mm/min]             | 50    |
| Taxa de aquisição [Hz]      | 200   |

## 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  $8,18 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$  (99,39%).

A figura 1 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<sub>6</sub>C numa matriz martensítica revenida.

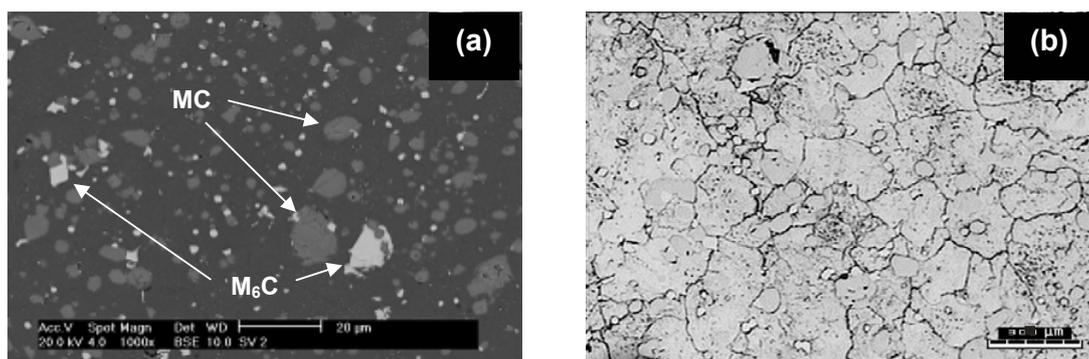


Figura 1. Micrografia de MEV (a) e óptica (b) do aço rápido AISI T15 austenitizado a 1235°C e revenido triplo a 540°C.

Além disso, podemos observar na figura (1a) 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 <sup>(5)</sup> 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.

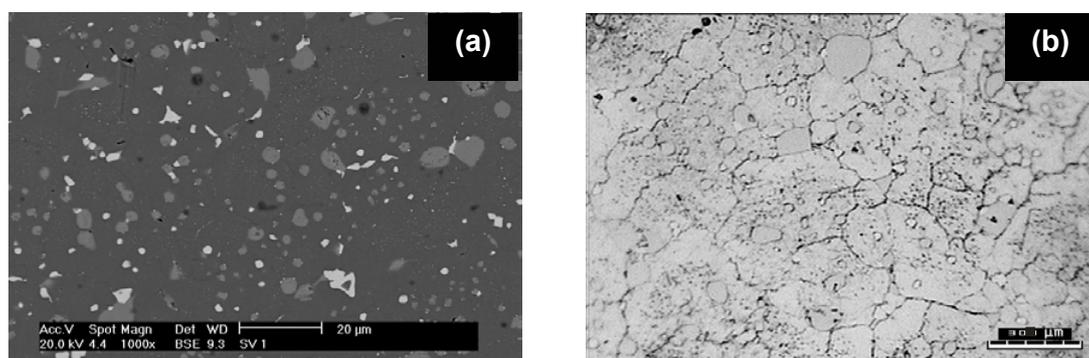


Figura 2. Micrografia de MEV (a) e óptica (b) do aço rápido AISI T15 austenitizado a 1235°C e revenido triplo a 550°C.

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 2 e 3. Nenhuma alteração nos tamanhos de grão é verificada.

Com relação às amostras do aço rápido comercial, podemos observar na figura 4 que tanto os carbonetos quanto os grãos austeníticos apresentam tamanhos bem menores quando comparados aos do aço rápido sinterizado a vácuo.

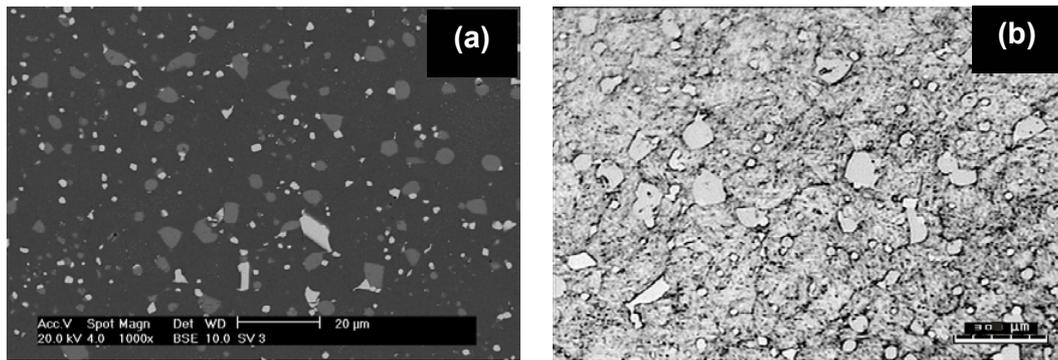


Figura 3. Micrografia de MEV (a) e óptica (b) do aço rápido AISI T15 austenitizado a 1235°C e revenido triplo a 560°C.

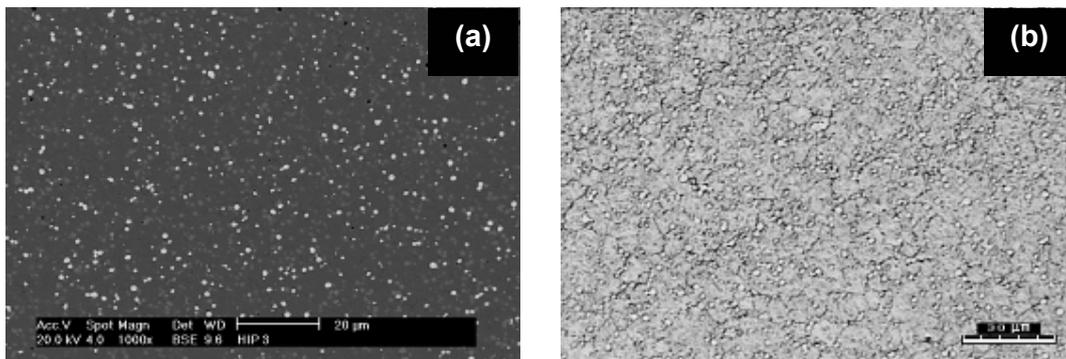


Figura 4. Micrografia de MEV (a) e óptica (b) do aço rápido AISI T15 austenitizado a 1235°C e revenido triplo a 540°C.

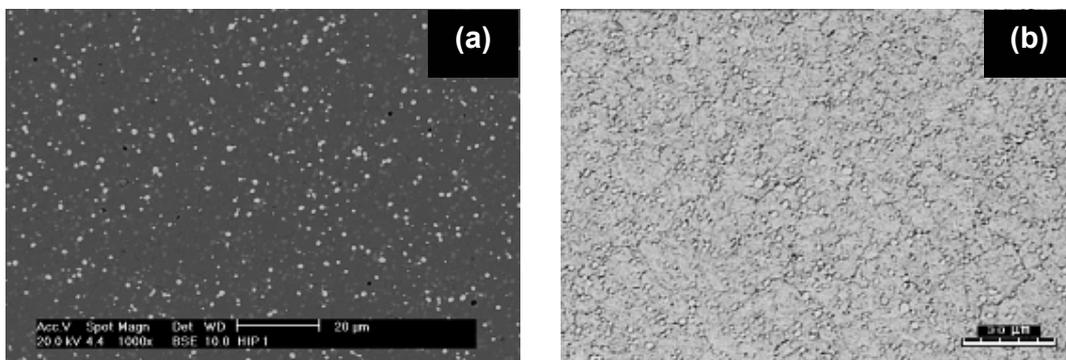


Figura 5. Micrografia de MEV (a) e óptica (b) do aço rápido AISI T15 austenitizado a 1235°C e revenido triplo a 550°C.

As amostras revenidas a 550°C (figura 5) apresentam basicamente as mesmas características das tratadas a 540°C. No entanto, as amostras revenidas a 560°C (figura 6) apresentam uma concentração de carbonetos sensivelmente menor que as encontradas para as outras temperaturas de tratamento.

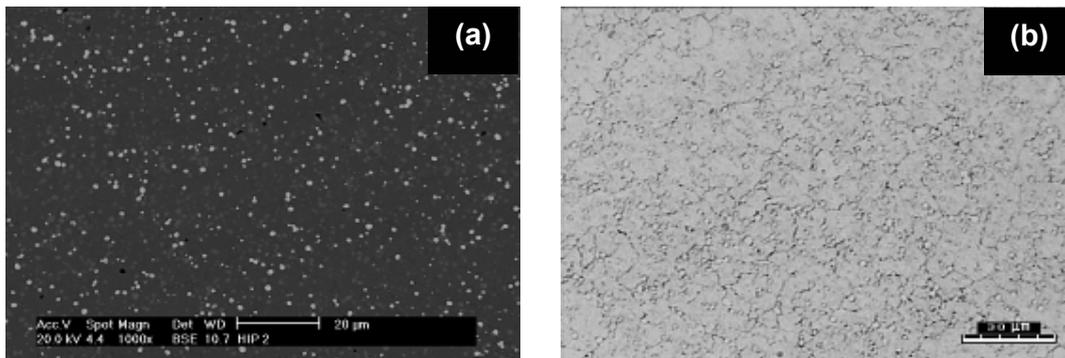


Figura 6. Micrografia de MEV (a) e óptica (b) do aço rápido AISI T15 austenitizado a 1235°C e revenido triplo a 560°C.

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)<sup>(6)</sup>.

A figura 7 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 M<sub>6</sub>C numa matriz martensítica revenida. Com relação ao material austenitizado a 1235°C, o tratado a 1210°C apresenta tamanhos de grão bem menores.

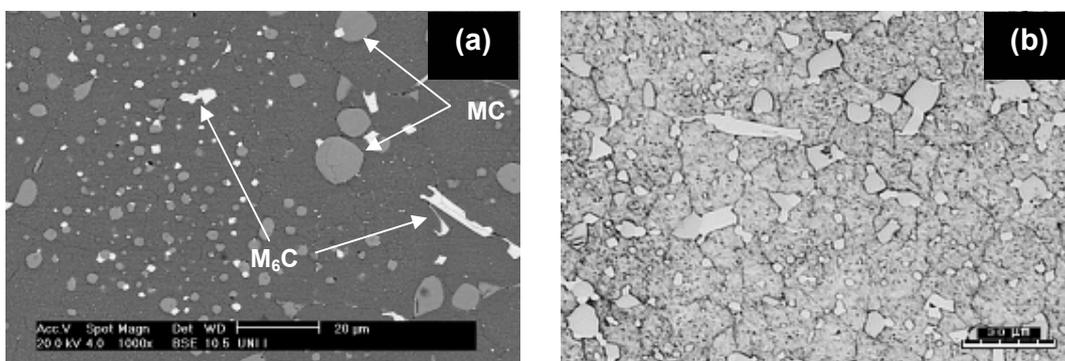


Figura 7. Micrografia de MEV (a) e óptica (b) do aço rápido AISI T15 austenitizado a 1210°C e revenido triplo a 540°C.

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 8a). Resultado semelhante foi obtido com relação aos tamanhos de grão (figura 8b), indicando um elevado grau de heterogeneidade microestrutural para este material.

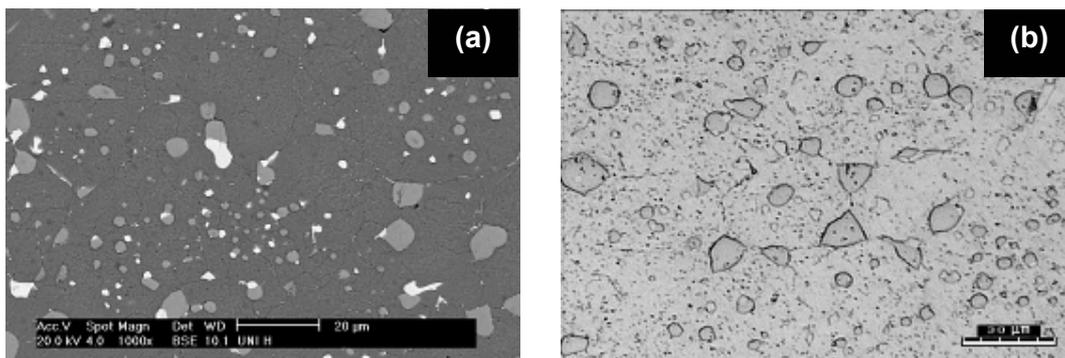


Figura 8. Micrografia de MEV (a) e óptica (b) do aço rápido AISI T15 austenitizado a 1210°C e revenido triplo a 550°C.

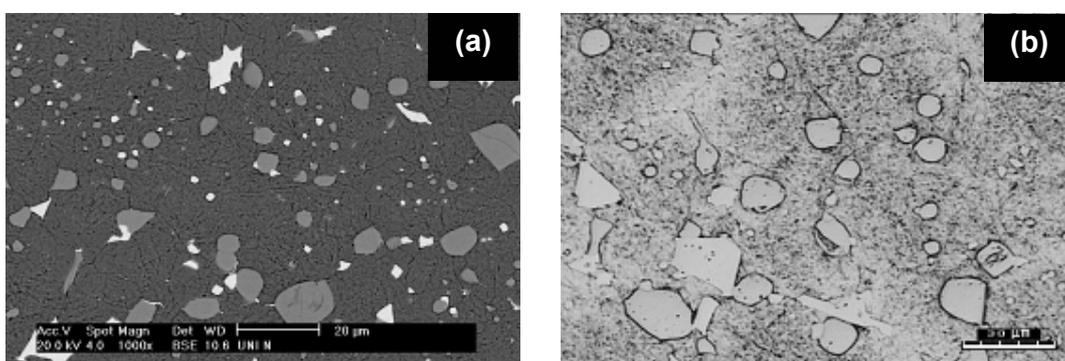


Figura 9. Micrografia de MEV (a) e óptica (b) do aço rápido AISI T15 austenitizado a 1210°C e revenido triplo a 560°C.

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 9a). Além disso, também é possível verificar uma maior diferença na distribuição dos carbonetos pela matriz (figura 9b). 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  $M_2C$  <sup>(7)</sup>.

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 10) quando comparados aos do aço rápido sinterizado a vácuo. Podemos observar nas figuras (10a) e (10b) 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  $1235^\circ\text{C}$ .

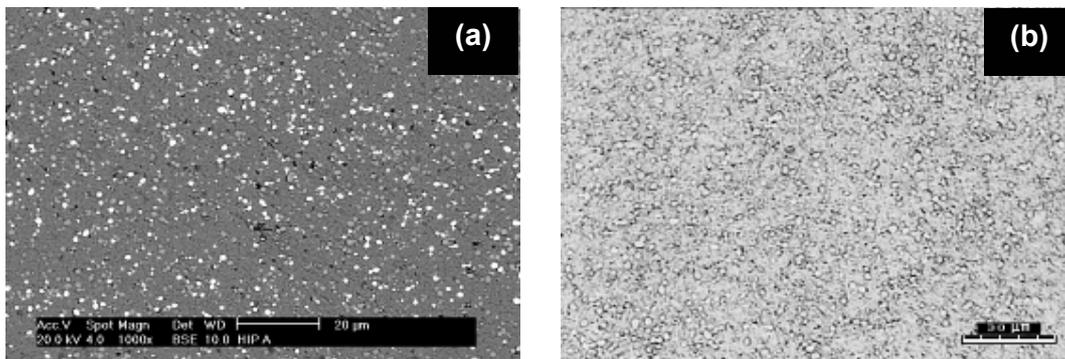


Figura 10. Micrografia de MEV (a) e óptica (b) do aço rápido AISI T15 austenitizado a  $1210^\circ\text{C}$  e revenido triplo a  $540^\circ\text{C}$ .

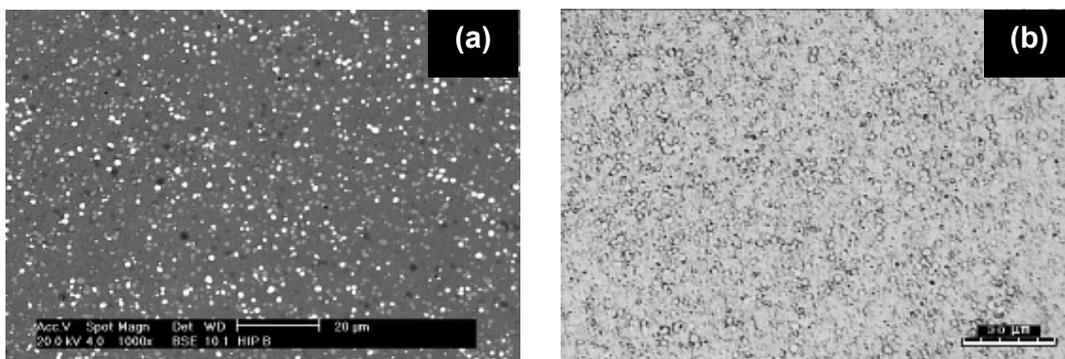


Figura 11. Micrografia de MEV (a) e óptica (b) do aço rápido AISI T15 austenitizado a  $1210^\circ\text{C}$  e revenido triplo a  $550^\circ\text{C}$

Com relação ao material submetido ao triplo revenimento a  $550^\circ\text{C}$ , podemos observar na figura 11 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  $540^\circ\text{C}$  (figura 11b).

Um sensível aumento dos tamanhos de grão e de carbonetos foi encontrado para o material revenido a  $560^\circ\text{C}$  (figura 12). Também é possível notar um discreto aumento da concentração dos carbonetos do tipo  $M_6C$  (brancos), os quais apresentam diâmetros sensivelmente maiores que os do tipo MC (cinza).

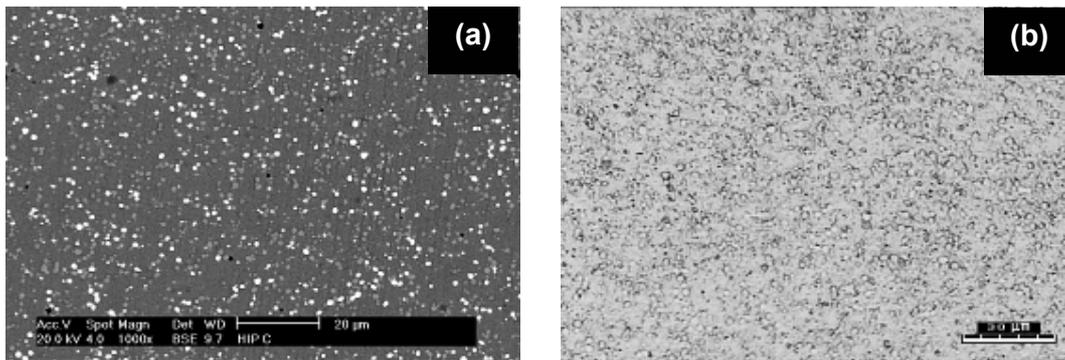


Figura 12. Micrografia de MEV (a) e óptica (b) do aço rápido AISI T15 austenitizado a 1210°C e revenido triplo a 560°C.

Uma análise comparativa pode ser realizada a partir das tabelas 3 e 4, onde são apresentados os tamanhos médios dos grãos e carbonetos e os valores de dureza Rockwell C e de resistência à ruptura transversal (TRS).

Tabela 3. 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 4. 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 isotaticamente 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 aos obtidos em trabalhos anteriores <sup>(8)</sup>, 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 comercial 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.

Com relação às forças de corte, verifica-se nos gráficos da figura 13 que com o aumento do comprimento usinado crescem as diferenças das forças entre as ferramentas triplamente revenidas a 540, 550 e 560°C. Para ambos os materiais, a temperatura de revenimento que apresentou os melhores resultados com relação à evolução das forças de corte foi a de 540°C.

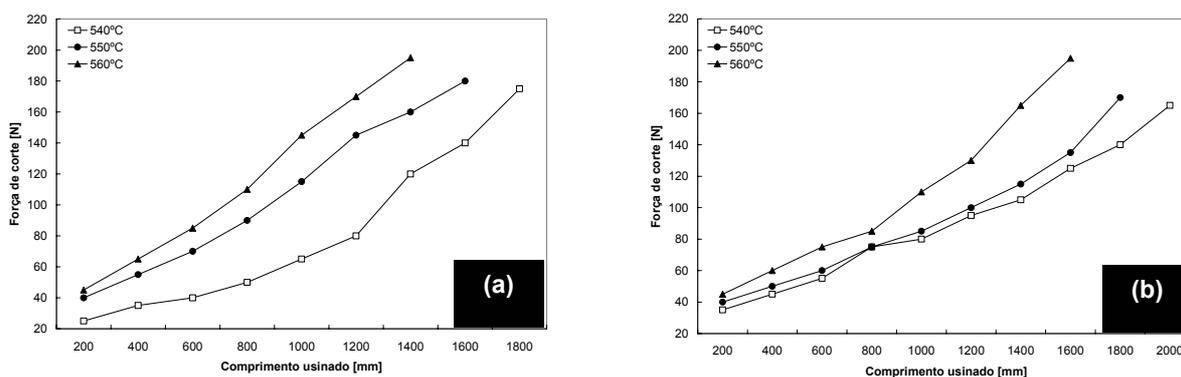


Figura 13. Força de corte em função do comprimento usinado para as ferramentas confeccionadas a partir do aço rápido AISI T15: (a) sinterizado a vácuo e (b) comercial.

Como o aumento das forças de corte é decorrente do desgaste sofrido pela ferramenta, o mesmo comportamento é verificado para o desgaste de flanco – VB (figura 14). Os comprimentos usinados pelas ferramentas confeccionadas a partir do material sinterizado a vácuo e triplamente revenidas a 540, 550 e 560°C foram 1800, 1600 e 1400 mm, respectivamente (figura 14a). Para as ferramentas obtidas a partir do material comercial, a ferramenta que apresentou o melhor desempenho foi àquela submetida ao triplo revenimento a 540°C, usinando 2000 mm até que fosse considerada desgastada. As tratadas a 550 e 560°C usinaram respectivamente 1800 e 1600 mm (figura 14b).

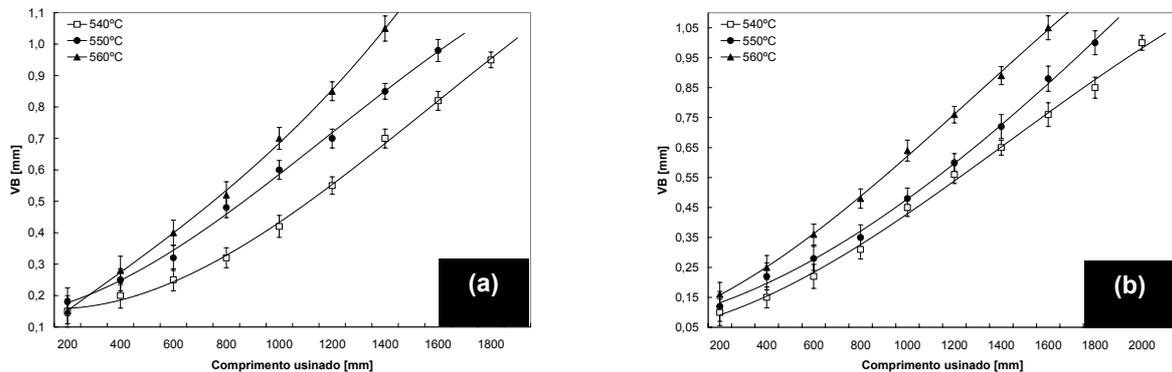


Figura 14. Desgaste de flanco (VB) em função do comprimento usinado para as ferramentas confeccionadas a partir do aço rápido AISI T15: (a) sinterizado a vácuo e (b) comercial.

## CONCLUSÕES

1. Apesar do desgaste sofrido, nenhuma das ferramentas ensaiadas rompeu ou trincou;
2. Quanto maior o desgaste de flanco das ferramentas, maiores as forças de corte envolvidas na operação;
3. A variação da temperatura de revenimento produziu mudanças significativas nas propriedades mecânicas (dureza e TRS) e, conseqüentemente, na resistência ao desgaste das ferramentas do aço rápido AISI T15 obtido pelos dois processos;
4. Para os dois materiais estudados, a temperatura de 540°C foi a que produziu os melhores resultados com relação à resistência ao desgaste;
5. Para a operação, geometria das ferramentas, parâmetros de corte e condições de tratamento térmicos utilizados neste trabalho, a ferramenta confeccionada a

partir do aço rápido AISI T15 comercial obteve um desempenho, com relação ao desgaste de flanco, razoavelmente superior (usinou um comprimento 12% maior) ao da sinterizada a vácuo.

## REFERÊNCIAS

1. Schwarzenbech, W. K., Milling Technique, 1995, nº 5, p. 26-28.
2. ASM Metals Handbook., 1991, Vol. 4, p. 734-760.
3. Brewin, P. R. et al., Powder Metallurgy, 1989, Vol. 32, Nº 4, p. 285-290.
4. Wilson, R., McGraw-Hill, London, 1975, p. 163-181.
5. Hoyle, G., Butterworth & Co, London, 1988.
6. Koizumi, M.; Nishihara, M., Elsevier, London and New York, 1991.
7. Nogueira, R. A.; Ribeiro, O. C. S.; Neves, M. D. M.; Salgado, L.; Ambrozio Filho, F. IV PTECH, Guarujá-SP, 2003.
8. Lima, E. P. R., Neves, M. D. M., Nogueira, R. A., Oliveira, L. G. C., Ambrozio Filho, F., VI PTECH, Búzios-RJ, Brazil, 2007.

## WEAR ANALYSIS IN HIGH SPEED STEEL TOOLS SUBMITTED AT DIFFERENT HEAT TREATMENTS

### ABSTRACT

The purpose of this study is the wear analysis of sintered high speed steel AISI T15 tools obtained by different processes – HIP and liquid phase vacuum sintering. The materials were submitted to annealing at 870°C, quenching at 1235 and 1210°C and triple tempering (540, 550 and 560°C) heat treatments. 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. After that, interchangeable inserts were made by electroerosion. The operation used in the present study was the end milling of normalized steel plates (SAE 1045) without coolant. The apparatus used in this study is constituted basically of an instrumented table with four load cells mounted with “Strain Gages” sensors. Finally, were determined and analyzed the tools wears comparatively.

Key-words: High speed steels, AISI T15, wear, heat treatments.