

## **Investigação do desgaste após sinterização**

□ E. P. R. Lima, M. D. M. Neves, R. A. Nogueira e S. Delijaicov □

*Pastilhas intercambiáveis confeccionadas por eletroerosão foram testadas em operação de fresamento de chapas de aço SAE 1045 normalizadas. O material usado na produção foi o aço rápido AISI T15 sinterizado, obtido por compactação isostática a quente e por sinterização a vácuo com fase líquida, posteriormente submetido a tratamentos térmicos de recozimento, austenitização e revenimento triplo. O aparato utilizado foi constituído basicamente de uma mesa instrumentada com quatro células de carga montadas com sensores do tipo strain gages, capazes de medir os esforços de corte em três direções ortogonais. Os parâmetros de usinagem foram os valores de entrada, enquanto as variáveis de saída foram as forças de corte, o acabamento superficial da peça usinada e o estado final da ferramenta. Por fim, os desgastes foram determinados e analisados comparativamente.*

**O**s aços rápidos recebem essa denominação devido à capacidade de reter elevadas durezas (1.000 HV ou 65-70 HRC), mesmo quando utilizados no corte rápido de materiais<sup>[3]</sup>. Outra importante característica é a capacidade de manter durezas elevadas quando submetidos a temperaturas de até 600°C<sup>[7]</sup>.

A microestrutura desses materiais é composta basicamente por carbeto primários, cuja principal função é fornecer proteção contra desgaste abrasivo, e uma matriz de martensita revenida

reforçada por carbeto finamente dispersos<sup>[5]</sup>. Por conter elevado teor de carbono, além de tungstênio, vanádio e cobalto, o aço rápido AISI T15 apresenta excelente resistência à abrasão e elevada dureza a quente<sup>[4]</sup>.

A resistência ao desgaste está diretamente relacionada com a eficiência de corte do aço rápido. Essa propriedade depende da dureza da ferramenta, da composição da liga e dos tipos de carbeto. De maneira geral, os aços rápidos sinterizados possuem dureza mais elevada em relação aos aços rápidos convencionais, além de maior teor de carbono e vanádio. Essa composição proporciona o aumento da resistência ao desgaste, principalmente quan-

□ Emmanuel Pacheco Rocha Lima, Maurício David Martins das Neves e Rejane Aparecida Nogueira desenvolveram este trabalho pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (Ipen). Sérgio Delijaicov, pela Universidade Federal de Itajubá (Unifei, MG). Este artigo foi originalmente apresentado como palestra técnica no V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (Conem), realizado de 25 a 28 de agosto de 2008 em Salvador (BA). Reprodução autorizada.

## ***Ferramenta de aço rápido***

do tratados termicamente. No entanto, mesmo quando submetidos a tratamentos para aumento de dureza, os aços rápidos podem apresentar um comportamento inverso relativamente à resistência ao desgaste. Isso ocorre devido à redução da tenacidade do material<sup>[10]</sup>.

A tenacidade nas ferramentas de aço rápido pode ser definida pela combinação de ductilidade (capacidade do aço de formar-se antes de romper), resistência elástica (capacidade do aço de resistir à deformação permanente) e resistência à quebra (resistência ao choque). Ou seja, a tenacidade de uma ferramenta diz respeito à capacidade de ser solicitada mecanicamente sem sofrer deformação<sup>[10]</sup>. A correta combinação entre tenacidade e dureza proporciona um aumento na resis-

tência ao desgaste das ferramentas de aço rápido<sup>[9]</sup>.

O aço rápido AISI T15 é tratado termicamente de maneira análoga aos aços obtidos por fundição, lingotamento e conformação: 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>[1]</sup>. Também ocorre a precipitação de carbeto secundários ( $M_2C$ ), responsáveis pelo pico de dureza secundário dos aços rápidos<sup>[1,2]</sup>.

De maneira geral, os aços rápidos sinterizados tendem a responder mais rapidamente e com melhor previsibilidade aos tratamentos térmicos, devido à sua microestrutura mais fina e uniforme. Nos tratamentos térmicos,

independentemente das sequências de processamento, ocorrem os fenômenos de dissolução de carbeto, precipitação de carbeto pró-eutetóides, transformação da austenita em martensita e precipitação de carbeto na martensita.

Neste trabalho, são estudados comparativamente o desenvolvimento e o desgaste de flanco de ferramentas do aço rápido AISI T15 submetidas a ensaios de usinagem, obtidas a partir de dois processos distintos: compactação isostática a quente (HIP, de *hot isostatic pressing*) e sinterização a vácuo com fase líquida.

### **Materials e métodos**

O pó do aço rápido AISI T15 atomizado a água (sinterização a vácuo com fase líquida) foi for- ▶

necido pela Coldstream, enquanto o aço rápido comercial que sofreu compactação isostática a quente (HIP, de *hot isostatic pressing*) foi fornecido, na forma de tarugo, pela Eramet Latin América. As composições químicas dos dois aços rápidos são mostradas na tabela 1.

Em primeiro lugar, as 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, em temperatura de 1.275°C ( $\pm 3^\circ\text{C}$ ) por 1 hora. Foram reali-

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	Balanço
COMERCIAL	1,56	12	4,97	4,93	3,91	0,43	0,50	Balanço

zadas medidas de densidade antes e após a sinterização.

A seguir, amostras dos dois materiais (comercial e sinterizado a vácuo) foram submetidas aos seguintes tratamentos térmicos: recozimento a 870°C, austenitização a 1.235°C (têmpera ao ar) e revenimento triplo a 550°C. Todos os tratamentos térmicos foram realizados em banho de sal<sup>[11]</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). A análise microestrutural (MEV) e a microanálise por EDS foram realizadas em um microscópio eletrônico de varredura Philips XL-30. ▶

## **Ferramenta de aço rápido**

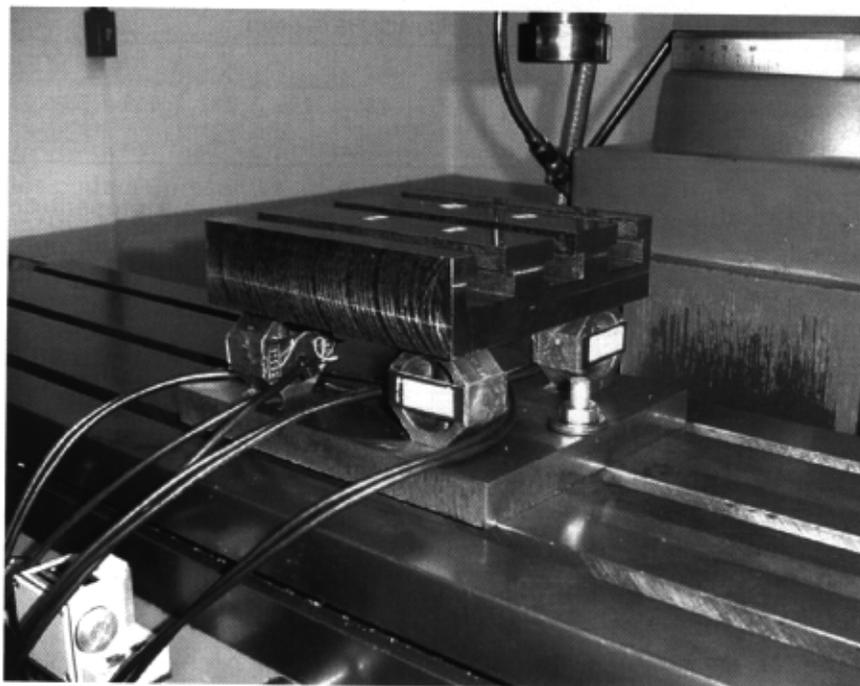


Figura 1 – Mesa instrumentada utilizada nos ensaios de usinagem

Posteriormente, foram realizadas medidas de dureza Rockwell C (10 medidas em cada corpo de prova) utilizando-se uma carga de 150 kg. As medidas de tamanho de grão, quantidade e diâmetro dos carbos foram determinadas por meio digital com o uso do *software* analisador de imagens Quantikov.

Numa segunda etapa, foram confeccionadas por eletroerosão pastilhas intercambiáveis segundo norma DIN 844 N, com o intuito de se analisar o seu desempenho com relação ao desgaste. As pastilhas são quadradas, com 12,70 mm de lado, com cantos arredondados de 0,80 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 aparato utilizado em questão, mostrado na figura 1, é constituído basicamente de uma mesa instrumentada com quatro células de carga montadas com sensores do tipo *strain gages*, capazes de medir os esforços de corte em três direções ortogonais<sup>[6]</sup>, um equipamento *data logger* modelo Spyder 8, um PC e um rugosímetro Taylor-Hobson Surtronic 3+. Os parâmetros de usinagem são os valores de entrada, enquanto as forças de corte, o acabamento superficial da peça usinada (rugosidade  $R_a$ ) e o estado final da ferramenta (desgaste de flanco  $V_B$ ), foram as variáveis de saída.

O critério de parada utilizado para fim de experimento foi

Tabela 2 – Parâmetros de corte e aquisição de dados utilizados

PARÂMETRO	VALOR
Arestas de corte	Duas
Diâmetro da ferramenta (mm)	50
Profundidade de corte (mm)	0,5
Rotação (rpm)	300
Avanço (mm/min)	50
Taxa de aquisição (Hz)	200

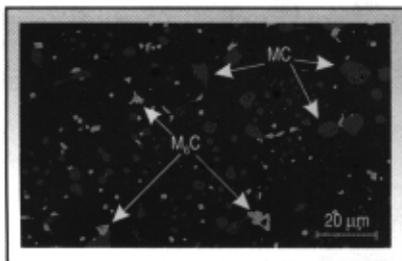
$V_B$  igual a 0,90 mm. Os parâmetros de usinagem utilizados são mostrados na tabela 2. Por fim, foram avaliados e correlacionados cada parâmetro analisado com os diferentes materiais utilizados.

### Resultados e discussão

As densidades obtidas para as amostras compactadas antes e após a sinterização apresentaram valores 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 densidade de  $8,18 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$  (99,39%). Conforme esperado, a densidade das amostras compactadas isostaticamente a quente apresentaram valores superiores, em virtude da maior eficiência desse processo na eliminação da porosidade.

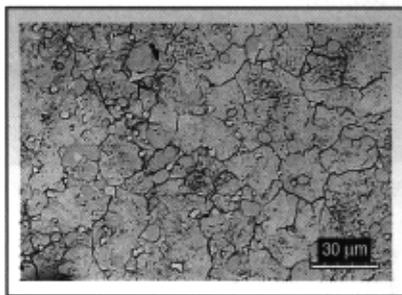
As figuras 2 e 3 (pág. 138) apresentam micrografias (MEV e óptica, respectivamente) do aço rápido AISI T15 sinterizado a vácuo, austenitizado a  $1.235^\circ\text{C}$  e revenido triplo a  $550^\circ\text{C}$ , contendo carbos do tipo MC e  $M_6C$  em uma matriz martensítica re-

## ***Ferramenta de aço rápido***

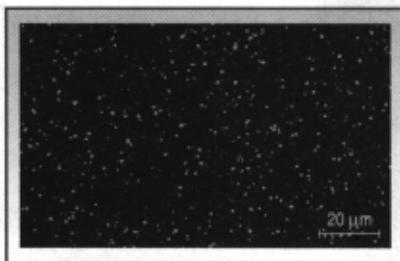


**Figura 2** – MEV do aço rápido AISI T15 sinterizado a vácuo, temperado a 1.235°C e revenido triplo a 550°C

venida. Na figura 2, pode-se observar que a quantidade e o tamanho dos carbeto do tipo MC



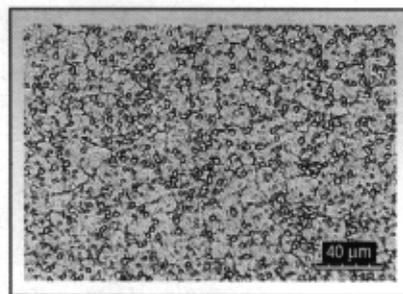
**Figura 3** – Micrografia óptica do aço rápido AISI T15 sinterizado a vácuo, temperado a 1.235°C e revenido triplo a 550°C



**Figura 4** – MEV do aço rápido AISI T15 compactado isostaticamente a quente, temperado a 1.235°C e revenido triplo a 550°C

(cinza) são bem superiores do que os dos carbeto eutéticos do tipo  $M_6C$  (branco).

Isso pode ser justificado pela baixa solubilidade na austenitização dos carbeto do tipo  $MC^{[3]}$ , aliada à menor difusão durante o revenimento. Em vir-



**Figura 5** – Micrografia do aço rápido AISI T15 compactado isostaticamente a quente, temperado a 1.235°C e revenido triplo a 550°C

tude do uso de temperatura mais baixa nesse processo, a dissolução e a reprecipitação dos carbeto são ainda mais dificultadas. A identificação dos carbeto foi realizada por microanálise química em EDS.

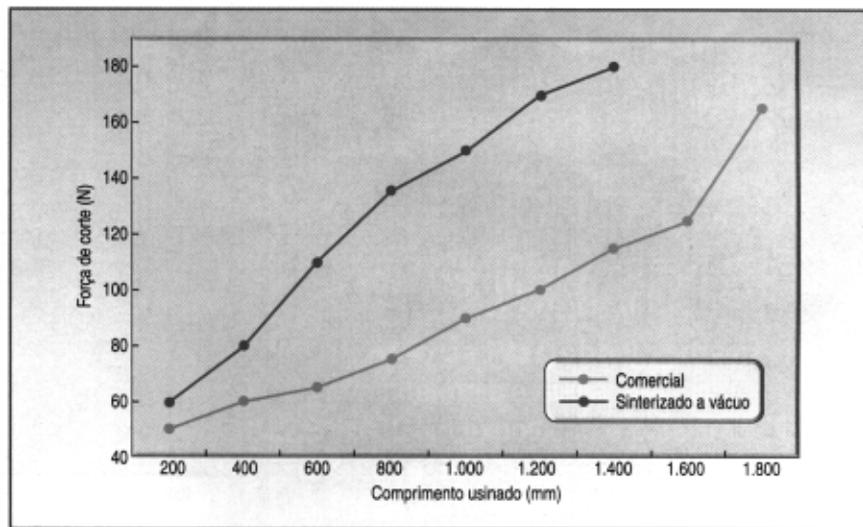
**Tabela 3** – Medidas do tamanho de grão austenítico, quantidade e diâmetro dos carbeto MC e  $M_6C$  para o aço rápido AISI T15 após tratamento de revenimento

AISI T15	TAMANHO DE GRÃO (μm)	$M_6C$ (%)	MC (%)	Ø (μm)
SINTERIZADO A VÁCUO	38,811 ± 4,444	3,22	12,65	1,033 ± 1,080
COMERCIAL	14,566 ± 1,862	4,41	17,11	0,789 ± 0,324

**Tabela 4 – Medidas de dureza Rockwell C para o aço rápido AISI T15 tratado termicamente**

AISI T15	HRC
SINTERIZADO A VÁCUO	63,66 ± 0,35
COMERCIAL	64,89 ± 0,15

No que diz respeito às amostras do aço rápido comercial (figuras 4 e 5, pág. 138), pode-se observar que tanto os carbeto quanto os grãos austeníticos apresentam tamanho bem menor quando comparados aos do aço rápido sinterizado a vácuo. Também é possível notar que há distribuição mais uniforme dos carbeto (MC e M<sub>6</sub>C) na matriz e menor dispersão nos seus tama-



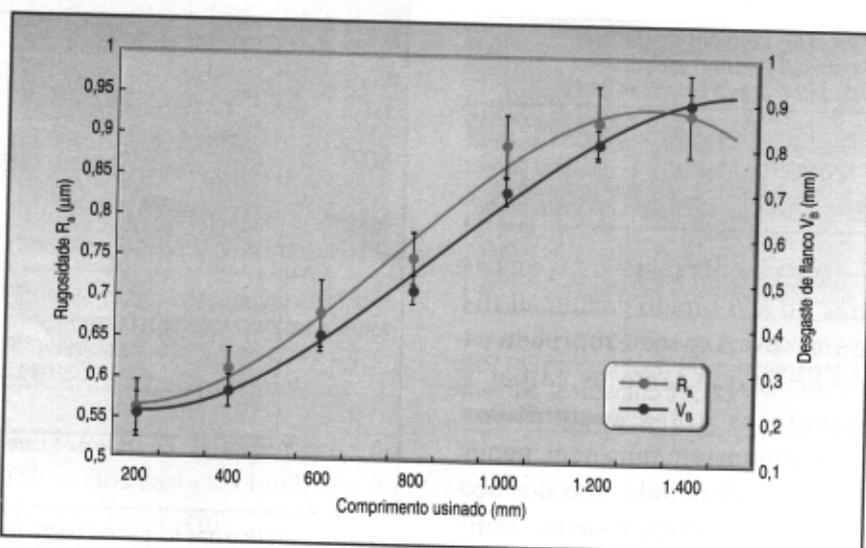
**Figura 6 – Gráfico das forças de corte resultantes em função do comprimento usinado para as ferramentas de aço rápido AISI T15 obtido pelos dois processos**

nhos e morfologias. Apesar da elevada densidade encontrada,

nota-se a presença de porosidade residual nos aços rápidos ob- ▶

## Ferramenta de aço rápido

Figura 7 – Gráfico da rugosidade  $R_a$  e do desgaste de flanco  $V_B$  em função do comprimento usinado para o aço rápido AISI T15 sinterizado a vácuo



tidos pelos dois processos (figuras 2 e 4), principalmente no sinterizado a vácuo.

Uma análise comparativa pode ser realizada a partir da tabela 3 (pág. 138), na qual são apresentados os tamanhos médios dos grãos, as quantidades percentuais e os diâmetros dos carbeto para as duas técnicas de processamento. Os maiores tamanhos médios de grãos e de precipitados (carbeto) encontrados para as amostras sinterizadas a vácuo podem ter-se originado em decorrência das temperaturas superiores utilizadas no seu processamento.

Os valores de dureza (Rockwell C) encontrados para os aços rápidos AISI T15 sinterizado a vácuo e comercial, austenizados a 1.235°C e revenidos triplos a 550°C, são mostrados na tabela 4 (pág. 139). Tais valores estão de acordo com os resultados apresentados nas figuras 2, 3, 4 e 5 e na tabela 3, o que indica que quão maiores a quantidade e a dispersão dos carbeto na

matriz, maior a dureza do material. A literatura indica para o aço rápido AISI T15 as temperaturas de revenimento de 540 e 560°C como o intervalo para se obter a máxima dureza<sup>[6]</sup>.

No gráfico da figura 6 (pág. 139), pode ser observado que há um crescimento das forças de corte à medida que se aumenta o comprimento usinado. Esse crescimento é mais suave para a ferramenta obtida a partir do aço rá-

pido AISI T15 comercial. Tal comportamento está diretamente relacionado com o desgaste sofrido pela ferramenta, uma vez que quanto maior o desgaste da ferramenta maiores serão os esforços de usinagem.

Ao se analisar o comportamento do desgaste de flanco da ferramenta, mostrado nas figuras 7 e 8, pode-se observar que, do mesmo modo que para as forças de usinagem, a ferramenta que

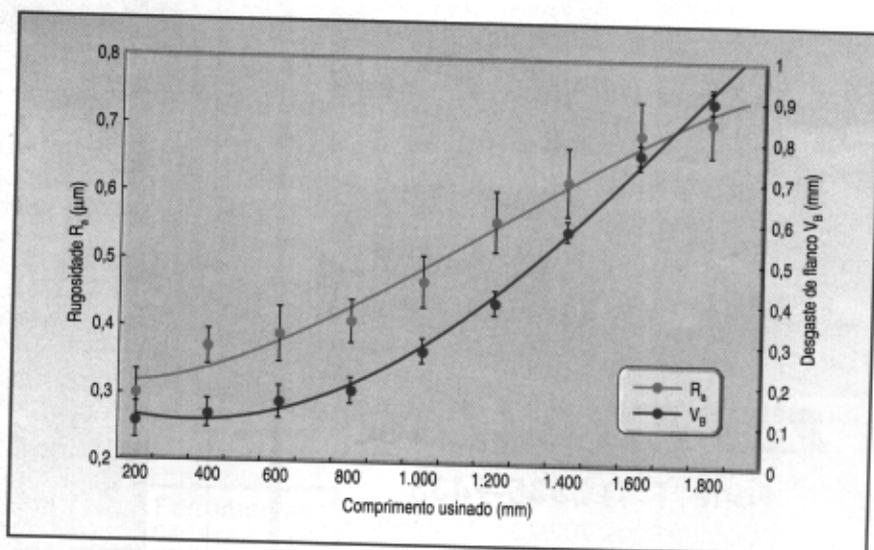
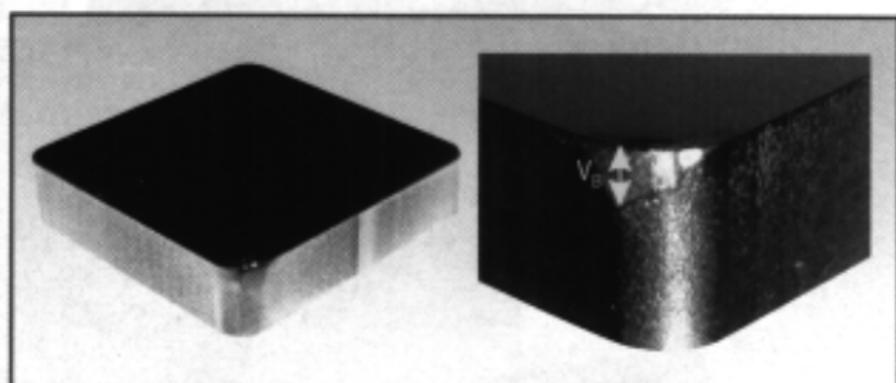


Figura 8 – Gráfico da rugosidade  $R_a$  e do desgaste de flanco  $V_B$  em função do comprimento usinado para o aço rápido AISI T15 comercial

## ***Ferramenta de aço rápido***



**Figura 9 – Desgaste de flanco  $V_B$  na pastilha de aço rápido AISI T15**

apresentou o melhor desempenho foi a confeccionada a partir do aço rápido comercial (mais de 1.700 mm usinados).

A ferramenta feita a partir do aço rápido sinterizado a vácuo usinou apenas 1.400 mm até ser considerada desgastada ( $V_B \geq 0,90$  mm).

Com relação ao acabamento superficial, pode-se observar que a rugosidade  $R_a$  cresce à medida que o comprimento usinado aumenta, principalmente para a ferramenta sinterizada a vácuo. O crescimento desta ferramenta é bem mais acentuado, o que está diretamente relacionado com o seu desgaste (quanto maior o desgaste da ferramenta, pior o acabamento superficial da peça usinada).

Dessa forma, comparando-se os resultados de dureza com os da força de corte e do desgaste, pode-se afirmar que a ferramenta de maior dureza apresentou maior resistência ao desgaste. O desgaste da ferramenta de corte pode ser visualizado na figura 9.

### **Conclusões**

- Foi possível medir com significativa precisão as forças de corte com o aparato utilizado.
- Apesar do desgaste sofrido, nenhuma das ferramentas ensaiadas rompeu ou trincou.
- Quanto maior o desgaste de flanco das ferramentas, maiores as forças de corte envolvidas na operação.
- 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 30% maior) ao da sinterizada a vácuo.

---

## Referências

- 1] ASM Metals Handbook: *Heat treating*. V. 4, p. 734-760, 1991.
  - 2] Brewin, P. R.; Toloui, B.; Nurthen, P. D.; Fellget, J. A.; Wood, J. V.; Igharo, M.; Coleman, D. S.; Shaikh, Q.: *Effect of process variables and microstructure on properties of sintered high speed steel for wear applications*. Powder Metallurgy, v. 32, nº 4, p. 285-290, 1989.
  - 3] Hoyle, G.: *High speed steel*. Butterworth & Co, Londres, 1988.
  - 4] Igharo, M.; Brewin, P.; Wood, J.: *Development of sintered high speed steel alloys for wear applications*. World Conference on Powder Metallurgy, v. 1, p. 266-271, 1990.
  - 5] Kar, P. K.; Saha, B. P.; Upadhyaya, G. S.: *Properties of sintered T15 and T42 high speed steels*. The International Journal of Powder Metallurgy, v. 29, nº 2, p. 139-148, 1993.
  - 6] Karagoz, S.; Andrén, H. O.: *Secondary hardening in HSS*. Z. Metallkd. 83, v. 6, p. 386-394, 1992.
  - 7] Roberts, G. A.; Cary, R. A.: *Tool steels*. Metals Park: ASM, 4ª ed., p. 627-772, 1980.
  - 8] Rossi, G. C.; Delijaicov, S.; Bordinassi, E. C.; Batalha, G. F.: *Estudo das forças de corte no processo de corte de bordas de chapas utilizadas para fabricação de tubos de aço com costura*. Cobef 2007, São Pedro, SP, Brasil, 2007.
  - 9] Schwarzenbech, W. K.: *Production reliability by powder metallurgical HSS – Milling Tools*. Milling Technique, nº 5, p. 26-28, 1995.
  - 10] Stevenson, R. W.: *P/M tool steels*. Project Manager/Materials Group Energy Technology Division Midlan, Ross Corp, Metals handbook, 9ª ed., v. 7, p. 784-793, 1984.
  - 11] Wilson, R.: *Metallurgy and heat treatment of tool steels*. London, Ed. McGraw-Hill, p. 163-181, 1975.
-