

# ANÁLISE DO DESGASTE DE FERRAMENTAS NO FRESAMENTO DE ACABAMENTO DO AÇO D2 ENDURECIDO<sup>1</sup>

Rodrigo P. Zeilmann<sup>2</sup>  
Tiago Vacaro<sup>3</sup>  
Matheus Vido<sup>3</sup>  
Rafael de Matos Soares<sup>3</sup>  
Fernando M. Bordin<sup>3</sup>

## Resumo

Este trabalho teve por objetivo avaliar o desgaste de insertos de metal-duro no fresamento de acabamento do aço endurecido D2, de forma a identificar os mecanismos e tipos de desgaste predominantes. Através desta análise, buscou-se ainda determinar os parâmetros de corte que propiciassem uma relação equilibrada entre desgaste das ferramentas e taxa de remoção e, conseqüentemente, maior competitividade ao processo. Foram realizados ensaios de longa duração do processo de fresamento de acabamento, utilizando insertos de metal-duro. Com base em informações do fabricante das ferramentas, foram realizados testes preliminares para determinação dos parâmetros de corte utilizados no ensaio. No ensaio foram mantidas constantes a profundidade e a largura de corte, e foram variados os valores de avanço e velocidade de corte. Como critérios de fim de vida foram adotados o desgaste de flanco máximo de 0,6 mm e a ocorrência de lascamentos, sendo determinante o que ocorresse primeiro. O principal mecanismo de desgaste observado nos ensaios foi a adesão, enquanto que os tipos de desgaste principalmente verificados foram o desgaste de flanco e a formação de lascamentos. Os resultados de vida das ferramentas apresentaram uma tendência de maiores volumes usinados com a utilização de menores velocidades de corte, enquanto que um valor intermediário de avanço propiciou os melhores resultados dentre as condições testadas, oferecendo assim uma condição de desgaste reduzido.

**Palavras-chave:** Usinagem; Aço-ferramenta; Parâmetros de corte.

## ANALYSIS OF TOOL WEAR IN FINISH MILLING OF HARDENED STEEL D2

### Abstract

The goal of this work was to evaluate the wear of carbide inserts in the finishing milling of the hardened steel D2, in order to identify the main mechanisms and types of wear. Through this analysis, we sought to further determine the cutting parameters that enabled a balanced relationship between tool wear and removal rate and thus more competitiveness to the process. Long duration tests of the process of finishing milling were performed, using coated carbide inserts. Based on information from the manufacturer of the tools, preliminary tests were performed to determine the cutting parameters. In the test were kept constant axial and radial depths of cutting, and were varied the values of feed and cutting speed. As criteria for end of life were adopted the maximum flank wear of 0,6 mm and the occurrence of chipping, being determinant what happened first. The main wear mechanism observed in the tests was adhesion, while the types of wear mainly observed were flank wear and chipping. The results of tool life had a tendency to higher volumes machined with the use of lower cutting speeds, while an intermediate value of feed has provided the best results among the conditions tested, thus providing a condition of reduced wear.

**Key words:** Machining; Tool steel; Cutting parameters.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 8º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 11 e 12 de agosto de 2010, São Paulo, SP.

<sup>2</sup> Professor Doutor do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia (CCET) da Universidade de Caxias do Sul (UCS).

<sup>3</sup> Bolsista do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia (CCET) da Universidade de Caxias do Sul (UCS).



## 1 INTRODUÇÃO

A fabricação de inúmeras peças industriais depende da construção de moldes e matrizes para injeção de plástico, processos de forjamento, metalurgia do pó, fundição, entre outros. Componentes de moldes e matrizes geralmente são feitos de peças com geometrias complexas e com materiais de alta dureza, o que dificulta os processos de usinagem. Embora a construção de moldes e matrizes represente um investimento menor em comparação com os custos totais de produção, seu projeto e fabricação compreendem uma parcela significativa do tempo total de desenvolvimento.<sup>(1)</sup> Uma possível estratégia para redução de tempos e custos de fabricação é a usinagem de materiais endurecidos.

Os benefícios da fabricação de componentes de aço na condição endurecido são substanciais em termos de redução de custos de usinagem e prazos de entrega em relação à usinagem tradicional.<sup>(2)</sup> Outras vantagens da produção de componentes no estado endurecido são: redução do número de máquinas-ferramentas necessárias, melhoria da integridade superficial, redução de operações de acabamento e eliminação da distorção causada pelo tratamento térmico.<sup>(3)</sup> Dentre os materiais cuja usinagem no estado endurecido vem sendo aplicada está o aço D2.

Aços-ferramenta conforme AISI grupo D são amplamente utilizados na fabricação de moldes e matrizes, devido à sua excelente resistência ao desgaste e características de endurecimento elevado.<sup>(4)</sup> Entretanto, a usinabilidade deste grupo é bastante pobre.<sup>(2)</sup> Portanto, torna-se fundamental a seleção adequada de ferramentas e parâmetros de corte.

O metal-duro é o material de ferramenta mais comum para a usinagem de peças e ligas de aço. Metais-duros são normalmente constituídos por uma fase dura (geralmente de tungstênio ou uma mistura de tungstênio, titânio, tântalo ou carboneto de nióbio) e uma fase ligante macia e dúctil (normalmente cobalto). Eles têm alta resistência e tenacidade, bem como boa resistência ao choque térmico, porém características de desgaste inferiores em comparação com os materiais para ferramentas avançadas, como o CBN e a cerâmica. A fim de melhorar a dureza e as condições de superfície, ferramentas de metal-duro são revestidas com materiais duros como TiN, TiAlN e TiCN, por deposição física de vapor (PVD) e deposição química de vapor (CVD).<sup>(5,6)</sup> Melhorias em revestimentos de ferramentas de metal-duro e nas propriedades químicas e mecânicas dos materiais de ferramentas têm permitido o aumento da vida das ferramentas em processos de usinagem.<sup>(7)</sup> O uso de revestimentos pode efetivamente melhorar a vida da ferramenta no fresamento de aços. Os revestimentos são usados para aumentar a lubrificação da ferramenta, melhorar a resistência à oxidação, proteger a ferramenta contra o desgaste por difusão e reduzir a variação de temperatura na ferramenta, tornando-a menos suscetível a fissuras.<sup>(8)</sup>

Mas, além das características da ferramenta empregada, tem grande importância a adequada seleção de parâmetros de corte. Um dos principais fatores que afetam a vida da ferramenta é a velocidade de corte. Em geral, um aumento da velocidade de corte resulta na diminuição das forças de corte. No entanto, quando a velocidade de corte é maior, mais energia é introduzida no processo de usinagem, o que leva à geração de temperaturas mais altas e maior desgaste. Outros parâmetros que afetam a vida da ferramenta são o avanço e a profundidade de corte. Com o aumento desses parâmetros, há a tendência de redução da vida da ferramenta, sendo que o avanço geralmente tem maior efeito.<sup>(6)</sup> Aumentar a taxa de avanço resulta em maiores esforços de corte, o que exige maior consumo de energia para

remover o material e, conseqüentemente, mais calor é gerado no gume da ferramenta. Isso promove o desgaste da ferramenta e encurta a vida útil da mesma. A temperatura do gume aumenta com o aumento da profundidade de corte, o que também diminui a vida útil da ferramenta. Além do efeito da temperatura sobre a taxa de desgaste de ferramentas quando altas taxas de avanço e profundidades de corte são empregadas, a alta carga de impacto causada por esses dois fatores também pode provocar fissuras no gume da ferramenta, o que acelera o desgaste de forma ainda mais rápida do que o efeito da temperatura elevada.<sup>(9)</sup>

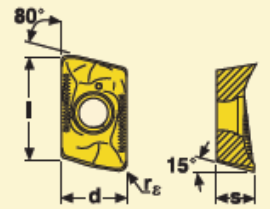
Frente a este contexto, este trabalho teve por objetivo avaliar o desgaste de insertos de metal-duro no fresamento de acabamento do aço endurecido D2, de forma a identificar os mecanismos e tipos de desgaste predominantes. Buscou-se também determinar parâmetros de corte que propiciassem um equilíbrio entre desgaste das ferramentas e taxa de remoção e, dessa forma, oferecer maior competitividade ao processo.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios experimentais foram realizados em um Centro de Usinagem Okuma, modelo Ace Center MB – 46 VAE, com rotação máxima no eixo-árvore de 15.000 rpm e potência de 18,5 kW.

Para o desenvolvimento dos ensaios, em operações de acabamento com corte a seco, foram utilizadas fresas com insertos de metal-duro de geometria especial para acabamento. A Tabela 1 apresenta a especificação das ferramentas utilizadas nos ensaios.

Tabela 1: Especificação das ferramentas utilizadas nos ensaios

		l [mm]	d [mm]	s [mm]	r <sub>ε</sub> [mm]	Ângulo de saída γ [°]
		9,9 - 10,8	6,35	3,21 - 3,65	0,8	16 °
Tipo	Diâmetro do cone [mm]	Nº de Insertos	Material	Classe	Revestimento	
Topo	52	3	Microgrão de WC	(P25-P35)/(M20-M45)/(H25-H35)	(Ti, Al) N - TiN	

Com base em informações do fabricante das ferramentas, foram realizados testes preliminares para determinação dos parâmetros de corte utilizados no ensaio. Durante os ensaios, os parâmetros avanço e velocidade de corte foram variados, mantendo-se a profundidade axial de corte constante. A Tabela 2 mostra os parâmetros de corte utilizados nos ensaios.

Tabela 2: Parâmetros de corte utilizados nos ensaios

Velocidade de corte v <sub>c</sub> [m/min]	Profundidade axial a <sub>p</sub> [mm]	Avanço f <sub>z</sub> [mm]
80, 95, 110 e 150	0,05	0,10; 0,20; 0,25; 0,30

Como critérios de fim de vida foram adotados o desgaste de flanco máximo de 0,6 mm e a ocorrência de lascamentos, sendo determinante o que ocorresse primeiro.

Para a visualização das ferramentas e acompanhamento do comportamento de desgaste das mesmas foi utilizado um estereoscópio de medição universal, modelo TNE-10B, marca Entex.

Os corpos-de-prova foram confeccionados em aço AISI D2 temperado, com uma dureza entre 58 e 62 HR<sub>C</sub>, no formato de blocos. A composição química do material é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3: Composição química do aço AISI D2 (wt%)

C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	V
1,40 - 1,60	0,15 - 0,60	0,030	0,030	0,15 - 0,60	11,00 - 13,00	0,70 - 1,20	1,10

### 3 RESULTADOS

A Figura 1 apresenta os resultados de volume usinado com as velocidades de corte de 80 m/min a 150 m/min, e variação do avanço para as velocidades de 80 e 95 m/min. As velocidades de 110 m/min e 150 m/min foram testadas com apenas um valor de avanço.

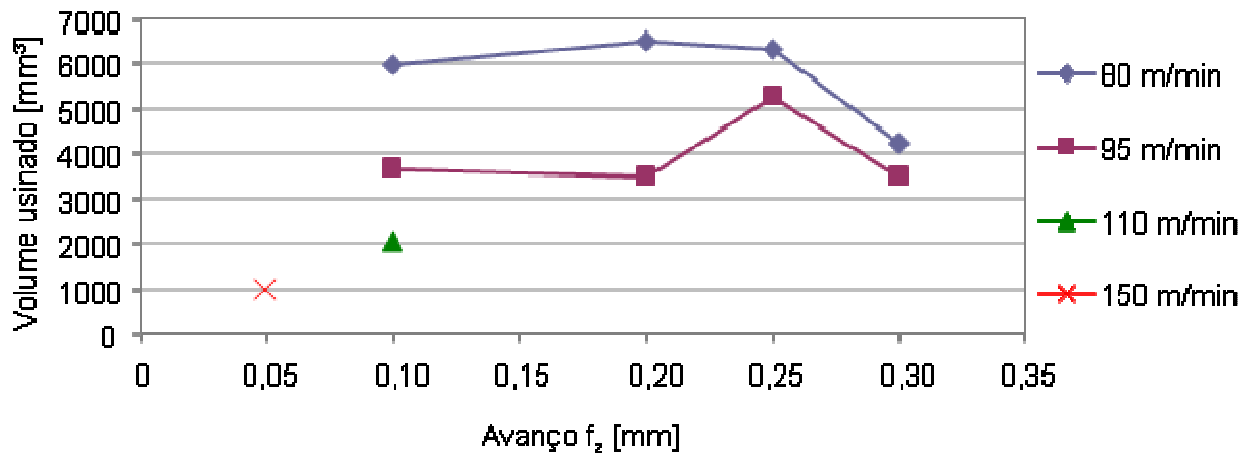


Figura 1. Volume usinado nas diferentes condições testadas.

Analisando os resultados em função da variação da velocidade de corte, é possível observar que os maiores valores de volume usinado foram obtidos com a  $v_c$  de 80 m/min, e à medida que houve o aumento no valor da velocidade de corte, ocorreu uma redução nos resultados de volume usinado. As ferramentas testadas nas velocidades de 110 m/min e 150 m/min apresentaram volumes usinados significativamente inferiores aos obtidos com as demais velocidades, devido à severidade que acelerou a formação de desgastes nas ferramentas. Por isso, não foram realizados testes para estas velocidades com outros valores de avanço.

Com a variação do avanço, verifica-se que para a  $v_c = 80$  m/min os maiores volumes usinados foram obtidos com os avanços de 0,20 mm e 0,25 mm, sendo o resultado obtido com 0,20 mm apenas 3% maior do que com 0,25 mm. Já para  $v_c = 95$  m/min, o avanço de 0,25 mm apresentou um volume usinado significativamente superior aos obtidos com os demais valores de avanço.

Na Figura 2 são apresentadas as taxas de remoção de material obtidas nas velocidades de corte de 80 m/min e 95 m/min, para os diferentes avanços testados.



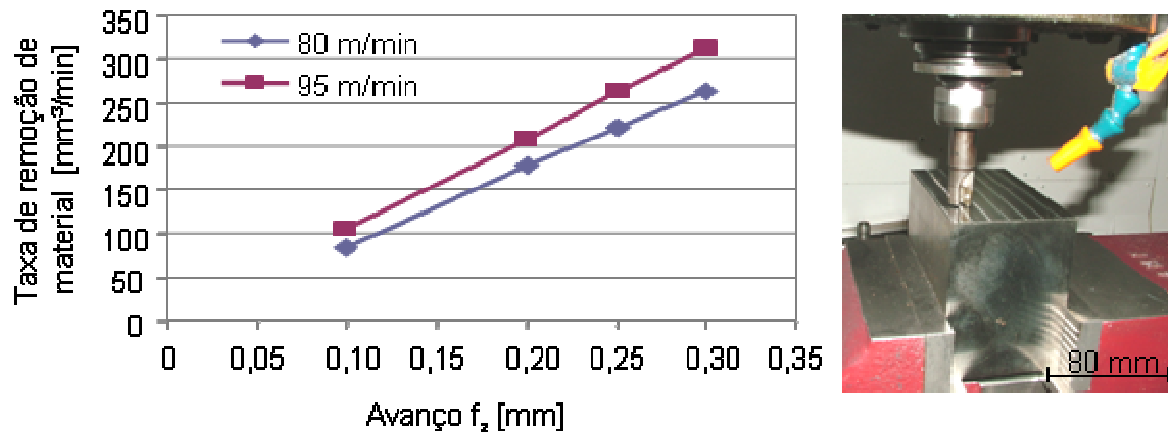


Figura 2. Taxa de remoção de material do aço D2.

Observa-se pela análise do gráfico um crescimento linear dos resultados com o aumento do avanço. A maior velocidade de corte oferece maiores taxas de remoção e, com o aumento do avanço, verifica-se o aumento da diferença entre as taxas obtidas pelas diferentes velocidades, considerando um mesmo valor de avanço. Na Figura 3 é apresentado o gráfico do comportamento de desgaste tipicamente apresentado por ferramentas testadas com avanço de 0,25 mm, o qual apresentou os melhores resultados de volume usinado.

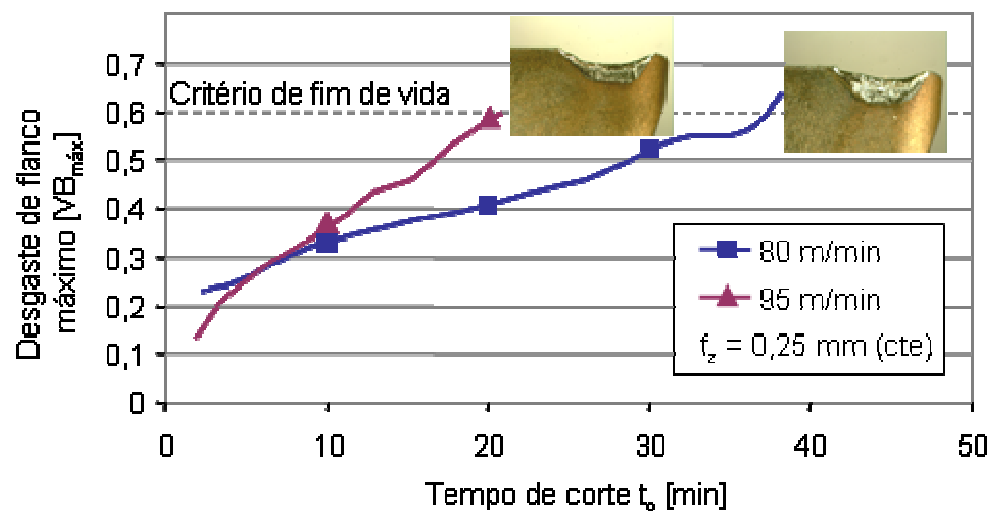
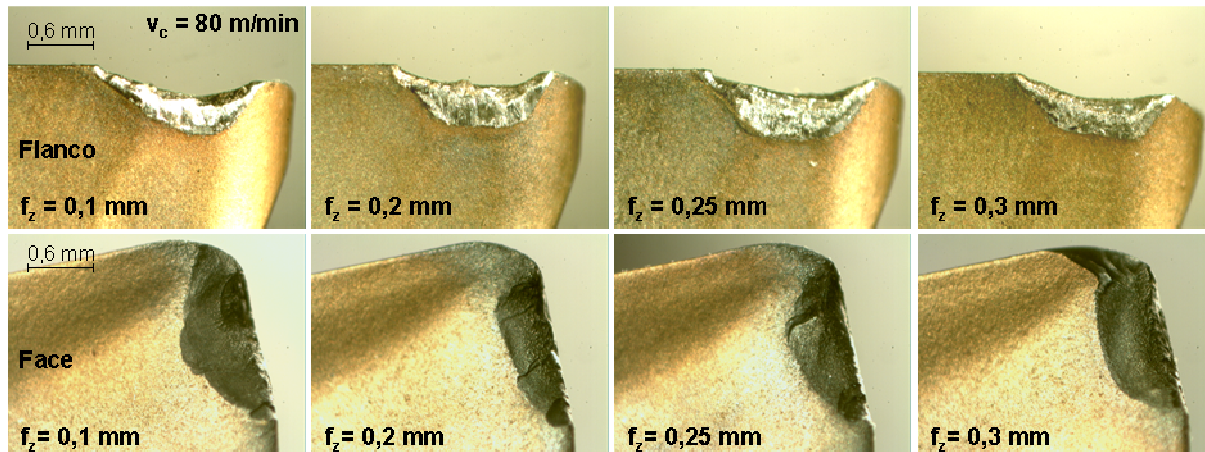


Figura 3. Comportamento de desgaste tipicamente apresentado por ferramentas testadas com avanço de 0,25 mm.

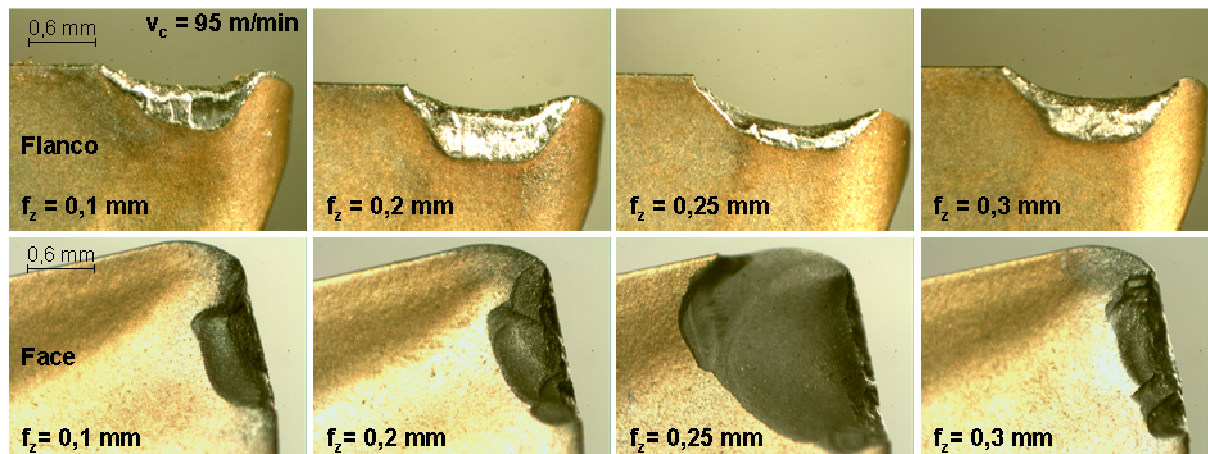
Para as duas velocidades observa-se um comportamento semelhante, com aumento aproximadamente linear do desgaste das ferramentas, porém com uma taxa de desgaste superior para a  $v_c$  de 95 m/min.

A variação dos parâmetros de corte também exerce influência nos mecanismos e tipos de desgaste apresentados pelas ferramentas, devido à variação das solicitações térmicas e mecânicas.<sup>(10)</sup> A Figura 4 mostra imagens do flanco e da face dos inserts em fim de vida, e testados com a velocidade de corte de 80 m/min e diferentes valores de avanço.



**Figura 4.** Desgaste tipicamente apresentado nas ferramentas ensaiadas com  $v_c$  de 80 m/min.

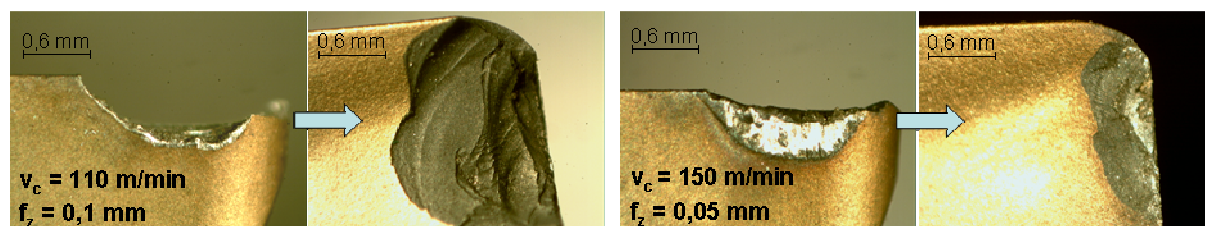
Na Figura 5 são apresentadas as imagens do flanco e da face dos insertos em fim de vida, e testados com a velocidade de corte de 95 m/min e diferentes valores de avanço.



**Figura 5.** Desgaste tipicamente apresentado nas ferramentas ensaiadas com  $v_c$  de 95 m/min.

Pode-se observar que o desgaste apresentado pelas ferramentas, Figuras 4 e 5, é semelhante nas diferentes condições de usinagem. As ferramentas apresentam desgaste de flanco e material aderido sobre o gume, indicando a ocorrência de desgaste por adesão. E as imagens das faces apontam a ocorrência de lascamentos em todas as ferramentas ensaiadas.

A Figura 6 apresenta imagens de flanco e face das ferramentas testadas com  $v_c$  de 110 m/min e 150 m/min, em estado de fim de vida.



**Figura 6.** Desgaste tipicamente apresentado nas ferramentas ensaiadas com  $v_c$  de 110 e 150 m/min.

Observa-se que o desgaste apresentado pelas ferramentas ensaiadas nas  $v_c$  maiores é semelhante ao mostrado pelas ferramentas ensaiadas com menores  $v_c$ , com adesão de material no gume da ferramenta e ocorrência de lascamentos.

#### 4 DISCUSSÃO

O processo de fresamento apresenta grande versatilidade, possibilitando a produção de peças de formas complexas e possuindo elevada capacidade de remoção de cavacos. Apesar de possuir tais vantagens, este processo de usinagem se caracteriza por ser um processo de corte interrompido, onde a ferramenta de corte passa por períodos ativos, removendo material da peça na forma de cavacos, e períodos inativos, onde não existe o contato ferramenta-peça. Assim sendo, o material da ferramenta de corte sofre flutuações de carga térmicas e mecânicas, levando ao aparecimento de desgastes na mesma.<sup>(11)</sup>

A análise dos resultados de volume usinado, apresentados na Figura 1, permite verificar que o aumento da velocidade de corte gerou um aumento do desgaste das ferramentas, resultando em menores valores de volume usinado. O aumento da velocidade de corte implica na geração de maiores quantidades de calor pelo processo, o que potencializa os mecanismos de desgaste das ferramentas.<sup>(12)</sup>

Já com a variação do avanço, aplicada para as duas  $v_c$  menores, verifica-se que para a  $v_c = 80$  m/min os maiores volumes usinados foram obtidos com os avanços de 0,20 mm e 0,25 mm, sendo o resultado obtido com 0,20 mm apenas 3% maior. Já para  $v_c = 95$  m/min, o avanço de 0,25 mm apresentou um volume usinado significativamente superior aos obtidos com os demais valores de avanço. A explicação para este comportamento pode ser dada pelo endurecimento sofrido na superfície da peça, por encruamento, no momento do contato da ferramenta. O encruamento ocorre quando o aço sofre deformação abaixo da temperatura crítica, fazendo com que os grãos se deformem. Esta deformação altera as propriedades do material, aumentando os valores de resistência e dureza, fragilizando o material. Se, entretanto, o material encruado for reaquecido, os cristais se reagruparão e o encruamento tende a desaparecer. Com a utilização de avanços menores, a ferramenta fresa as camadas de material encruadas durante o passe anterior, gerando, como consequência, a promoção de um desgaste prematuro do gume da ferramenta. Nos avanços maiores, esta camada encruada é ultrapassada e a ferramenta toca a peça com sua dureza normal. O aumento do avanço também produz aumento das forças de fresamento, com consequente aumento da temperatura do cavaco, facilitando assim o seu arrancamento e permitindo maior vida da ferramenta.<sup>(13)</sup> Porém, o aumento do valor de avanço para 0,3 mm resultou em redução dos valores de volume usinado, devido à geração de maiores quantidades de calor pelo processo, tendo este calor maior influência na ativação dos mecanismos de desgaste das ferramentas, em detrimento do efeito positivo de redução da resistência ao cisalhamento.

Analisando-se as taxas de remoção observadas para as  $v_c$  de 80 e 95 m/min, mostradas na Figura 2, verifica-se uma tendência de aumento na diferença de resultados entre as duas  $v_c$  com o aumento do avanço. Relacionando-se este resultado com os resultados de volume usinado, percebe-se que para os maiores valores de avanço é mais vantajosa a aplicação da  $v_c$  de 95 m/min.

O comportamento do desgaste de flanco apresentado pelas ferramentas testadas nas  $v_c$  de 80 m/min e 95 m/min e avanço de 0,25 mm (Figura 3), foi semelhante para ambas as velocidades, sem regiões de estabilização do desgaste, e aumento



aproximadamente linear do desgaste das ferramentas. Porém, a inclinação da curva referente à  $v_c$  de 95 m/min é maior, o que representa uma maior taxa de desgaste para esta  $v_c$ . Essa diferença resulta em um tempo de usinagem aproximadamente 80% superior para a  $v_c$  de 80 m/min, mas a maior durabilidade da ferramenta com essa  $v_c$  não significa uma vantagem, pois o volume usinado com a  $v_c$  de 80 m/min é apenas 20% superior ao obtido pela  $v_c$  de 95 m/min. Como a diferença nos tempos de usinagem tem maior influência nos custos totais de usinagem do que os custos com ferramentas, devido aos elevados custos de hora-máquina, a utilização da  $v_c$  de 95 m/min se torna mais vantajosa do ponto de vista econômico.

A avaliação das imagens das ferramentas em fim de vida apresentadas nas Figuras 4, 5 e 6 indica semelhança nos tipos e mecanismos de desgaste observados nas diferentes condições de usinagem ensaiadas. Em todas as condições observa-se material aderido no gume das ferramentas e desgaste do flanco, resultante do mecanismo de adesão, e também a ocorrência de lascamentos. O fresamento é caracterizado pelo corte interrompido, o que implica em uma variação cíclica dos esforços térmicos e mecânicos, e favorece a formação de lascamentos.<sup>(10)</sup>

## 5 CONCLUSÃO

Os ensaios de fresamento realizados apresentaram resultados de volume usinado maiores com a utilização de menores velocidades de corte. Já com a variação do avanço, realizada para as velocidades de corte de 80 e 95 m/min, o avanço de 0,25 mm apresentou os melhores resultados. A análise das taxas de remoção também indicou a utilização vantajosa da  $v_c$  de 95 m/min quando da utilização dos valores maiores de avanço.

Com base nos resultados encontrados, conclui-se que para o processo analisado a utilização dos parâmetros de  $v_c$  de 95 m/min e  $f_z$  de 0,25 mm é a mais indicada, propiciando uma condição equilibrada entre taxa de remoção, desgaste das ferramentas e tempos de processo, o que possibilita redução dos custos de produção.

O principal mecanismo de desgaste observado nos ensaios foi a adesão, enquanto que os tipos de desgaste principalmente verificados foram o desgaste de flanco e a formação de lascamentos.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade de Caxias do Sul (UCS) pela colaboração dada ao projeto *Dry Drilling* do Grupo de Usinagem (GUS), e às empresas parceiras do projeto.

## REFERÊNCIAS

- 1 OLIVEIRA, A.J. de; DINIZ, A.E. Tool life and tool wear in the semi-finish milling of inclined surfaces. *Journal of Materials Processing Technology*, n. 209, p. 5448-5455, 2009.
- 2 AMIN, A.K.M.N.; DOLAH, S.B.; MAHMUD, M.B.; LAJIS, M.A. Effects of workpiece preheating on surface roughness, chatter and tool performance during end milling of hardened steel D2. *Journal of Materials Processing Technology*, n. 201, p. 466-470, 2008.
- 3 ASLAN, E. Experimental investigation of cutting tool performance in high speed cutting of hardened X210 Cr12 cold-work tool steel (62 HR<sub>C</sub>). *Materials and Design*, n. 26, p. 21-27, 2005.





- 4 KOSHY, P.; DEWES, R.C.; ASPINWALL, D.K. High speed end milling of hardened AISI D2 tool steel (~58 HR<sub>C</sub>). Journal of Materials Processing Technology, n. 127, p. 266-273, 2002.
- 5 CAMUSCU, N.; ASLAN, E. A comparative study on cutting tool performance in end milling of AISI D3 tool steel. Journal of Materials Processing Technology, n. 170, p. 121-126, 2005.
- 6 KRAIN, H.R.; SHARMAN, A.R.C.; RIDGWAY, K. Optimisation of tool life and productivity when end milling Inconel 718TM. Journal of Materials Processing Technology, n. 189, p. 153-161, 2007.
- 7 KANG, M.C.; KIM, K.H.; SHIN, S.H.; JANG, S.H.; PARK, J.H.; KIM, C. Effect of the minimum quantity lubrication in high-speed end-milling of AISI D2 cold-worked die steel (62 HR<sub>C</sub>) by coated carbide tools. Surface & Coatings Technology, n. 202, p. 5621-5624, 2008.
- 8 LIEW, W.Y.H.; DING, X. Wear progression of carbide tool in low-speed end milling of stainless steel. Wear, n. 265, p. 155-166, 2008.
- 9 GHANI, J.A.; CHOUDHURY, I.A.; MASJUKI, H.H. Performance of P10 TiN coated carbide tools when end milling AISI H13 tool steel at high cutting speed. Journal of Materials Processing Technology, n. 153-154, p. 1062-1066, 2004.
- 10 TEIXEIRA FILHO, F. A utilização de fluido de corte no fresamento do aço inoxidável 15-5PH. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.
- 11 COSTA, E.S.; REIS, L.L.G.; RABELO, G.B.; MACHADO, A.R. Desgaste de ferramentas de metal duro no fresamento frontal do aço ABNT 1045 com utilização de fluido de corte em diversas vazões. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 5., 2009, Belo Horizonte. São Paulo: ABCM, 2009. 1 CD.
- 12 DEONISIO, C.C.C. Estudo do fresamento do aço D2 endurecido em altas velocidades de corte. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.
- 13 RIBEIRO, J.L.S.; ABRÃO, A.M. Vida de ferramenta no fresamento de aços para matrizes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 4., 2007, Estância de São Pedro. São Paulo: ABCM, 2007. 1 CD.