

INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CORTE NA VIDA E NOS MECANISMOS DE DESGASTE DAS FERRAMENTAS DE METAL-DURO NO TORNEAMENTO AÇO AISI 4340 ENDURECIDO

CUTTING SPEED INFLUENCE IN THE LIFE AND WEAR MECHANISMS OF CEMENTED CARBIDES TOOLS IN THE TURNING OF AISI 4340 HARDENED STEEL

Célio Noll¹
Denis Boing²

RESUMO: As ferramentas de metal-duro com grãos menores que 1 μm , possuem valores superiores de dureza, resistência do gume e tenacidade, além de baixa tendência à aderência em comparação às ferramentas de metal-duro de grãos convencionais. Teoricamente, tais propriedades remetem às ferramentas de metal-duro de grãos finos e ultrafinos propriedades compatíveis com o torneamento de materiais endurecidos, e com isso, podem tornar-se uma alternativa às ferramentas cerâmicas e PCBN. Neste contexto, o principal objetivo desta pesquisa é estudar a influência da velocidade de corte na vida, nos mecanismos de desgaste e no acabamento da superfície gerada pelas ferramentas de metal-duro no torneamento do aço AISI 4340 endurecido com 55 HRC. Para tal objetivo, ensaios de torneamento foram realizados com parâmetros fixos de acabamento aplicando quatro diferentes velocidades de corte (100; 130; 160 e 190 m/min). A ferramenta utilizada foi construída em com substrato de metal-duro de grãos finos e revestida pelo método CVD ($\text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiN}$) com grãos epitaxiais da camada de alumina. Verificou-se que a maior vida da ferramenta foi obtida na menor velocidade de corte utilizada nos experimentos, $v_c = 100$ m/min. A formação de cratera no gume das ferramentas foi a principal forma de desgaste observada, sendo principalmente atribuída ao mecanismo de desgaste da abrasão. Não foram observadas nítidas evidências do mecanismo da difusão, porém, este não pode ser descartado em função das propriedades das ferramentas de metal-duro, das características do torneamento de materiais endurecidos, e ainda, da própria formação do desgaste de cratera. Em todas as condições foi observado material aderido à ferramenta ao final da vida dos experimentos. Todas as condições utilizadas nos experimentos promoverem rugosidades na classe N6, até 0,8 μm na escala R_a . Inclusive, a ferramenta utilizada a 160 m/min promoveu rugosidade dentro da classe N5, até 0,4 μm na escala R_a . Tais padrões de acabamento são compatíveis com o torneamento de materiais endurecidos com ferramentas de PCBN e com o

¹ Acadêmico de Engenharia de Produção (UNIFEBE) e Técnico do Centro de Tecnologia e Inovação em Fabricação. E-mail: celio.noll@unifebe.edu.br

² Professor, Coordenador dos cursos de Engenharia Mecânica e Engenharia de Produção e Coordenador do Centro de Tecnologia e Inovação em Fabricação da UNIFEBE; Doutorando em Engenharia Mecânica (UFSC). E-mail: denisboing@unifebe.edu.br

processo de retificação. Os resultados mostrados nos experimentos desta pesquisa indicam a possibilidade e a viabilidade da aplicação industrial das ferramentas e metal-duro no torneamento de materiais endurecidos.

PALAVRAS-CHAVE: Torneamento de materiais endurecidos; metal-duro; mecanismos de desgaste; AISI 4340.

ABSTRACT: *The metal carbides tools with fine grains smaller than 1 μm , have higher hardness, edge resistance and tenacity, plus low tendency to adhesion if compared to normal grains metal carbide tools. Theoretically, such properties refers to fine and ultra-fine grains metal carbide tools compatible properties with the turning of hardened materials, and can became an alternative to the ceramic tools and PCBN. In this context, the main objective of this research is to study the cutting speed influence in the life, wear mechanisms and in the surface finishing generated by the metal carbide tools in turning of AISI 4340 steel with 55 HRC. For such objective, turning tests were performed with fixed finishing parameters applying four different cutting speeds (100; 130; 160 and 190 m/min). The used tool was manufactured with fine grains metal carbide substrates and coated by the CVD method ($\text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiN}$) with epitaxial grains from alumina layer. Was found that, the longer tool life was obtained at lower cutting speed used in the experiments, $v_c = 100$ m/min. The crater formation in the tools edges was the main wear observed, being mainly attributed to the wear mechanism of abrasion. It was not clearly observed any evidence of diffusion mechanism. However, this cannot be ruled out in function of the metal carbide tools properties, the turning characteristics of hardened materials, and, the very formation of crater's wear. In all conditions was observed material adhered to the tool at the end of tool's life. All conditions used in the experiment promoted N6 class roughness surface, up to 0.8 μm in the Ra scale. Including, the tool that used 160 m/min promoted N5 class roughness surface, up to 0.4 μm in the Ra scale. Such finishing patterns are compatible with the turning of hardened material using PCBN tools and with the grinding process. The results displayed in the experiments of this research shows the possibility and viability of the industrial application of the metal carbide tools in the hardened materials turning.*

KEYWORDS: *Hardened materials turning; metal carbide; wear mechanism; AISI 4340.*

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento de máquinas-ferramentas com elevada rigidez e estabilidade dinâmica, e das ferramentas de usinagem construídas em materiais ultraduros (cerâmicas e PCBN) principalmente a partir da década de 1980, o processo de torneamento tornou-se viável para a realização de processos de acabamento em aços endurecidos. Desde então, vem sendo aplicado industrialmente em substituição, ou até mesmo, de forma híbrida com os processos de retificação (KOCH, 1996; KLOCKE, BRINKSMEIER e WEINERT, 2005; ASTAKHOV, 2011).

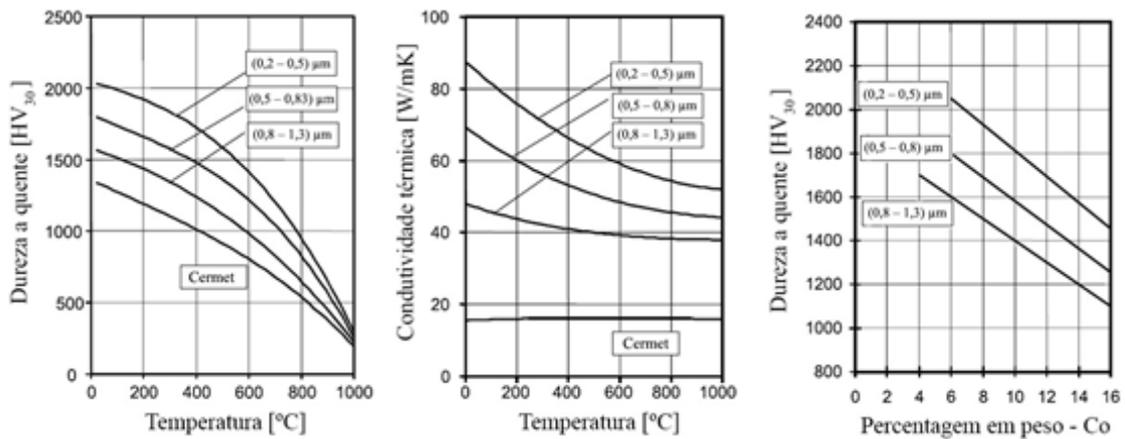
A definição mais comumente encontrada na literatura para o torneamento de materiais endurecidos descreve que o processo é caracterizado quando a dureza do material usinado está acima de 45 HRC. Esta definição é defendida por Grzesik (2008b), Machado, Abrão *et al.* (2009), Astakhov (2011) e até mesmo pela fabricante de ferramentas Sandvik Coromant (2014). Klocke e König (2008) descrevem que o torneamento de materiais endurecidos é caracterizado apenas quando a dureza do material usinado está acima de 50 HRC. Outra definição bastante coerente foi elaborada por Poulachon, Moisan e Jawahir (2001), os quais citam que a usinagem de materiais endurecidos ocorre quando o material ultrapassa o limite de resistência a tração de aproximadamente 1700 MPa. As propriedades dos aços, conforme as características supracitadas que definem o torneamento de materiais endurecidos promovem condições severas na interface cavaco-ferramenta, além da elevada pressão específica, o processo gera elevadas temperaturas, tipicamente acima da região de austenitização do material. Ou seja, as ferramentas de usinagem aplicadas em tais operações, obviamente devem suportar tais condições.

Inúmeras pesquisas evidenciam a aplicação das ferramentas de cerâmica e de PCBN no torneamento de diferentes tipos de materiais aplicados na indústria. Como exemplo, podem-se citar pesquisas nos aços de construção mecânica (AISI 4340) (DINIZ e OLIVEIRA, 2008; OLIVEIRA, DINIZ e URSOLINO, 2009), nos aços para rolamentos (AISI 52100) (SAHIN, 2009), nos aços-ferramentas (AISI D2) (POULACHON, BANDYOPADHYAY, et al., 2003; ARSECULARATNE, ZHANG, et al., 2006) e até mesmo nos ferros fundidos brancos (BOING, 2011). Nos diferentes materiais supracitados, o torneamento de materiais endurecidos de alta precisão é capaz de atingir rugosidade em torno de 1 μm na escala Rt e tolerância padrão ISO equivalente a IT3 (BYRNE, DORNFELD e DENDENA, 2003; GRZESIK, 2008a).

Apesar das ferramentas de cerâmica e PCBN possuírem ótimo desempenho no torneamento de materiais endurecidos, o processo de fabricação de tais ferramentas ainda é dispendioso, situação que limita sua gama de aplicações. Além disso, as ferramentas de cerâmica e PCBN são bastante frágeis, e falham com frequência quando utilizadas em máquinas-ferramentas não dedicadas ou que não possuem elevada rigidez e estabilidade dinâmica.

Neste contexto de aplicação industrial, o desenvolvimento das ferramentas de metal-duro com grãos menores que 1 μm , as quais, comparadas às ferramentas de metal-duro de grãos convencionais, possuem valores superiores de dureza, resistência do gume e tenacidade, além de baixa tendência à aderência, e em comparação com as ferramentas de cerâmica e PCBN possuem menor dureza, porém, maior tenacidade. Teoricamente, tais propriedades remetem à ferramentas de metal-duro de grãos finos e ultrafinos propriedades compatíveis com o torneamento de materiais endurecidos, e com isso, podem tornar-se uma alternativa às ferramentas cerâmicas e PCBN, desde que possibilitem a geração de padrões de tolerâncias compatíveis com as ferramentas cerâmicas e de PCBN (KLOCKE e KÖNIG, 2008; FANG, XANG, et al., 2009; CHINCHANIKAR e CHOUDHURY, 2013). A Figura 1 mostra algumas propriedades do metal-duro comparando o tamanho do grão de carboneto e a percentagem de aglomerante.

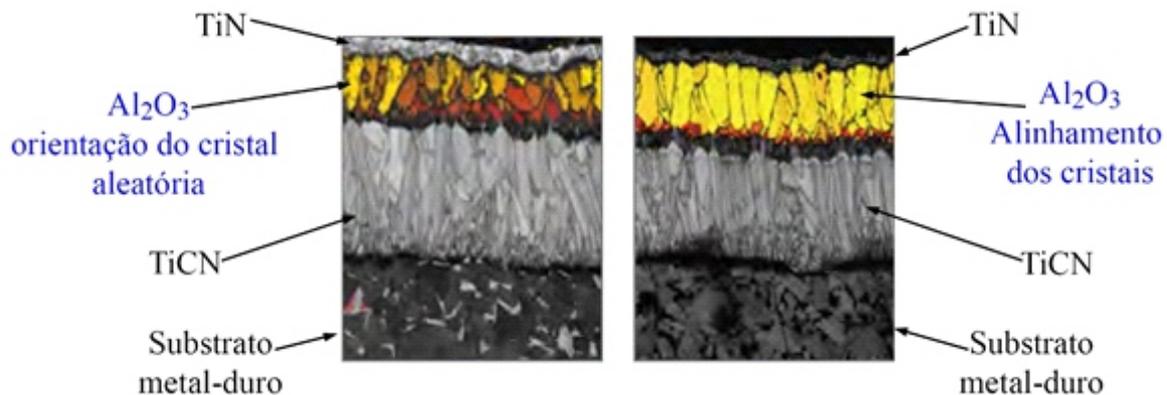
Figura 1 - Propriedades do metal-duro



Fonte – Gille, Szesny, *et al.* (2002)

Como pode ser constatado na Figura 1, quanto menor o tamanho do grão e menor a percentagem de aglomerante, maior a dureza das ferramentas. A redução no tamanho do grão do metal-duro também possibilita maior resistência do gume (TRENT e WRIGHT, 2000; GILLE, SZESNY, *et al.*, 2002; KLOCKE e KÖNIG, 2008). Para fortalecer a resistência da ferramenta, tipicamente são utilizados revestimentos, os quais incrementam as propriedades das ferramentas de metal-duro no torneamento de materiais endurecidos. Os materiais de revestimentos frequentemente utilizados para ferramentas de corte são compostos refratários binários ou ternários, tais como os clássicos TiN (Nitreto de Titânio), TiC (Carboneto de Titânico), TiCN (Carbonitreto de Titânio) e Al₂O₃ (Óxido de Alumínio), que são muitas vezes aplicados em camadas múltiplas, conforme mostra a Figura 2, e produzem um significativo aumento da vida da ferramenta (BUNSHAH, 2001; UPADHYAYA, 1998).

Figura 2 - Ferramentas de metal-duro com multicamadas.



Fonte – Adaptado de Sandvik Coromant (2015).

Cada camada possui uma função específica, normalmente o TiC ou o TiCN são utilizados como primeira camadas pois garantem uma coesão muito boa com o substrato. As principais vantagens do Al₂O₃ são inércia química e dureza, e com isso, possui alta resistência ao desgaste. Outra característica importante do Al₂O₃ é a redução na condutividade térmica com o aumento da

temperatura, situação que garante uma barreira térmica para a superfície da ferramenta. Salienta-se que quanto menor a condutividade térmica do revestimento, melhor, pois menor será a quantidade de calor que chegará ao substrato (KLOCKE e KÖNIG, 2008).

Uma inovação recentemente incorporada ao mercado dos revestimentos das ferramentas trata-se da orientação dos cristais na camada de revestimento de Al_2O_3 (Figura 3), ou seja, camada com grãos epitaxiais. Os cristais de Al_2O_3 são orientados de forma unidirecional, com o plano atômico mais denso na direção da superfície de corte, possibilitando maior direcionamento de calor para o cavaco e para os meios lubrificantes. A parcela de calor absorvida pela ferramenta é conduzida pelos planos atômicos de menor densidade próximos da camada de revestimento de TiCN, onde é dissipada na própria camada de TiCN e no substrato. Em resumo, além da orientação dos cristais elevarem a dureza da camada de revestimento Al_2O_3 , também auxiliam na dissipação do calor, evitando maior parcela de carga térmica no substrato (SANDVIK-COROMANT, 2015).

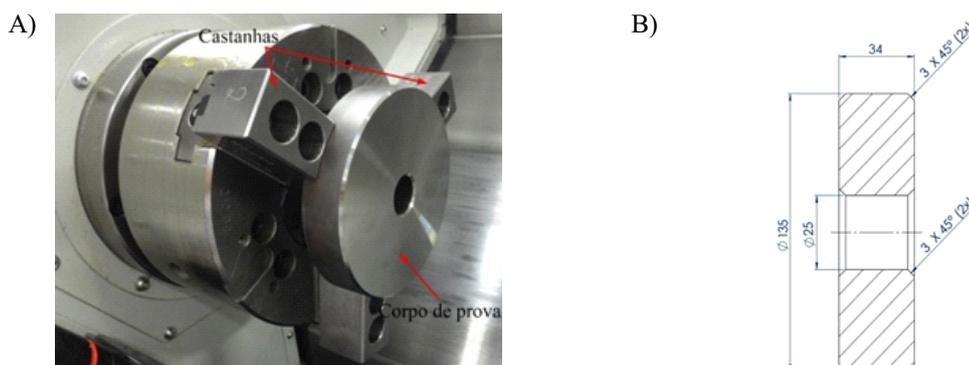
No contexto do torneamento de materiais endurecidos, esta pesquisa objetiva mostrar a influência da velocidade de corte, em termos de vida, mecanismos de desgaste e acabamento da superfície gerada pela ferramenta de metal-duro com triplo revestimento de (TiCN, Al_2O_3 e TiN) e grãos epitaxiais na camada de alumina, no torneamento do aço AISI 4340 endurecido.

2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os experimentos foram realizados no Centro de Tecnologia e Inovação em Fabricação do Centro Universitário de Brusque – UNIFEBE, utilizando os métodos, materiais e procedimentos especificados a seguir.

Os experimentos foram realizados em um Centro de Torneamento Horizontal da fabricante ROMI, modelo GL240, com motor do eixo-árvore com 15 kW de potência. Com o objetivo de conferir rigidez e a estabilidade dinâmica do sistema de fixação do corpo de prova, e minimizar as distorções dimensionais ao longo dos experimentos, foram utilizadas castanhas endurecidas (28 ± 2 HRC). O material utilizado para os corpos de prova foi ao aço AISI 4340 com dureza de 55 ± 1 HRC. A Figura 3 mostra o sistema de fixação utilizado e as dimensões do corpo-de-prova.

Figura 3 – A) sistema de fixação e B) dimensões do corpo-de-prova.



Fonte – Os Autores.

Com o objetivo de minimizar os choques na entrada e saída da ferramenta, foram confeccionados chanfros no diâmetro externo e interno do corpo de prova (dimensão de $3 \times 45^\circ$). Os chanfros foram reexecutados quando reduzidos a $0,5 \times 45^\circ$. Os experimentos consistiam em passes de faceamento no sentido radial. Com isso, o furo no centro do corpo de prova ($\varnothing = 25$ mm) foi desenvolvido para permitir a manutenção da velocidade de corte constante programada.

Os ensaios foram realizados com ferramentas e porta-ferramentas fornecidos pela empresa Sandvik Coromant®. A ferramenta utilizada foi construída com substrato metal-duro, código SNMG 120408-MF, classe ISO P15 com grãos finos e triplo revestimento CVD ($\text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiN}$). A camada de revestimento de Al_2O_3 possui a tecnologia de alinhamento dos grãos conforme mostrado na Figura 2. As ferramentas foram montadas em um suporte de torneamento externo (código PSKNL-2020K-12) e fixadas por meio de grampo e pino.

Como variáveis de entrada, foram utilizados quatro valores de velocidades de corte $v_c = 100, 130, 160$ e 190 m/min. As variáveis de saída utilizadas referem-se à vida da ferramenta, os mecanismos de desgaste e o acabamento da superfície por meio do parâmetro de rugosidade R_a .

O experimento consistia em passes de torneamento na face do corpo de prova em sentido radial (do diâmetro maior para o diâmetro menor), utilizando interrupções em intervalos regulares, a cada passe na face do corpo de prova. As interrupções foram utilizadas para analisar os valores de desgaste de flanco (VB_B) e rugosidade da superfície usinada, até que o critério de fim de vida da ferramenta fosse atingido (desgaste de flanco médio $\text{VB}_B = 0,2$ mm). Os experimentos foram realizados isentos de meios lubrificantes.

O desgaste de flanco médio (VB_B) foi monitorado com o auxílio de um microscópio digital da marca Insize® modelo ISM-P200, com ampliação máxima de 200 vezes, acoplado ao software Insize® ISM-PRO. Ao final da vida, as ferramentas foram analisadas em um microscópio eletrônico de varredura da marca Hitachi High-Tech, modelo TM 3030 Tabletop Microscope, equipado com sistema de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) modelo SwiftED3000 da Oxford Instruments, pertencente ao Núcleo de Pesquisas em Materiais Cerâmicos e Compósitos (CERMAT) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Para a análise da rugosidade, utilizou-se o rugosímetro Mitutoyo® SJ-310, ajustado para medir 5 comprimentos de amostragem (λ_c) de $0,8$ mm – comprimento de avaliação de 4 mm. As medições foram realizadas sobre a superfície usinada na direção do avanço (sentido radial do corpo de prova). Antes do início de cada experimento, a calibração foi verificada com o auxílio de um padrão de calibração.

Durante os experimentos, o corpo de prova era retirado da máquina-ferramenta para executar as medições da rugosidade. Com o objetivo de minimizar as fontes de variabilidade no reposicionamento na castanha, o batimento radial do corpo de prova foi analisado com um relógio apalpador da marca Insize® com resolução de $0,01$ mm, montado em um suporte magnético.

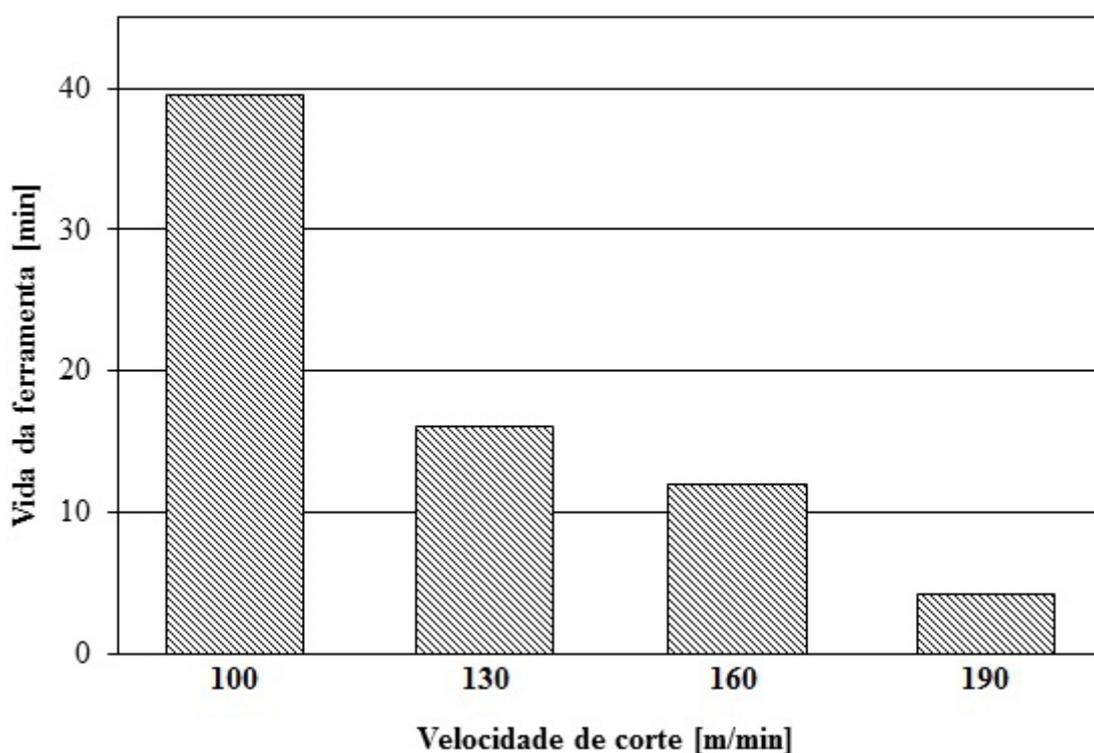
Os parâmetros de usinagem de profundidade de corte e avanço por volta foram mantidos fixos ao longo dos experimentos, sendo respectivamente (a_p) = $0,2$ mm e (f) = $0,08$ mm. Antes do início do ensaio, a superfície a ser usinada foi preparada com uma ferramenta de corte dedicada.

O objetivo desta preparação era tornar uma superfície de referência para minimizar o batimento radial do corpo de prova após a fixação. Na sequência à criação da superfície de referência, a ferramenta utilizada na regularização da superfície era substituída e se iniciava o experimento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apesar de serem utilizadas ferramentas de metal-duro na usinagem do aço AISI 4340 com 55 HRC, em termos de vida, as ferramentas mostraram-se adequadas à aplicação, principalmente quando utilizada a velocidade de $v_c = 100$ m/min. A Figura 4 mostra os resultados da vida das ferramentas utilizadas nos experimentos.

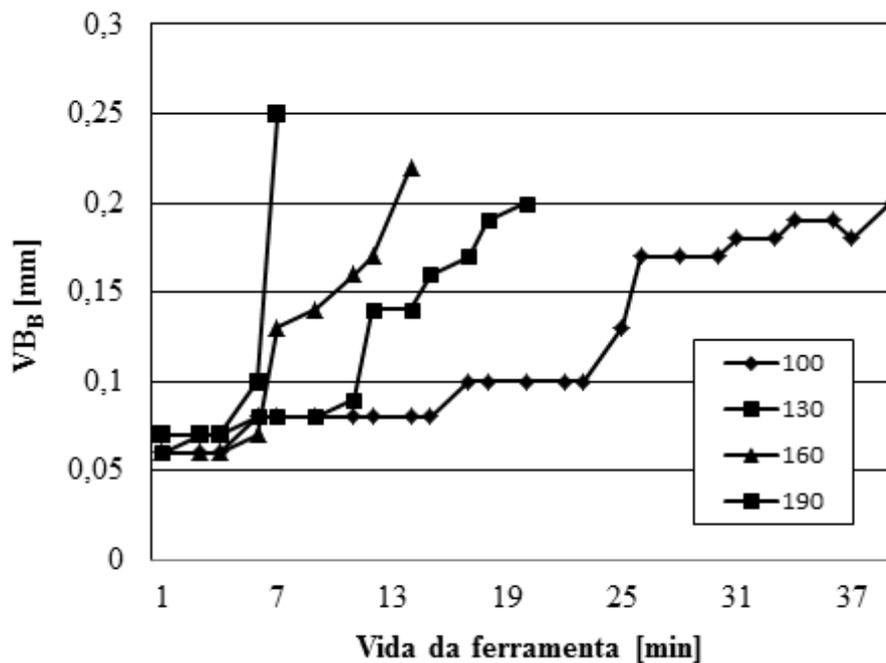
Figura 4 – Vida das ferramentas.



Fonte – Os Autores.

Conforme mostra a Figura 4, dentre os valores praticados nos experimentos, quando maior a velocidade de corte menor é a vida das ferramentas. Para a $v_c = 100$ m/min, a vida da ferramenta foi de 39,57 min, sendo reduzida aproximadamente 60% para a ferramenta utilizada a 130 m/min e 70% para a ferramenta a 160 m/min. Por fim, a ferramenta utilizada na velocidade de corte de 190 m/min possuiu apenas 10% da vida da ferramenta utilizada a 190 m/min. Para complementar a informação, a Figura 5 mostra a evolução do desgaste de flanco médio das ferramentas (VB_B) ao longo da vida das ferramentas.

Figura 5 - Evolução do desgaste de flanco médio (VB_B) ao longo da vida das ferramentas.

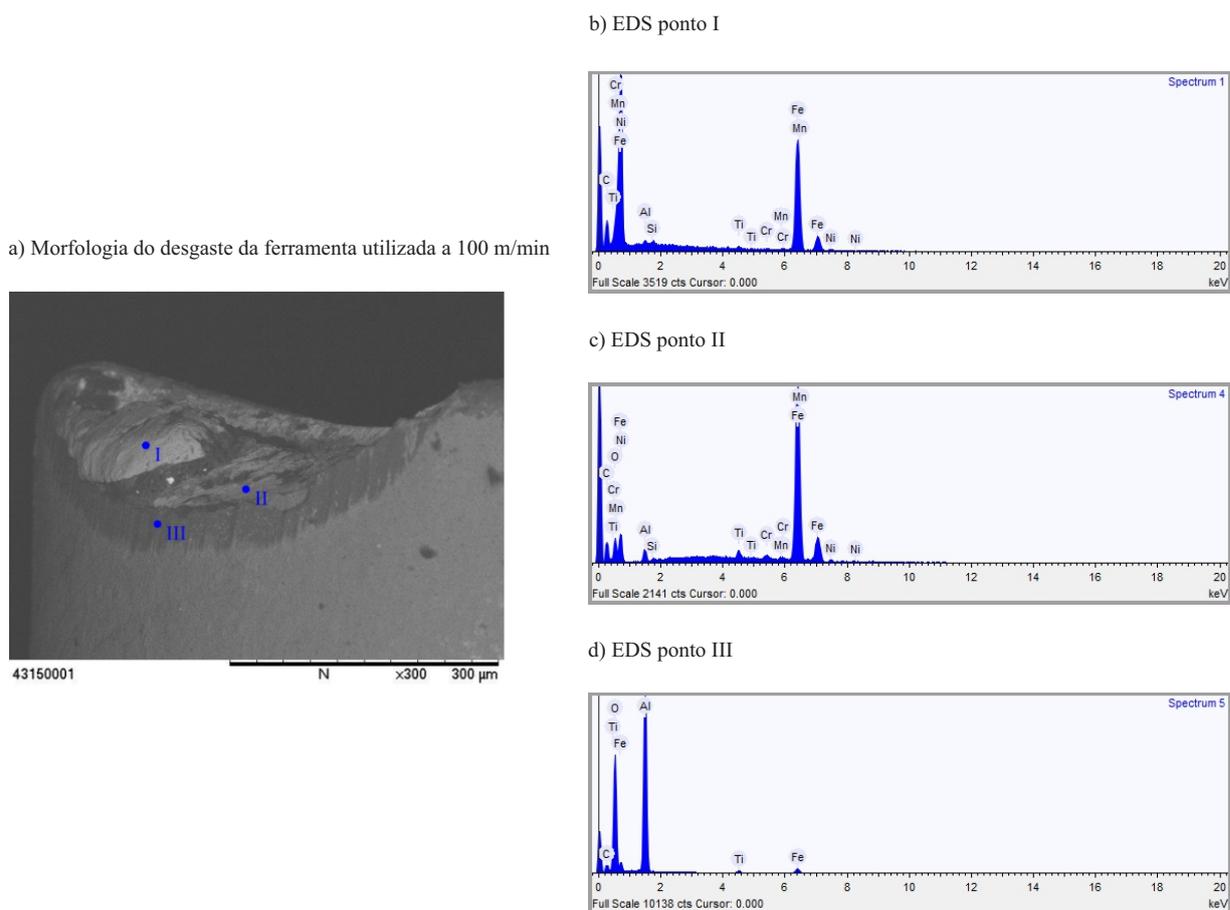


Fonte – Os autores.

Analisando a Figura 5, verifica-se que para as velocidades de corte de 100, 130 e 160 m/min o desgaste da ferramenta foi progressivo. No entanto, para a ferramenta utilizada a 190 m/min, o desgaste evolui rapidamente após atingir a marca do desgaste de flanco médio (VB_B) = 0,1 mm. Uma hipótese para explicar tal situação está literalmente nos típicos fenômenos ocorridos no processo de torneamento de materiais endurecidos. Nos parâmetros utilizados, quanto maior a velocidade corte maior a temperatura gerada, as quais, no torneamento de materiais endurecidos ultrapassam a temperatura de austenitização dos aços, e conforme mostrados na Figura 1, as ferramentas de metal-duro perdem consideravelmente suas propriedades e desta forma, o desgaste é acelerado de forma repentina conforme verificado para a velocidade de corte de 190 m/min.

Uma segunda hipótese para explicar o comportamento da ferramenta de metal-duro utilizada a 190 m/min está relacionada com a proteção térmica fornecida pelo revestimento das ferramentas. A velocidade de corte utilizada favorece a atuação mais severa dos mecanismos de desgaste e com isso, o revestimento da ferramenta é mais rapidamente removido, e o substrato é totalmente exposto. Para discutir com maior propriedade os mecanismos de falha das ferramentas, a seguir serão mostradas imagens realizadas por microscopia eletrônica das ferramentas dos gumes desgastados. A discussão se inicia com a ferramenta utilizada a 100 m/min, Figura 6.

Figura 6 – Morfologia do desgaste a análises em EDS da ferramenta utilizada a 100 m/min.



Fonte – Os Autores.

À esquerda da Figura 6, verifica-se a morfologia do desgaste do gume da ferramenta utilizada a 100 m/min, enquanto que direita (b,c e d) verificam-se os resultados das análises em EDS dos pontos destacados na morfologia. Analisando a forma do desgaste, verifica-se que se formou um severo desgaste do tipo cratera, consumindo por completo o gume. Na cratera e no flanco da ferramenta observam-se riscos abrasivos na direção da velocidade de corte, situação que caracteriza o mecanismo de desgaste da abrasão.

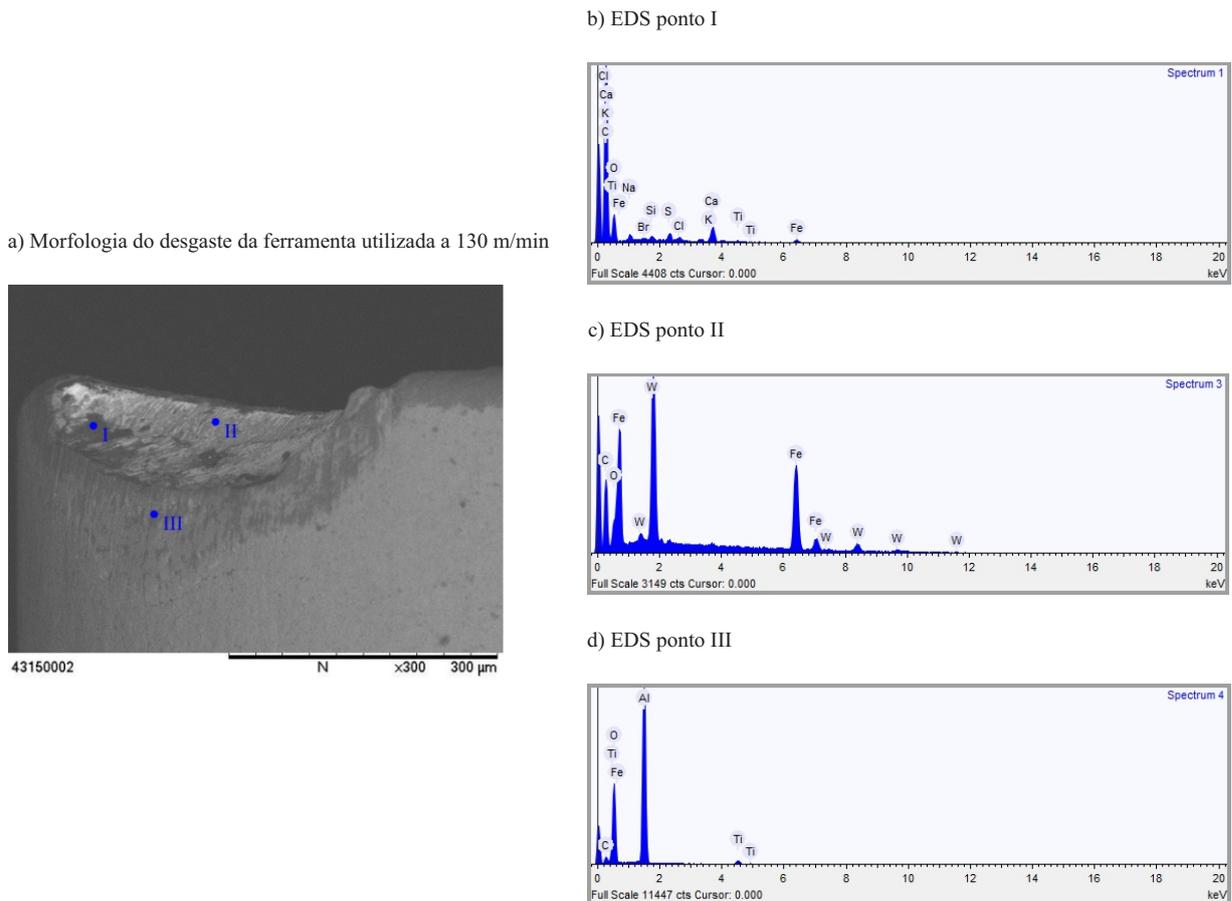
Outro fenômeno visualizado na morfologia do desgaste da Figura 6 é a aderência de material sobre o gume desgastado da ferramenta. Conforme a análise EDS, no ponto de análise EDS I, verifica-se elevados teores de manganês, cromo, níquel e ferro – típicos elementos constituintes da liga do aço AISI 4340. Na análise EDS no ponto II, elementos químicos similares ao ponto I foram observados. Apesar da observação de material aderido na região desgastada, não se pode inferir que ocorreu o mecanismo de desgaste da adesão, pois, tal fenômeno pode ter ocorrido apenas na saída da ferramenta da peça e com isso, não se pode inferir que tal fenômeno ocorreu no processo de corte propriamente dito. Para comprovar tal fenômeno, deve-se realizar um ensaio específico de parada súbita do processo.

As análises em EDS dos pontos I e II indicam sim, que pode ter ocorrido o mecanismo de desgaste da difusão, na qual, elementos químicos da ferramenta interagem com elementos do

cavaco, promovendo a perda de material da ferramenta ou, até mesmo, influenciando na quebra das ligações dos elementos constituintes no substrato da ferramenta, facilitando a atuação do mecanismo de desgaste da abrasão. O mecanismo de desgaste da difusão mostra-se por meio da morfologia praticamente “lisa” na face da ferramenta. Contudo, tal situação não está clara na imagem da morfologia mostrada na Figura 6. Por outro lado, tal fenômeno não pode ser descartado em decorrência dos fenômenos envolvidos no torneamento de materiais endurecidos, principalmente em relação à temperatura. Além disso, o mecanismo de desgaste da difusão é uma variável importante da função do desgaste de cratera.

Finalizando a discussão sobre a ferramenta aplicada a 100 m/min, verifica-se elevados teores de alumínio, oxigênio, titânio e ferro na análise EDS no ponto III. Exceto o ferro, os demais elementos químicos constituem o revestimento da ferramenta. Esta análise indica que o revestimento, como já conhecido, possui menor afinidade química com o material da peça (cavaco) em comparação ao substrato do metal-duro. Para as demais ferramentas, os fenômenos visualizados quanto ao mecanismo de desgaste foram similares. A Figura 7 mostra a morfologia do desgaste e as análises em EDS para a ferramenta aplicada a 130 m/min.

Figura 7 - Morfologia do desgaste e análises em EDS da ferramenta utilizada a 130 m/min.

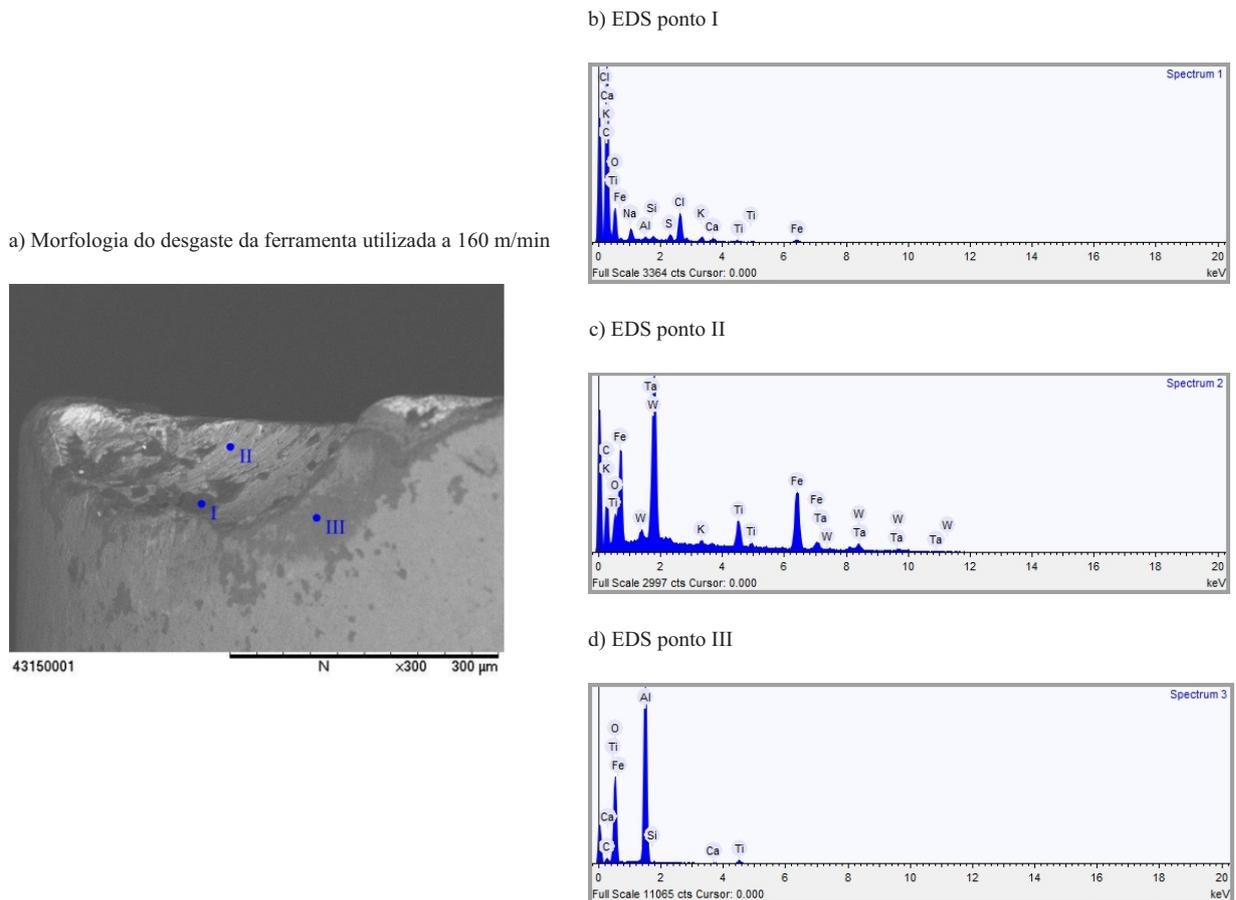


Fonte – Os Autores.

Analisando a morfologia do desgaste da ferramenta utilizada a 130 m/min, assim como na ferramenta utilizada a 100 m/min, verifica-se um intenso desgaste de cratera com a presença de

riscos abrasivos (tanto na face como no flanco) na direção da velocidade de corte. A principal diferença refere-se na presença de partículas do material da peça aderida à ferramenta. Teoricamente, o mecanismo de desgaste da adesão é visualizado em baixas velocidades de corte – fato que pode explicar a redução na quantidade de material aderido para tal condição. Na análise EDS mostrada na Figura 7b, a qual foi realizada sobre uma partícula de material aderida na ferramenta, verifica-se maior intensidade de elementos químicos presentes no material da peça. No ponto EDS II, a análise foi realizada em uma região, visualmente isenta de partículas aderidas, a qual mostrou principalmente a presença dos elementos ferro e tungstênio. O ferro é constituinte do material do corpo-de-prova, já o tungstênio é o principal elemento constituinte da ferramenta de metal-duro. Por fim, o ponto EDS III mostra elevados teores de alumínio, oxigênio, titânio e ferro. Novamente, exceto o ferro, os demais elementos identificados com maior intensidade no ponto EDS III referem-se ao material do revestimento. Fenômenos extremamente similares foram visualizados, inclusive quanto à análise EDS para a ferramenta utilizada a 160 m/min, Figura 8.

Figura 8 - Morfologia do desgaste a análises em EDS da ferramenta utilizada a 160 m/min.

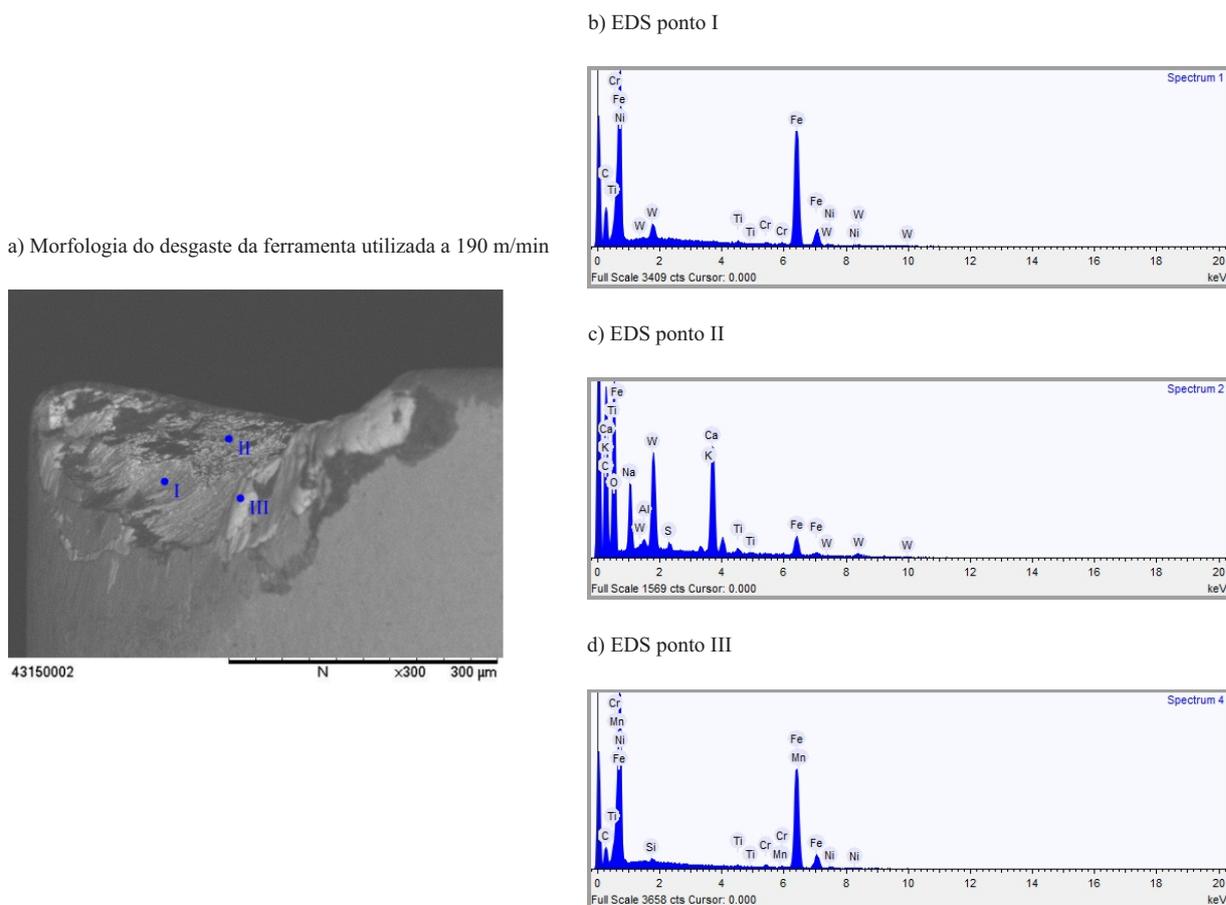


Fonte – Os Autores.

Conforme pode ser constatado na Figura 8, os fenômenos visualizados na morfologia do desgaste da ferramenta utilizando velocidade de corte de 160 m/min são similares aos visualizados na morfologia da ferramenta aplicada a 130 m/min. Como pôde ser constatado por meio da Figura 4, ocorreu uma drástica redução do tempo de vida da ferramenta com a variação

da velocidade de corte de 100 m/min para 130 m/min. Para a variação de 130 m/min para 160 m/min a redução no tempo de vida não foi intenso como no primeiro caso (redução de aproximadamente 25% do tempo de vida). Tal análise é um indicador de que os mecanismos de desgaste não foram severamente alterados. Nesta linha de análise, a alteração da velocidade de corte de 160 m/min para 190 m/min alterou a vida da ferramenta em aproximadamente 65%, situação que, obviamente pode interferir nos mecanismos de desgaste atuantes nas ferramentas. A Figura 9 mostra a morfologia do desgaste da ferramenta utilizada com velocidade de corte de 190 m/min.

Figura 9 - Morfologia do desgaste a análises em EDS da ferramenta utilizada a 190 m/min.



Fonte – Os Autores.

Conforme mostra a Figura 9, apesar das análises EDS mostrarem comportamentos similares às condições anteriores, a morfologia do desgaste possui algumas diferenças significativas. Verifica-se que a cratera formada é mais irregular, mostrando a nítida região com riscos abrasivos (local próximo ao ponto EDS I), materiais aderidos à face da ferramenta, e ainda, uma região (em torno do ponto EDS II) com topografia similar a uma “casca de laranja”. Sugere-se que tal topografia foi gerada por uma pequena avaria da ferramenta, ou ainda, pode ser decorrência do acelerado desgaste promovido na referida condição – conforme mostrado na Figura 5.

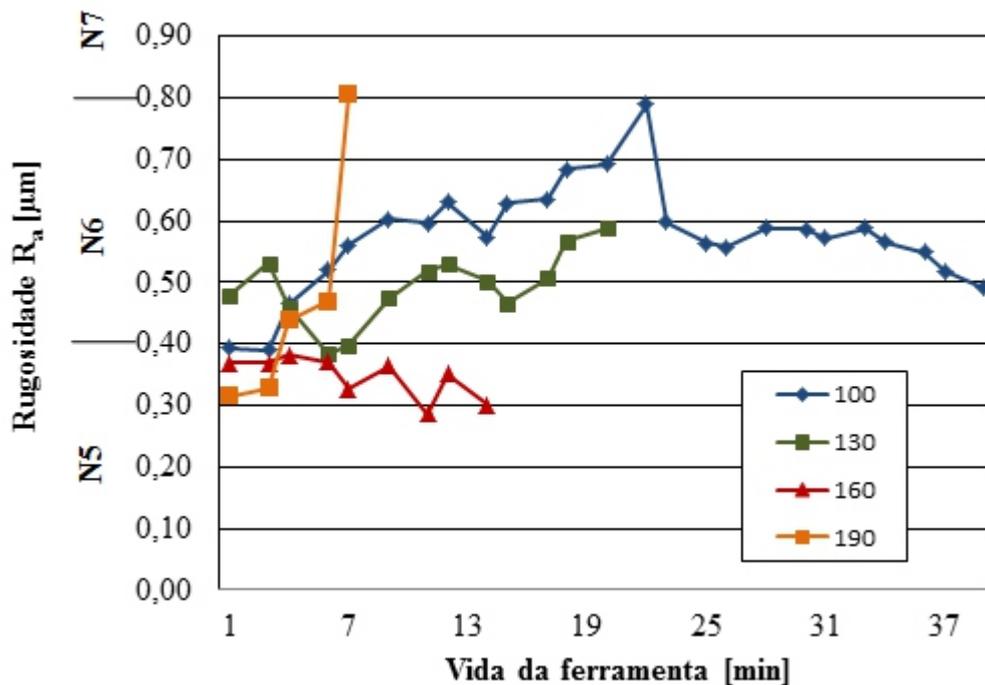
De forma geral, em todas as ferramentas utilizadas, pode-se determinar que o principal

mecanismo de desgaste observado foi a abrasão. Em todas as condições foram observados materiais aderidos à ferramenta – no entanto, não se pode inferir sobre o mecanismo de desgaste da adesão, pois, tais fenômenos podem ocorrer apenas na saída da ferramenta da peça e não participar do fenômeno de corte propriamente dito. Por fim, apesar das morfologias mostradas não deixarem claro a presença do mecanismo de desgaste da difusão, tal mecanismo não pode ser descartado em função das características do processo de torneamento de materiais endurecidos e das propriedades do metal-duro.

Uma situação que não pode ser ignorada e deve ser mais bem explorada em pesquisas futuras é justamente a presença do mecanismo de desgaste da adesão. Como a ferramenta sofre uma severa alteração da forma, e a geometria das ferramentas de metal-duro possuem geometria extremamente positiva, pode ocorrer a não estabilização da zona de fluxo, e com isso, a parte inferior do cavaco (o contato com ferramenta) irá apresentar forma irregular e desta forma, o grau de recalque poderá ser extremamente baixo, inclusive igual a 1, caracterizando situações não comuns no torneamento de materiais endurecidos, principalmente quando ferramentas de cerâmica e PCBN são utilizadas.

A severa alteração na forma do gume da ferramenta também pode influenciar na estabilidade e confiabilidade do processo, bem como, no padrão de acabamento gerado ao final da vida das ferramentas. A Figura 10 mostra a evolução do acabamento da superfície no parâmetro de rugosidade R_a ao longo da vida das ferramentas.

Figura 10 – Rugosidade R_a ao longo da vida das ferramentas.



Fonte – Os Autores.

Pode ser verificado na Figura 10 que para todos os experimentos, a rugosidade no parâmetro R_a não ultrapassou o limite da classe N6, até 0,8 μm na escala R_a . Além disso, verifica-

se uma leve tendência na redução dos valores de rugosidade gerados com o aumento da velocidade de corte, especialmente para a ferramenta utilizada a 160 m/min, para a qual, a classe de rugosidade manteve-se em N5, abaixo de 0,4 μm . A exceção foi a ferramenta utilizada a 190 m/min, para a qual, os valores de rugosidade foram crescentes e de elevaram-se de forma súbita ao final da vida da ferramenta. Para esta condição, sugere-se que a significativa alteração da forma foi o principal fator de influência para o rápido aumento do parâmetro de rugosidade R_a .

Por meio das informações mostradas nesta pesquisa, verifica-se que existe potencial para aplicação industrial das ferramentas de metal-duro no torneamento do aço AISI 4340 endurecido, tanto em termos de vida das ferramentas como no padrão de acabamento gerado. No entanto, os mecanismos de falhas das ferramentas e principalmente a forma de desgaste precisam ser mais bem exploradas, pois a severa formação da cratera no gume pode gerar instabilidade do processo.

4 CONCLUSÕES

Baseado nos resultados dos experimentos desta pesquisa apontam-se as seguintes conclusões:

- a maior vida da ferramenta foi obtida na menor velocidade de corte utilizada nos experimentos, $v_c = 100$ m/min;

- a formação de cratera no gume das ferramentas foi a principal forma de desgaste observada, sendo principalmente atribuída ao mecanismo de desgaste da abrasão. Não foram observadas nítidas evidências do mecanismo da difusão, porém, este não pode ser descartado em função das propriedades das ferramentas de metal-duro, das características do torneamento de materiais endurecidos, e ainda, da própria formação do desgaste de cratera. Em todas as condições foi observado material aderido à ferramenta ao final da vida dos experimentos.

- todas as condições utilizadas nos experimentos promoverem rugosidades na classe N6, até 0,8 μm na escala R_a . Inclusive, a ferramenta utiliza a 160 m/min promoveu rugosidade dentro da classe N5, até 0,4 μm na escala R_a . Tais padrões de acabamento são compatíveis com o torneamento de materiais endurecidos com ferramentas de PCBN e com o processo de retificação.

Os resultados mostrados nos experimentos desta pesquisa indicam a possibilidade e a viabilidade da aplicação industrial das ferramentas e metal-duro no torneamento de materiais endurecidos. Para viabilizar com confiabilidade tal aplicação, sugere-se estudar com detalhes os mecanismos de formação dos cavacos e com isso, concluir sobre fenômenos específicos do processo, como o grau de recalque e a atuação do mecanismo de desgaste da adesão (por meio de ensaio de parada subida do processo).

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradem as seguintes instituições, órgãos de fomento e programas públicos pelo apoio financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa:

- Centro Universitário de Brusque – UNIFEBE;
- FAPESC – Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina;
- Sandvik Coromant®;
- UNIEDU – Programa de Bolsas Universitárias de Santa Catarina;
- Programa de bolsas do artigo 171-SED/SC.

6 REFERÊNCIAS

ARSECULARATNE, J. A. et al. On machining of hardened AISI D2 steel with PCBN tools. **Journal of Materials Processing Technology**, 171, 2006. 244-252.

ASTAKHOV, V. P. Machining of Hard Materials - Definitions and Industrial Applications. In: DAVIM, J. D. **Machining of Hard Materials**. Springer-Verlag London Limited, 2011. p. 211.

BOING, D. **Análise da vida de ferramentas de PcBN no torneamento do ferro fundido branco com alto teor de cromo**. Instituto Superior Tupy - IST/SOCIESC. Joinville, p. 149. 2011.

BUNSHAH, R. F. **Handbook of Hard Coatings - Deposition Technologies, Properties and Applications**. Norwich: Noyes Publications / William Andrew Publishing, LLC, 2001. 550 p. ISBN: 0-8155-1438-7.

BYRNE, G.; DORNFELD, D.; DENDENA, B. Advancing Cutting Technology. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, 52, n. 2, 2003. 483-507. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607602005>>.

CHINCHANIKAR, S.; CHOUDHURY, S. K. Effect of work material hardness and cutting parameters on performance of coated carbide tool when turning hardened steel: An optimization approach. **Measurement**, 46, 2013. 1572–1584.

DINIZ, A. E.; OLIVEIRA, A. J. D. Hard turning of interrupted surfaces using CBN tools. **Journal of Materials Processing Technology**, 195, 2008. 275-281.

FANG, Z. Z. et al. Synthesis, sintering, and mechanical properties of nanocrystalline cemented tungsten carbide - A review. **International Journal of Refractory Metals & Hard Materials**, 27, 2009. 288-299.

GILLE, G. et al. Submicron and ultrafine grained hardmetals for microdrills and metal cutting inserts. **International Journal of Refractory Metals & Hard Materials**, 20, 2002. 3-22.

GRZESIK, W. **Advanced Machining Processes of Metallic Materials - Theory, Modelling and Applications**. Elsevier, 2008a.

GRZESIK, W. Machining of Hard Materials. In: DAVIM, J. P. **Machining - Fundamentals and Recent Advances**. Springer-Verlag London Limited, 2008b. Cap. 4, p. 361.

KLOCKE, F.; BRINKSMEIER, E.; WEINERT, K. Capability Profile of Hard Cutting and Grinding Processes. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, 54, 2005. 22-45.

KLOCKE, F.; KÖNIG, W. **Fertigungsverfahren 1 - Drehen, Fräsen, Bohren**. Springer, 2008. 547 p.

KOCH, K. F. **Technologie des Hochpräzisions-Hartdrehens**. Aachen, p. 169. 1996. Dr.-Ing. Dissertation (RWTH-Aachen).

MACHADO, Á. R. et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2009.

OLIVEIRA, A. J. D.; DINIZ, A. E.; URSOLINO, J. D. Hard turning in continuous and interrupted cut with PCBN and whisker-reinforced cutting tools. **Journal of Materials Processing Technology**, 209, 2009. 5262-5270.

POULACHON, G. et al. The influence of the microstructure of hardened tool steel workpiece on the wear of PCBN cutting tools. **International Journal of Machine tools & Manufacture**, 43, 2003. 139-144.

POULACHON, G.; MOISAN, A.; JAWAHIR, I. S. On modelling the influence of thermo-mechanical behavior in chip formation during hard turning of 100Cr6 bearing steel. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, 50, n. 1, 2001. 31-36.

SAHIN, Y. Comparison of tool life between ceramic and cubic boron nitride (CBN) cutting tools when machining hardened steels. **Journal of Materials Processing Technology**, 209, 2009. 3478-3489.

SANDVIK COROMANT. <http://www.sandvik.coromant.com>, 2014. Disponível em: <http://www.sandvik.coromant.com/en-us/knowledge/general_turning/how-to-achieve-good-component-quality/turning-in-different-materials/hard-part-turning/pages/default.aspx>. Acesso em: 26 dez. 2014.

SANDVIK - COROMANT. Steel turning endurance. <http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/pages/default.aspx>, 2015. Disponível em: <<http://www.sandvik.coromant.com/SiteCollectionDocuments/campaigns/cutting-steel-inserts/assets/white-paper-eng.pdf>>. Acesso em: 16 jan. 2015.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4. ed. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2000.

UPADHYAYA, G. S. **Cemented Tungsten Carbide: Production, properties and testing**. 1. ed. ed. New Jersey: Editora Noyes Publications, 1998.