

CARACTERIZAÇÃO DE FERRAMENTAS COMERCIAIS DE METAL DURO COM COBERTURA EM MICROSCÓPIO PARA ANÁLISE TRIDIMENSIONAL DE IMAGENS

Edson Bruno Lara Rosa

Felipe Dias Monteiro

Carlos Eiji Hirata Ventura

Armando Ítalo Sette Antonialli

Departamento de Engenharia Mecânica - DEMec, Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, Rod. Washington Luís (SP-310), Km 235, CEP 13565-905, São Carlos, SP, Brazil

edsonblr@estudante.ufscar.br; felipe.dias@estudante.ufscar.br; ventura@ufscar.br; antonialli@ufscar.br

Resumo. A imensa maioria dos processos de usinagem emprega como ferramentas de corte insertos de metal duro com cobertura. Uma solução típica, nesse segmento, é a cobertura tripla-camada $TiCN + Al_2O_3 + TiN$, muito empregada no torneamento de aços. Este trabalho contém os resultados da caracterização de dois insertos comerciais de metal duro recobertos com tripla-camada, sendo que uma classe é definida como a evolução da outra, anteriormente desenvolvida. A referida caracterização foi realizada em microscópio para análise tridimensional de imagens, sendo possível inferir diferentes parâmetros de rugosidade (a saber: R_z , R_{sk} e R_{ku}) sobre as superfícies de folga e de saída das ferramentas, além de parâmetros de irregularidade da aresta (Δr e $W\Delta r$). Foi possível concluir que a rugosidade na superfície de saída das ferramentas é tipicamente mais reduzida do que aquela verificada na superfície de folga, sendo ainda a superfície de saída composta por picos mais largos e vales mais estreitos do que a superfície de folga, de perfil mais simétrico. Aparentemente, a classe de ferramenta de desenvolvimento mais recente apresenta superfície de saída mais fina e, ainda, níveis reduzidos de irregularidades da aresta, propiciando, possivelmente, uma maior resistência ao desgaste de cratera e à ocorrência de microlascamentos.

Palavras-chave: Usinagem. Torneamento. Inserto. Rugosidade. Irregularidade da aresta.

1. INTRODUÇÃO

Para obter uma usinagem bem sucedida, um fator de extrema importância é a escolha do material e da classe da ferramenta que será utilizada no processo. Atualmente, cerca de 85% das pastilhas das ferramentas de corte são de metal duro com cobertura como diz Sandvik Coromant (2020).

As duas técnicas de recobrimento mais utilizadas são a deposição física de vapor (PVD) e a deposição química de vapor (CVD). Segundo Machado *et al.* (2015), a PVD consiste em colocar a ferramenta em um ambiente à vácuo e a gases que sofrem evaporação em temperaturas de até 500 °C, fazendo com que apresentem um tempo de vida mais longo e velocidades de cortes maiores do que as ferramentas sem revestimento. Já na CVD, são necessárias temperaturas que fiquem entre 700 °C a 1050 °C, e como resultado, as ferramentas apresentam uma ótima resistência ao desgaste e boa barreira para carga térmica em relação às ferramentas não revestidas.

Um bom exemplo da aplicação de CVD é a cobertura tripla-camada com carbonitreto de titânio (TiCN), óxido de alumínio (Al_2O_3) e nitreto de titânio (TiN). O TiCN costuma ser escolhido como a primeira camada por ter a característica de apresentar maior aderência do revestimento ao substrato de metal duro e a novos revestimentos posteriores a ele. O Al_2O_3 apresenta inércia química e dureza superiores, o que contribui positivamente para resistência ao desgaste, e também reduz a condutividade térmica do material, promovendo uma barreira térmica para a superfície da ferramenta. O TiN normalmente atua como uma camada externa, pois apresenta baixos coeficientes de atrito na interação entre o cavaco e a ferramenta, garantindo uma menor adesão dos materiais usinados (Quinto *et al.*, 1988).

Com relação às características geométricas das ferramenta, a rugosidade das superfícies de folga e de saída é um fator de forte influência sobre sua vida útil, uma vez que afeta diretamente a resistência aos mecanismos de desgaste abrasivo e àqueles gerados pelas altas temperaturas de usinagem (Denkena e Biermann, 2014).

Nesse cenário, destaca-se então a importância da análise de diferentes parâmetros de rugosidade, como o R_z , que consiste em uma média entre a altura de picos e profundidade de vales em 5 regiões do perfil. Outros parâmetros de interesse são o fator de assimetria R_{sk} (skewness), e de achatamento R_{ku} (kurtosis ou curtose); o primeiro indica a assimetria entre a distribuição de picos e vales no perfil, de maneira que valores negativos indicam vales mais largos e

valores positivos indicam picos mais largos; o segundo indica a forma da curva de distribuição, sendo 3 o valor de referência para uma distribuição normal, valores superiores a esse designam uma curva bastante pontiaguda (menor variabilidade) e valores inferiores, uma curva mais achatada (maior variabilidade) (Machado *et al.*, 2011).

Outras variáveis que merecem atenção são os fatores de irregularidade da aresta de corte, dos quais se destacam dois: Δr e $W\Delta r$ que indicam, respectivamente, a distância mínima entre aresta de corte real e ideal, e a largura dessa aresta de corte. Tais parâmetros designam a precisão da afiação da ferramenta, sendo que, quanto mais próximos de zero, mais próxima a ferramenta é da ideal, de maneira que o comportamento real deve, presumidamente, se aproximar daquele previsto por modelos teóricos (Ventura, Köhler e Denkena, 2013).

Ferramentas de metal duro com cobertura apresentam desempenho comumente superior quando comparadas com as ferramentas tradicionais de carboneto (Zhao *et al.*, 2019). Sahoo e Sahoo (2013) investigaram a utilização de insertos de metal duro com cobertura multicamadas ($\text{TiN/TiCN/Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$) na usinagem de aço AISI 4340, avaliando aspectos de usinabilidade, como evolução do desgaste do flanco da ferramenta, acabamento superficial da peça e esforços de corte envolvidos. Observaram que, mesmo na usinagem sem fluido de corte, a camada de TiN se mostra eficiente do ponto de vista tribológico, embora haja um crescimento rápido no desgaste da ferramenta ao longo do uso. Adicionalmente, a análise de variância pôde demonstrar que avanço e velocidade de corte têm grande influência sobre as diferentes componentes da força de usinagem.

Bouzakis *et al.* (2010) estudaram o efeito da espessura da camada de Cr/CrN e da rugosidade do substrato de metal duro na adesão do revestimento e no desempenho da ferramenta. Os autores concluíram que os processos de polimento e jateamento são eficazes na melhoria da adesão do recobrimento. Independentemente da espessura da camada, o módulo de Young, obtido a partir de testes de nanoindentação, ficou em torno de 600 GPa, sem qualquer ocorrência de rachadura ou descolamento. O desempenho das ferramentas foi avaliado em operações de fresamento, indicando melhores resultados em termos da vida da ferramenta para a cobertura de espessura 200 nm. De qualquer forma, a rugosidade do substrato mostra-se significativamente influente sobre a adesão da camada e, conseqüentemente, o desempenho da ferramenta.

Breidenstein *et al.* (2018) investigaram a influência do processamento a laser na superfície de ferramentas de torneamento de diferentes materiais, em comparação com a retificação, no torneamento duro de aço AISI 5115. Em ferramentas de nitreto cúbico de boro (cBN), o processamento a laser promoveu a formação de TiB_2 , o que resultou na proteção térmica da aresta de corte em razão das altíssimas temperaturas atingidas pelo feixe. No caso das ferramentas de cermet, uma classe de metal duro com partículas de TiC e TiN, o laser foi capaz de reduzir o desgaste de cratera da ferramenta, posto que o processamento em questão promoveu redução do atrito com o cavaco na superfície de saída da ferramenta. No caso das ferramentas cerâmicas, o laser se torna interessante para criar quebra-cavacos e outras geometrias complexas que não podem ser produzidas por processos convencionais.

Oliveira *et al.* (2011) analisaram o emprego de diferentes geometrias de ponta de brocas de metal duro revestido com TiAlN (*Titanium Aluminum Nitride*) a fim de melhorar a usinagem do ferro fundido vermicular (CGI), material utilizado na indústria automotiva, porém de difícil usinagem. O monitoramento do desgaste de flanco ao longo da vida útil da ferramenta permitiu identificar que o principal mecanismo de desgaste das ferramentas é o de abrasão. Assim, a escolha adequada da ferramenta pôde aumentar a produtividade a partir do aumento de sua vida útil.

Zhao *et al.* (2019) desenvolveram um processo de grafitação induzida por laser, aliado à retificação, na fabricação de microfresas com cobertura CVD de diamante policristalino (PCD). Para comparar o seu desempenho na usinagem de cobre eletrolítico, foi utilizada uma microfresa comercial de metal duro recoberta com CrTiAlN (Nitreto de cromo, titânio e alumínio). Os resultados mostram que a irradiação a laser formou uma camada de grafite capaz de contribuir com a lubrificação da operação de usinagem, promovendo um desempenho geral superior ao da ferramenta comercial de metal duro com cobertura. Hao *et al.* (2020), por sua vez, desenvolveram diferentes processamentos a laser para microfresas recobertas com PCD, obtendo resultados superiores aos das ferramentas convencionais em termos da qualidade da superfície usinada.

O objetivo deste trabalho é caracterizar duas ferramentas comerciais, que uma se apresenta como a evolução de outra. Verificar seus parâmetros de rugosidade e também parâmetros de irregularidade de aresta, a fim de encontrar suas semelhanças e diferenças. Esses parâmetros analisados são de extrema importância no desempenho na usinagem. A partir dos resultados dessa caracterização, pode-se estimar o comportamento de ambas em serviço à luz do referencial teórico ora apresentado.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A caracterização das ferramentas comerciais foi realizada no microscópio para análise tridimensional de imagens denominado Alicona InfiniteFocus SL, localizado no Laboratório de Metrologia Mecânica e Dimensional, dentro do Laboratório de Processos de Fabricação (LPF) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos (DEMec/UFSCar). Este equipamento funciona por meio de um sistema de variação de foco, sendo possível, portanto, avaliar defeitos superficiais, características dimensionais e até parâmetros de rugosidade, que são o objeto deste trabalho. Para isso, foi empregada uma lente objetiva de ampliação 10x, embora também estejam disponíveis no mesmo laboratório as lentes de ampliação 20x e 50x.

As ferramentas em questão são dois insertos comerciais de metal duro com cobertura da fabricante Sandvik Coromant: SNMG 12 04 04-PM GC4225 e SNMG 12 04 08-PM GC4325. Conforme indicado pelo código, são ambos quadrados, com oito arestas principais (sem ângulo de folga, portanto) e dimensões idênticas, exceto pelo raio de ponta. Outra pequena diferença é a classe da ferramenta; embora detenham a mesma cobertura CVD tripla-camada $\text{TiCN}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$ (ISO HC P25), a segunda é uma evolução da primeira, sendo ambas recomendadas para acabamento ou desbaste de aços, em cortes contínuos e interrompidos com altas taxas de remoção de metal; sendo, portanto, classes para uma ampla área de aplicação (Sandvik Coromant, 2020).

A caracterização foi conduzida sobre quatro arestas de corte intactas de cada um desses insertos. Em cada uma delas, foram avaliados diferentes parâmetros de rugosidade, (a saber, R_z , R_{sk} e R_{ku}), na superfície de folga (superfície defronte à peça de trabalho durante a usinagem) e na superfície de saída (superfície em que há o escorregamento do cavaco recém removido da peça de trabalho). O detalhamento da posição dessas duas superfícies está disposto na Figura 1. A distância mínima entre os perfis ideal e real da aresta de corte e a largura da aresta real (respectivamente, os parâmetros de irregularidade da aresta Δr e $W\Delta r$) também foram medidas.

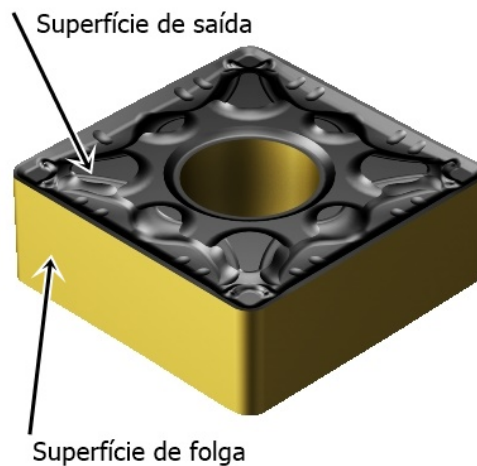


Figura 1. Localização das superfícies de folga e saída. (adaptada de Sandvik Coromant, 2020)

De acordo com Dagnall (1986), R_z consiste em uma média relativa a dez pontos dentro do comprimento de amostragem: os cinco picos mais altos e os cinco vales mais baixos, sendo que o resultado é a altura média desses dez pontos (Eq. (1) e Figura 2). Por sua vez, R_{sk} é descrito por um valor numérico que representa a assimetria da superfície, de forma que valores positivos significam vales largos, e valores negativos significam picos largos (Eq. (2)). R_{ku} (curtose) fornece uma medida da nitidez da superfície, de forma que uma superfície com grande repetibilidade em relação ao comprimento de picos e vales é descrita com um alto valor de R_{ku} e, uma superfície com grande variabilidade, com um baixo valor de R_{ku} ; $R_{ku} = 3$, por exemplo, denota uma distribuição normal acerca do comprimento de picos e vales (Eq. (3)).

$$R_z = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5}{5}$$

(1)

Onde Z é a diferença do pico mais baixo com o pico mais alto subsequente, conforme mostrado na figura (2). Por exemplo, Z_1 é igual a diferença entre Z_{v1} e Z_{p1} .

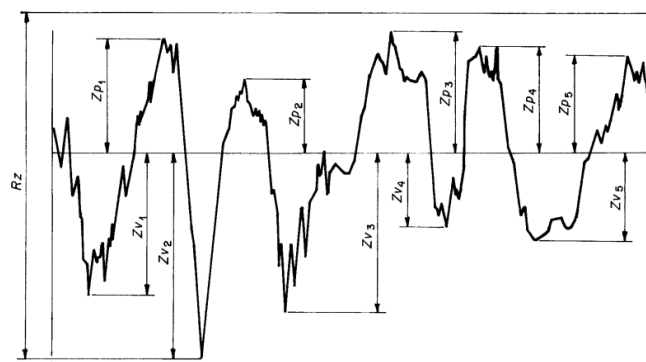


Figura 2. Ilustração do parâmetro R_z (adaptada NBR ISO 4287, 2002)

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \left[\frac{1}{ln} \int_0^{lm} z^3(x) dx \right] \quad (2)$$

$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \left[\frac{1}{ln} \int_0^{lm} z^4(x) dx \right] \quad (3)$$

Uma ferramenta seria considerada perfeitamente afiada se o perfil da aresta coincidissem com o ponto de intersecção entre a superfície de folga e a superfície de saída. Entretanto, na prática, existe um certo desvio entre elas, o qual pode ser caracterizado pela distância mínima entre os perfis ideal e real (Δr) e pela largura da aresta real ($W\Delta r$). Usualmente, Δr e $W\Delta r$ são denominados parâmetros de irregularidade da aresta (Ventura, Köhler e Denkena, 2013).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 3 a 5, a seguir, contêm os resultados da caracterização das ferramentas realizada em microscópio para análise tridimensional de imagens. O inserto SNMG 12 04 04-PM GC4225 é designado somente como “4225”, enquanto o inserto SNMG 12 04 08-PM GC4325, somente como “4325”.

Na Figura 3, vê-se o parâmetro de rugosidade Rz aferido nas superfícies de folga e de saída de ambos os insertos 4225 e 4325. É fácil notar que a rugosidade das superfícies de folga (da ordem de $3,0 \mu m$) é significativamente superior àquela verificada nas superfícies de saída (da ordem de $1,8 \mu m$).

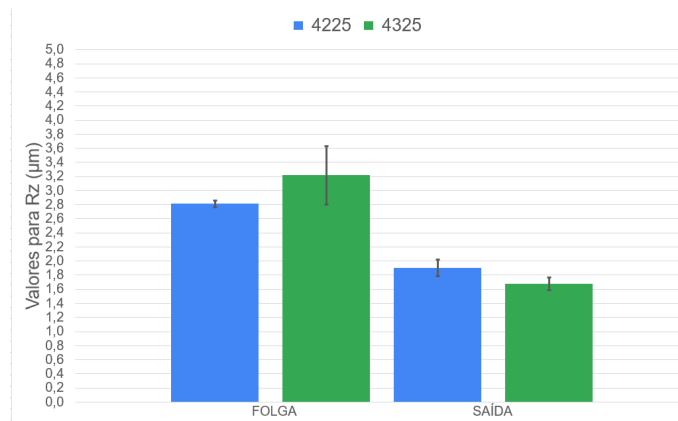


Figura 3. Parâmetro Rz de rugosidade avaliado nas superfícies de folga e de saída das ferramentas 4225 e 4325

Além disso, a rugosidade Rz da superfície de folga é maior no inserto 4325 ($3,2 \mu m$ em média) do que no inserto 4225 ($2,8 \mu m$ em média), e essa diferença é estatisticamente significativa considerando um intervalo de confiança de 95% (p -valor = 0,049, Montgomery, 2019). Por outro lado, o rugosidade Rz da superfície de saída é estatisticamente maior no inserto 4225 ($1,9 \mu m$ em média) do que no inserto 4325 ($1,7 \mu m$ em média) considerando um intervalo de confiança de 95% (p -valor = 0,011).

A Figura 4 contém a análise dos parâmetros de rugosidade Rsk (Fig. 4(a)) e Rku (Fig. 4(b)). Vê-se que, embora os valores de Rsk sejam predominantemente negativos, eles são mais negativos na superfície de saída ($-0,99 \mu m$ em média) do que na superfície de folga ($-0,07 \mu m$ em média). Com relação a Rku , os valores verificados na superfície de folga, com destaque para o inserto 4325 (cujas médias ultrapassam a linha de $3,0$), são maiores do que aqueles verificados na superfície de saída.

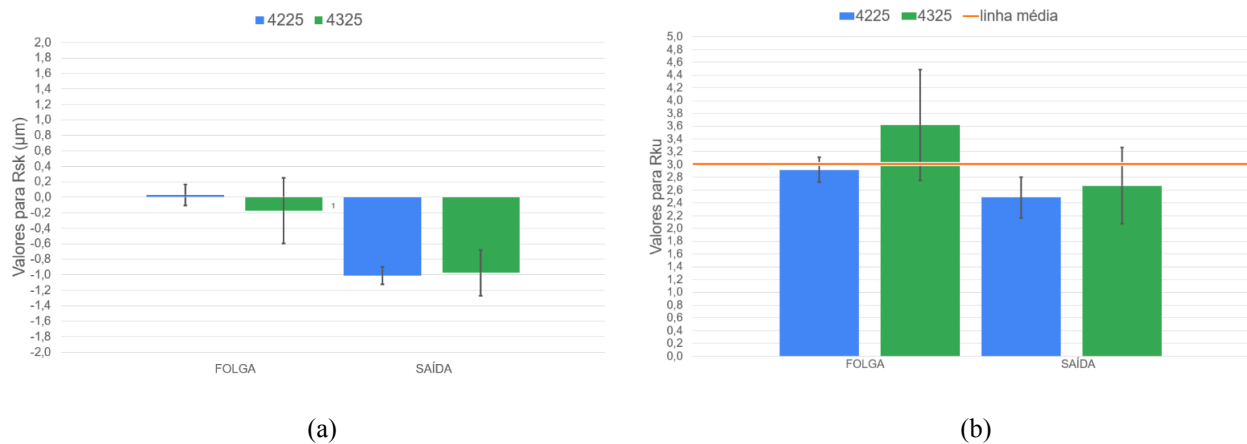


Figura 4. Parâmetros de rugosidade avaliados nas superfícies de folga e de saída das ferramentas 4225 e 4325: (a) Rsk e (b) Rku

Em razão da grande dispersão das medidas verificadas para o inserto 4325, principalmente, a análise de variância não indica diferença estatisticamente significativa entre os insertos 4225 e 4325 em termos de Rsk e Rku seja na superfície de folga ou na superfície de saída da ferramenta.

Avaliando os parâmetros de rugosidade de uma forma geral, verifica-se que a superfície de folga das ferramentas apresentam acabamento mais grosseiro, porém mais simétrico e com maior repetibilidade em comparação com a superfície de saída das ferramentas. Com relação aos diferentes insertos, a classe 4225 se mostra menos grosseira na superfície de folga, e a classe 4325 mais fina na superfície de saída.

Finalmente, a Figura 5 apresenta os resultados relacionados aos parâmetros de irregularidade da aresta Δr e $W\Delta r$ para os insertos 4225 e 4325, com Δr na faixa de 38 µm e $W\Delta r$ na faixa de 69 µm.

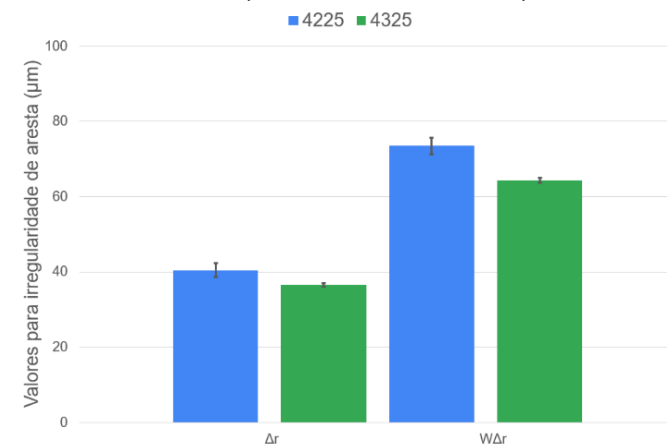


Figura 5. Parâmetros de irregularidade da aresta Δr e $W\Delta r$ avaliados nas ferramentas 4225 e 4325

A análise de variância indica, em um intervalo de confiança de 95%, que o parâmetro Δr é estatisticamente mais elevado no inserto 4225 do que no inserto 4325 (p-valor = 0,003). Ademais, em se tratando do parâmetro $W\Delta r$, a diferença entre os insertos é ainda mais pujante (p-valor << 0,001). Isso implica em considerar que o inserto 4325 apresenta menos irregularidades de aresta do que o inserto 4225.

4. CONCLUSÕES

Os dois insertos comerciais objetos deste trabalho apresentam valores de rugosidade R_z bastante superiores na superfície de folga em comparação com aqueles valores medidos na superfície de saída. Com relação ao parâmetro Rsk, os valores são mais negativos na superfície de saída do que na superfície de folga. Por sua vez, o parâmetro Rku se mostra mais elevado na superfície de folga do que na superfície de saída.

Dessa forma, é de se supor que os processos de fabricação envolvendo os insertos privilegiam a obtenção de um melhor acabamento na superfície de saída das ferramentas, em detrimento da superfície de folga. Essa condição é inclusive maximizada no caso da classe GC4325 em comparação à classe GC4225. Ainda, as superfícies de saída

apresentam maior predominância de picos mais largos e vales mais estreitos, enquanto as superfícies de folga se mostram mais simétricas e com maior repetibilidade em torno dessa característica.

Com relação aos parâmetros de irregularidade da aresta, a classe GC4325 apresenta redução significativa da distância mínima entre os perfis ideal e real e da largura da aresta real em comparação com a classe GC4225.

Considerando que a classe GC4325 se coloca como uma evolução da classe GC4225, pode-se deduzir que essa melhoria se dá em função da redução da rugosidade da superfície de saída, que pode ocasionar em um aumento salutar de resistência desgaste de cratera e, sobremaneira, na diminuição dos parâmetros de irregularidade da aresta, os quais implicam em uma diminuição da ocorrência de microlascamentos.

5. AGRADECIMENTOS

À FAPESP, pelo financiamento do equipamento de trabalho. Ao CNPq e à CAPES, pela concessão de bolsas de estudo. À Tecplus Ferramentas, na pessoa do engenheiro Mario Toyama, pela doação das ferramentas utilizadas neste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR ISO 4287: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, 2002.
- Bouzakis, K. D. *et al.* Adaption of graded Cr/CrN-interlayer thickness to cemented carbide substrates' roughness for improving the adhesion of HPPMS PVD films and the cutting performance. *Surface and Coatings Technology*, v. 205, n. 5, p. 1564–1570, 2010.
- Briedenstein B. *et al.* Laser material removal on cutting tools from different materials and its effect on wear behavior. *Metal Powder Report*, v. 73, n. 1, p. 26–31, 2018.
- Dagnall, H. *Exploring Surface Texture*. 2. ed. [S. l.]: Taylor Hobson Limited, 1986. ISBN 978-0901920072.
- Denkena, B.; Biermann, D. Cutting edge geometries. *CIRP Annals*, v. 63, n. 2, p. 631–653, 2014.
- Hao, X. *et al.* Fabrication of Large Aspect Ratio PCD Micro-milling Tool with Pulsed Lasers and Grinding. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 58, n. May, p. 489–499, 2020.
- Machado, et al. *Teoria da usinagem dos materiais*. 3. ed. rev. e atual. São Paulo: Blucher, 2015. 408 p.
- Montgomery, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. 10. ed. [S. l.]: Wiley, 2019. 688 p. ISBN 978-1-119-49244-3. E-book.
- Oliveira, V. V. De; Beltrão, P. A. D. C.; Pintaude, G. Effect of tool geometry on the wear of cemented carbide coated with TiAlN during drilling of compacted graphite iron. *Wear*, v. 271, n. 9–10, p. 2561–2569, 2011.
- Quinto, D. T. *et al.* Mechanical properties, structure and performance of chemically vapor-deposited and physically vapor deposited coated carbide tools. *Materials Science and Engineering*, n. A105/106, p. 443–452, 1988.
- Sahoo, A. K.; Sahoo, B. Performance studies of multilayer hard surface coatings (TiN/TiCN/Al₂O₃/TiN) of indexable carbide inserts in hard machining: Part-I (An experimental approach). *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, v. 46, n. 8, p. 2854–2867, 2013.
- Sandvik Coromant, 2020. “Materiais de ferramentas de corte”. 29 Jan. 2021 <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx>>.
- Ventura, C.; Köhler, J.; Denkena, B. Cutting edge preparation of PCBN inserts by means of grinding and its application in hard turning. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Elsevier, v. 6, p. 246 – 253, agosto 2013.
- Zhao, G. *et al.* Fabrication and performance of CVD diamond cutting tool in micro milling of oxygen-free copper. *Diamond and Related Materials*, v. 100, n. October, p. 107589, 2019.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

CHARACTERIZATION OF COATED CARBIDE COMMERCIALLY AVAILABLE TOOLS USING A 3D IMAGE ANALYZER MICROSCOPE

Edson Bruno Lara Rosa

Felipe Dias Monteiro

Carlos Eiji Hirata Ventura

Armando Ítalo Sette Antonialli

Department of Mechanical Engineering - DEMec, Federal University of São Carlos - UFSCar, Rod. Washington Luís (SP-310), Km 235, CEP 13565-905, São Carlos, SP, Brazil

edsonblr@estudante.ufscar.br ; felipe.dias@estudante.ufscar.br ; ventura@ufscar.br ; antonialli@ufscar.br

Abstract. Most of machining processes use as cutting tools coated cemented carbide inserts. One typical solution in this field is $TiCN + Al_2O_3 + TiN$ triple-layer coating, which is extensively used on steel turning. This work contains the results of characterization of two commercially available triple-coated cemented carbides, considering that one grade is defined as the evolution of the other one, which was formerly developed. This referred characterization was held on a 3D image analyzer microscope, on which different roughness parameters (as R_z , R_{sk} and R_{ku}) can be identified on the clearance and rake surfaces, besides cutting edge irregularities (Δr and $W\Delta r$). It was possible to conclude that roughness measured on the rake surface of the tool is typically lower than that measured on the clearance surface, and also rake surface is characterized by broader peaks and narrower valleys than the clearance surface, which is more symmetric. Apparently, the tool grade that was more recently developed presents a finer rake surface and also lower cutting edge irregularities, which may possibly provide higher resistance to crater wear and chipping occurrence.

Keywords: Machining. Turning. Insert. Roughness. Edge irregularities.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.