

DESGASTE DA FERRAMENTA DE CORTE DE METAL DURO NA USINAGEM DO AÇO AISI 1020 – UMA ABORDAGEM ESTATÍSTICA

Escarlet Batista da Silva^{1}, Alan Monteiro Ramalho² & Luciano José de Oliveira³*

RESUMO

SILVA, E. B.; RAMALHO, A. M.; OLIVEIRA, L. J. Desgaste da ferramenta de corte de metal duro – uma abordagem estatística. **Perspectivas Online: Exatas & Engenharia**, v. 10, n. 29, p. 30-42, 2020.

A usinagem é considerada um processo de fabricação onde tem-se remoção de material na forma de cavaco, conferindo à peça de trabalho forma, dimensões e acabamento. Pode-se dizer, que o torneamento é uma operação de usinagem muito executada na indústria, por ser fácil de operar e economicamente viável, apresentando uma grande participação na fabricação de peças usinadas. Este trabalho tem como objetivo principal avaliar o desgaste de uma ferramenta de corte de metal duro após operação de torneamento, bem como, avaliar a efetividade do método utilizado por análise estatística. O material escolhido para os testes de usinagem foi o aço AISI 1020. Para os ensaios de usinagem, foram realizadas operações de torneamento em torno CNC, onde avaliou-se alguns parâmetros como rugosidade, desgaste e o diâmetro da peça a cada passe.

Os parâmetros de entrada utilizados foram: profundidade de usinagem 0,5 mm, velocidade de avanço 0,15 mm/rotação e velocidade de corte 275 m/min. Foram realizados ensaios de dureza Rockwell B e análise metalográfica no aço 1020. Para avaliar o desgaste do inserto, mediu-se as suas dimensões antes e após os testes de usinagem, confrontando as medidas via projetor de perfil com as medidas realizadas utilizando micrômetro. Os testes de usinagem sugerem que a ferramenta de metal duro apresentou predominantemente desgaste de cratera e de flanco. Os testes estatísticos realizados (coeficiente de Pearson, teste t e distribuição normal), indicaram que este método de determinação de desgaste da ferramenta de corte, pode ser um método alternativo de avaliação.

Palavras-chave: Usinagem; Torneamento; CNC.

¹Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF - Laboratório de Materiais Avançados – LAMAV/CCT - Av. Alberto Lamego, 2000, Parque Califórnia, Campos dos Goytacazes, RJ, CEP: 28013-602, Brasil.

²Instituto Federal Fluminense – IFF – Laboratório de Usinagem – Av. Souza Mota, 350, Parque Fundão, Campos dos Goytacazes, RJ, CEP: 28060-010, Brasil.

³Universidade Federal Fluminense – UFF – Av. Aluizio da Silva Gomes, 50, Granja dos Cavaleiros, Macaé, RJ, CEP: 27930-560, Brasil.

(*) e-mail: escarletbatista@yahoo.com.br

WEAR OF CEMENTED CARBIDE CUTTING TOOL - A STATISTICAL APPROACH

Escarlet Batista da Silva^{1}, Alan Monteiro Ramalho² & Luciano José de Oliveira³*

ABSTRACT

SILVA, E. B.; RAMALHO, A. M.; OLIVEIRA, L. J. Wear of cemented carbide cutting tool - a statistical approach (In Portuguese). **Perspectivas Online: Exatas & Engenharia**, v. 10, n. 29, p. 30-42, 2020.

Machining is considered a manufacturing process where material is removed in the form of chips, giving the workpiece shape, dimensions and finish. It can be said that turning is a machining operation that is widely performed in the industry, as it is easy to operate and economically viable, with a large share in the manufacture of machined parts. This work has as main objective to evaluate the wear of a carbide cutting tool after turning operation, as well as to evaluate the effectiveness of the method used by statistical analysis. The material chosen for the machining tests was AISI 1020 steel. For machining tests, turning operations were performed on the CNC lathe, where some parameters were evaluated, such as roughness, wear and the

diameter of the part at each pass. The input parameters used were: machining depth 0.5 mm, feed speed 0.15 mm / rotation and cutting speed 275 m / min. Rockwell B hardness tests and metallographic analysis were performed on 1020 steel. To assess the wear of the insert, its dimensions were measured before and after the machining tests, comparing the measurements via a profile projector with the measurements made using a micrometer. Machining tests suggest that the carbide tool showed predominantly crater and flank wear. The statistical tests performed (Pearson's coefficient, t test and normal distribution), indicated that this method of determining the wear of the cutting tool may be an alternative method of evaluation.

Keywords: Maching; Turning; CNC.

¹Northern State University Fluminense Darcy Ribeiro - UENF – Advanced Materials Laboratory LAMAV/CCT - Alberto Lamego Avenue, 2000, Parque Califórnia, Campos dos Goytacazes, RJ, CEP: 28013-602, Brazil.

²Fluminense Federal Institute – IFF – Machining Laboratory – Souza Mota Avenue, 350, Parque Fundão, Campos dos Goytacazes, RJ, Postal code: 28060-010, Brasil.

³Fluminense Federal University– UFF – Aluizio da Silva Gomes Avenue, 50, Granja dos Cavaleiros, Macaé, RJ, Postal code: 27930-560, Brasil.

(*) e-mail: escarletbatista@yahoo.com.br

1. INTRODUÇÃO

A usinagem é um termo usado em processos de fabricação por geração de superfícies através da retirada do material, conferindo dimensão e forma à peça (FERRARESI, 2013). Os processos de fabricação por usinagem são de grande importância para a indústria, em setores diversos, como o automobilístico, o aeronáutico, da mineração, da siderurgia, o aeroespacial, o têxtil, o hospitalar entre outros (TOLOCZKO et al., 2019).

Na usinagem normalmente utiliza-se como material para ferramenta de corte, um material que possua uma dureza superior ao material a ser usinado. Com o passar do tempo e considerando os dias de hoje, os materiais da ferramenta de corte vem sofrendo inovações tecnológicas com o objetivo de melhorar algumas propriedades mecânicas, principalmente a dureza e a tenacidade, fundamentais para o bom desempenho da ferramenta. Considerando os diversos materiais utilizados para a manufatura de ferramentas de corte com geometria definida para usinagem de aço, pode-se destacar o metal duro, cerâmicos e o aço rápido (DINIZ et al., 2010).

As operações de usinagem podem ser convencionais ou não convencionais. As mais importantes nos processos convencionais são torneamento, furação e fresamento. Elas podem ser executadas com ferramentas de geometria definida (remoção do material por deformação plástica) ou com ferramentas sem geometria definida (remoção do material por abrasão), e suas operações podem ser agrupadas em desbaste e acabamento superficial. No desbaste deve-se garantir elevadas taxas de remoção do material. Já no acabamento, a preocupação é a qualidade final do material desbastado. (MACHADO et al., 2011).

O metal duro é atualmente o principal material para ferramenta de corte, responsável por aproximadamente 45% das ferramentas. Este material predominou nos últimos dez anos devido à evolução de suas classes que podem suportar o calor e a abrasão do corte a altas temperaturas e a usinagem de materiais difíceis (PEÇANHA JÚNIOR, 2014). A temperatura pode influenciar o processo de usinagem em diversos aspectos, de forma direta ou indireta, como a seleção da ferramenta, vida útil da ferramenta, uso de lubrificantes, uso de revestimentos, avanço, profundidade, dentre outros (COELHO et al., 2019).

Em uma ferramenta de corte pode ocorrer dois tipos de desgaste, como desgaste físico e químico, por exemplo. O desgaste físico acontece por abrasão, já o desgaste químico é a dissolução, bem como a difusão entre a ferramenta e a peça. A adesão, abrasão, oxidação e difusão são considerados mecanismos de desgaste. O desgaste da ferramenta na operação de torneamento pode estar relacionado a fricção e ao calor excessivo (Huang et al. 2007). Segundo Wosniak (2011), os principais mecanismos de desgaste das ferramentas de corte são: a deformação da aresta, abrasão, adesão, difusão e oxidação.

Segundo Suyama (2014), os mecanismos de desgaste citados anteriormente podem gerar desgaste de flanco e de cratera. Desgaste Frontal (ou de flanco): ocorre na superfície de folga da ferramenta e é causada principalmente por abrasão e “attrition” que é a remoção cíclica de partículas da ferramenta gerada pela aderência com o material da peça e/ou cavaco. Quando o material aderido é arrancado da peça, partículas da ferramenta são levadas junto com este material. Estas partículas também causam desgaste da região da ferramenta que atrita com elas. Por outro lado, o desgaste de cratera pode ocorrer devido a altas temperaturas geradas devido ao atrito entre o cavaco e a ferramenta. Ocorre na superfície de saída da

ferramenta e é causado pelo atrito/aderência entre ferramenta e cavaco. Devido à aderência que ocorre entre cavaco e ferramenta, ocorre cisalhamento na parte de baixo do cavaco (aquela próxima à ferramenta) ocasionando alta temperatura na região.

Com o objetivo de conhecer os limites de cada ferramenta, o tempo de vida útil e determinar as condições de corte (o que pode favorecer a previsão de troca antes de falhar evitando danos e aprimorando as condições de corte) deve-se monitorar os mecanismos de desgaste nas operações de usinagem (ARSECULARATNE et al. 2006; WANG et al. 2008).

O aço AISI 1020 constitui um dos grupos de aços mais produzidos e utilizados na indústria, sendo de extrema importância e relevância estudos técnicos e/ou científicos sobre o processamento e usinagem deste material. Em adição, o metal duro é um material amplamente utilizado para ferramentas de usinagem, onde a demanda destas ferramentas é muito elevada, considerando as mais diversas áreas de aplicação da indústria, especialmente às ligadas ao setor metal mecânico.

Considerando que a usinagem representa um importante meio de produção de bens duráveis, foi avaliado o desempenho de uma ferramenta de corte de metal duro na usinagem do aço AISI 1020 durante operação de torneamento por meio de análise estatística, onde foi apresentado um método alternativo de determinação do desgaste da ferramenta.

2. METODOLOGIA

Para os testes de usinagem, foi utilizado um tarugo cilíndrico de aço AISI 1020 com diâmetro de 75,5 mm e comprimento de 300 mm. O perfil transversal da barra de aço AISI 1020 pode ser visto na figura 1.

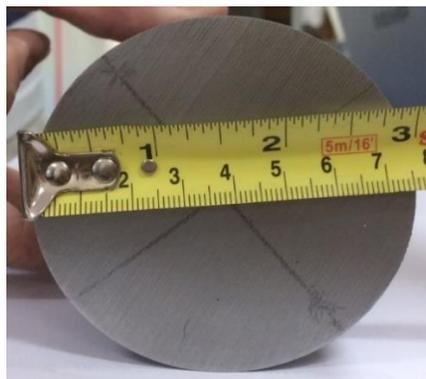


Figura 1: Perfil Transversal da barra de aço AISI 1020.

Foi retirada (corte) uma amostra do tarugo de aço AISI 1020 para análise metalográfica. Após a secagem da amostra, a mesma foi submetida a ataque químico de nital 2% por 5 segundos, limpa com água e levada ao microscópio óptico sob aumento de 100x, afim de determinar a microestrutura do material. Foram realizadas também medidas de dureza Rockwell B no tarugo de aço AISI 1020 (secção longitudinal), objetivando avaliar qualitativamente a usinabilidade do material. Para este teste, foram feitas sete indentações ao longo do comprimento da barra. A pré-carga utilizada foi de 10 kg. O tarugo de aço AISI 1020 foi posicionado horizontalmente entre a base de apoio e o penetrador do durômetro de bancada modelo TH-500, Beijing Time.

Para os testes de desgaste foi utilizado um inserto de metal duro (vide figura 2) tipo DNMG-15-06-08 da marca Weller como ferramenta de corte. O inserto foi posicionado sobre o projetor de perfil (figura 3) para determinar o comprimento total do inserto antes e após o ensaio de verificação de desgaste no torno CNC. O ensaio de desgaste foi realizado a seco e a frio.



Figura 2: Inserto de Metal Duro tipo DNMG-15-06-08 usado como ferramenta de corte neste trabalho.



Figura 3: Projetor de Perfil PJ-A3000 Mitutoyo.

A figura 4 mostra a fixação da barra de aço AISI 1020 na castanha do torno CNC da marca Romi, modelo Centur 35. A ferramenta de corte (inserto), executou movimento longitudinal de acordo com o programa em código G do CNC. Para os testes de usinagem, os parâmetros de corte empregados foram: profundidade de corte de 0,5 mm, avanço de 0,15 mm/rotação e velocidade de corte de 275 m/min. Durante a operação de torneamento o diâmetro do tarugo é rebaixado em 1 mm. Após cada rebaixo foi realizada medição da

rugosidade Ra (rugosidade média aritmética), de acordo com a norma JIS 2001, utilizando o rugosímetro digital padrão Mitutoyo. Além disso, após cada rebaixo, também foi mensurado o diâmetro do tarugo por meio de um micrômetro digital Mitutoyo com sensibilidade de 0,001 mm, e comparado com o valor do diâmetro inserido no programa código G, o qual fornecia também a temperatura em cada passe. A diferença entre o valor medido e indicado no programa do código G (Δx), junto a rugosidade, para cada diâmetro rebaixado, foi transformado em um gráfico para auxiliar a avaliação do desgaste. O diâmetro inicial do tarugo no experimento foi de 74,530 mm e após as operações de torneamento o diâmetro foi rebaixado para 45,570 mm, totalizando um total de 30 passadas. Foi avaliado também o desgaste qualitativo do inserto de metal duro via microscópio óptico da marca Olympus, modelo CX31.

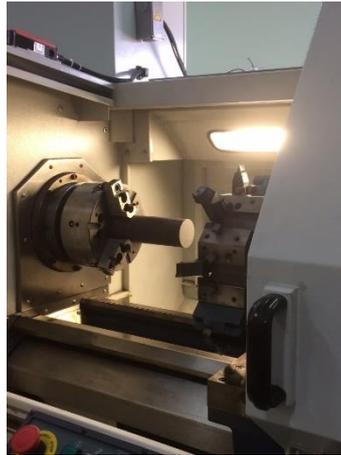


Figura 4: Tarugo de aço AISI 1020 fixado na placa do torno CNC pelas castanhas.

Após os testes de desgaste, foram feitas análises estatísticas. Foi calculado a média e o desvio padrão das medidas de dureza, dos valores da rugosidade média aritmética (Ra) e da diferença entre os diâmetros (Δx), de acordo com as equações 1 e 2.

$$\bar{X} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (1)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{(n - 1)}} \quad (2)$$

Calculou-se o coeficiente de correlação de Pearson (r), para avaliar o nível de correlação linear entre Ra (rugosidade média aritmética) e Δx (diferença entre os diâmetros reais e os indicados pelo programa do torno CNC). O coeficiente de correlação é uma medida da força e direção de uma relação linear entre duas variáveis, e pode ser determinado pela equação 3. Em seguida, foi feito o teste de hipótese para avaliar a significância do coeficiente de correlação (teste t). Para tal, considera-se $n - 2$ graus de liberdade e especifica-se o nível de

significância (α), para então, determinar os valores críticos e as regiões de rejeição. O teste t é dado pela equação 4.

$$r = \frac{n\sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n\sum x^2 - (\sum x)^2} \cdot \sqrt{n\sum y^2 - (\sum y)^2}} \quad (3)$$

$$t = \frac{r}{\sigma_r} = \frac{r}{\sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}} \quad (4)$$

Após a medição do comprimento final (após o torneamento) do inserto de metal duro, utilizou-se distribuição normal padrão, com o objetivo de avaliar a confiabilidade dos resultados. A representação gráfica da distribuição normal é uma curva em forma de sino, simétrica em relação a média, que recebe o nome de curva de Gauss. A área total limitada pela curva e pelo eixo das abscissas é igual a 1 e corresponde à probabilidade de a variável aleatória X assumir qualquer valor real. Assim, pode-se determinar também, a probabilidade de a variável assumir um valor dentro de um determinado intervalo. Uma vez determinado o valor de z (z -score), encontra-se o valor da área correspondente na tabela específica para a determinação da probabilidade. A distribuição normal padrão é dada pela equação 5, onde x é um valor específico, e S é o desvio padrão amostral.

$$z = \frac{x - \bar{X}}{S} \quad (5)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 . Medidas de dureza

Conforme já ressaltado na metodologia, para os testes de dureza, foram realizadas 7 indentações ao longo do eixo longitudinal da barra cilíndrica de aço AISI 1020. Os valores obtidos de dureza podem ser observados na figura 5, e a média e desvio padrão na tabela 1, onde pode-se analisar de uma forma mais qualitativa a evolução do comportamento das medidas.

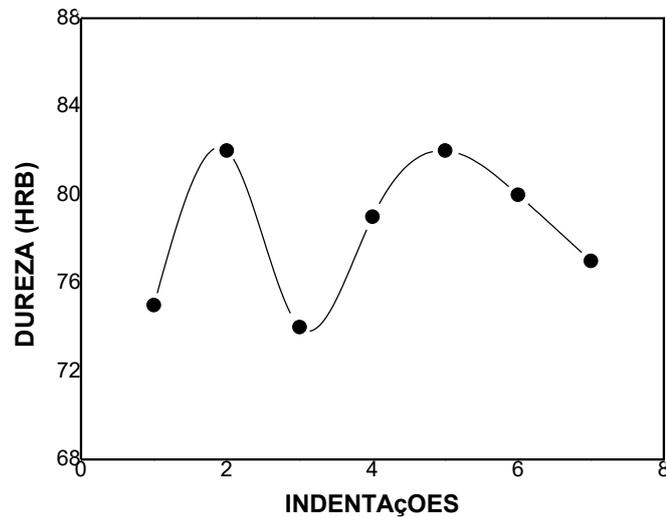


Figura 5: Medidas de dureza HRB em função das indentações.

Tabela 1: Valores de dureza HRB, média e desvio padrão (S)

Medidas	Dureza (HRB)	Média	Desvio Padrão
1	75	78,43	± 3,2
2	82		
3	74		
4	79		
5	82		
6	80		
7	77		

Analisando os resultados apresentados, pode-se notar que não houve variação significativa nos respectivos valores de dureza obtidos após o teste. Isso indica que há pouca dispersão dos valores, bem como um alto nível de significância do valor médio da dureza calculado.

Conforme já verificado na figura 5, obteve-se um valor médio de dureza de aproximadamente 78,43 HRB (Hardness Rockwell B). Segundo ASM Handbook (1990), a dureza média do aço AISI 1020 está em torno de 111 HB (Hardness Brinell), o que corresponde a aproximadamente 66 HRB. Arcelormittal (2016) afirma que o referido material pode apresentar dureza média de 111 HB (laminado) ou de aproximadamente 121 HB (trefilado), sendo este último valor correspondente a aproximadamente 70 HRB, segundo tabela de equivalência do mesmo autor. Essa pequena discrepância nos valores de dureza encontrados, pode ser atribuída entre outros fatores, à diferença de metodologia utilizada nos testes, principalmente nos que se refere às cargas utilizadas e área de indentação. Em adição, as

medidas foram realizadas ao longo do comprimento longitudinal do tarugo, onde havia uma fina camada de óxido superficial, a qual também pode ter colaborado para a variação da dureza. Conforme já descrito, a dureza também pode variar com a forma de processamento do material.

3.2 . Análise Microestrutural (Metalografia)

A metalografia foi realizada para avaliar o aspecto microestrutural do aço AISI 1020. A figura 6 apresentada a micrografia do aço AISI 1020 utilizando microscopia óptica. Pode-se observar, predominantemente duas fases: a fase amarela consiste na matriz de ferrita (seta branca), e conseqüentemente a fase escura constitui a região da perlita (seta vermelha), fases características de um aço de baixo carbono, tal qual o AISI 1020. Cabe ressaltar, que o ataque químico não foi capaz de revelar de maneira consistente a microestrutura granular, não sendo possível identificar de maneira eficiente os grãos da microestrutura.

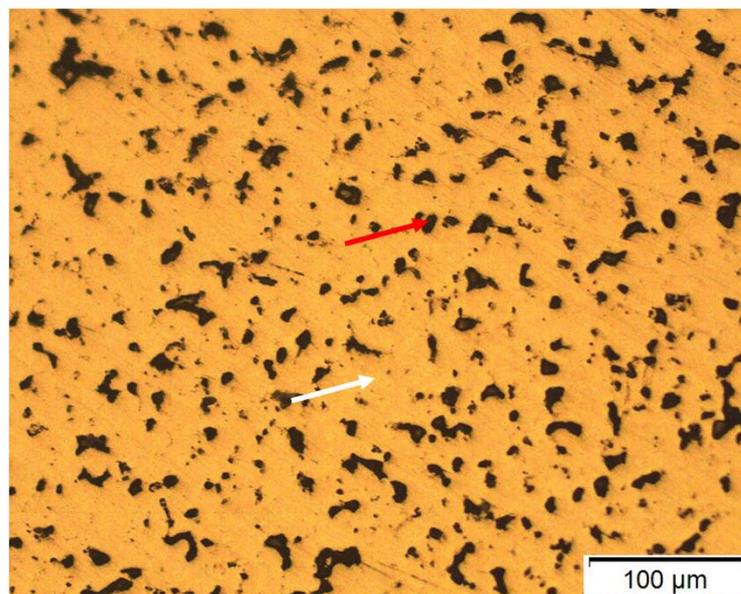


Figura 6: Aspecto microestrutural do aço AISI 1020 (100x).

3.3 . Desgaste da ferramenta de corte do inserto de metal duro

3.3.1. Avaliação da rugosidade média aritmética (R_a) e diferença entre os diâmetros (Δx)

Observando a figura 7, pode-se notar que há um valor inicial alto de rugosidade, da ordem de mais de 3 micrometros. Isso pode ser atribuído, ao fato de a primeira passada (comprimento de usinagem ou tempo de usinagem) ter sido realizada apenas para a remoção da camada de óxido superficial na barra de aço, camada esta, que pode ter sido responsável pela vibração e por conseguinte da rugosidade. A rugosidade média aritmética (R_a) verificada teve um valor médio de aproximadamente $1,782 \mu\text{m}$ e desvio padrão de $\pm 0,59$. Isso mostra que houve uma dispersão significativa dos valores verificados. Em adição, observa-se um

pico de rugosidade acima de 4 micrometros na passada 24, bem acima da média calculada. Este valor pode ser atribuído a um maior trabalho de corte executado pela ferramenta, pois nesta passada, verificou-se a mais alta temperatura (33,7° C), bem como a maior redução de diâmetro ($\Delta x = 0,17$).

O parâmetro Δx apresentou um valor médio de aproximadamente 0,078 mm e desvio padrão de $\pm 0,031$, indicando que houve uma certa dispersão nos valores verificados. Isso pode ser atribuído aos dois picos dos valores de Δx (figura 7) observados nas passadas 11 e 24. A operação de torneamento foi realizada sem fluido de corte, e nesta condição de corte, pode ter gerado alguma vibração no sistema. Conforme já mencionado, verificou-se na passada 24, o maior nível de rugosidade e de temperatura, valendo as mesmas observações mencionadas para a rugosidade.

Para verificar se há correlação linear entre as variáveis, bem como, medir o grau desta correlação, calculou-se o coeficiente de Pearson (r), utilizando a equação 3. Os valores estatísticos para as variáveis estão tabulados na tabela 2.

Observando o diagrama de dispersão da figura 7, nota-se, que trata-se de uma correlação linear positiva, o que foi comprovado pela equação da reta de regressão, que apresentou coeficiente angular positivo +9,61. Segundo Larson (2013), a amplitude do coeficiente de correlação é -1 para 1. Assim, se x e y tem uma correlação linear positiva forte, r deve estar cada vez mais próximo de 1, do contrário, se r está próximo de zero, não há correlação ou a correlação linear é fraca. Assim, o coeficiente de Pearson calculado indica que há correlação entre R_a e Δx , mas, essa correlação pode não ser significativa. Assim, para determinar se há evidência suficiente para avaliar se o coeficiente de correlação é significativo, pode-se realizar um teste de hipótese. Neste caso, realizou-se o chamado teste t (equação 4) para o coeficiente de correlação. Os parâmetros utilizados no teste t estão descritos na tabela 3.

Tabela 2: Média, desvio padrão e coeficiente de Pearson para R_a e Δx

Variáveis	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Pearson (r)
R_a	1,782 μm	$\pm 0,592$	0,51
Δx	0,078 mm	$\pm 0,031$	

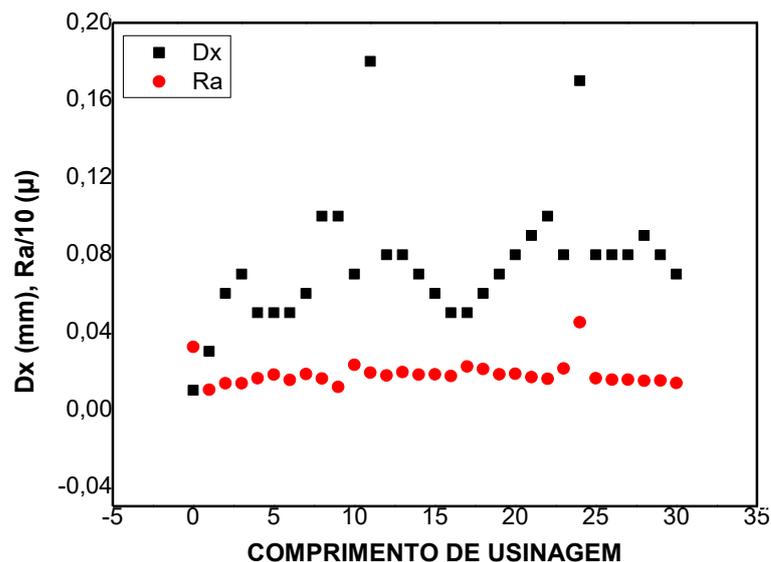


Figura 7: Diferença entre os diâmetros (Δx) e Rugosidade (Ra) para a avaliação do desgaste em operação de torneamento.

Analisando pela estatística de teste padronizada que $t = 3,14$ está na região de rejeição, a hipótese nula deve ser descartada. Desta forma, no nível de significância de 5%, há evidência suficiente para afirmar que há correlação linear significativa entre Ra e Δx , mesmo que o valor de t esteja ligeiramente fora da região de rejeição.

Tabela 3: Parâmetros do teste de hipótese (teste t) para o coeficiente de correlação.

Tipo de Teste	Bicaudal
Graus de Liberdade	$30 - 2 = 28$
Nível de Significância	$\alpha = 0,05$
Valores Críticos	$-t_0 = -2,048$ e $t_0 = 2,048$
Regiões de Rejeição	$t < -2,048$ e $t > 2,048$
Estat. de Teste Padronizada	$t = 3,14$

3.3.2. Avaliação do desgaste do inserto de metal duro

O inserto de metal duro escolhido (o metal duro tem dureza entre 75 e 95 HRA) tem especificação DNMG 15-06-08, na qual segundo o fabricante, é a primeira escolha para a usinagem média de aços carbono. O perfil do inserto (pastilha), tem comprimento efetivo da aresta de corte (l) de 15,50 mm, raio de canto (r) 0,80 mm, espessura (S) de 6,35 mm, diâmetro externo (d) 12,70 mm, diâmetro interno (d_1) 5,16 mm e peso de aproximadamente 15 gramas.

Antes do início das operações de usinagem, mediu-se o comprimento total do inserto de metal duro (maior aresta) via análise de imagem no projetor de perfil. Mediu-se também o comprimento total do inserto (valor médio de 10 medidas) utilizando um micrômetro de

precisão 0,001 mm para contrastar com as medidas do projetor de perfil. Desta forma, repetiu-se as medições do comprimento total do inserto após o torneamento do aço AISI 1020. As dimensões do inserto são mostradas na tabela 4.

Tabela 4: Dimensões do inserto de metal duro antes e após a usinagem

	Projetor de Perfil (mm)	Micrômetro (mm)
Comprimento Inicial (L_0)	25,685	25,700
Comprimento Final (L_f)	25,670	25,679
$\Delta L (L_0 - L_f)$	0,015	0,021

Observando os dados da tabela 3 pode-se notar, que há uma pequena discrepância entre os valores obtidos pela análise de imagem do projetor de perfil e os medidos via micrômetro. Para analisar estatisticamente as medidas, tomou-se como base os comprimentos finais do inserto e definiu-se um intervalo entre as medidas, ou seja, entre 25,670 mm e 25,679 mm, e em seguida calculou-se a probabilidade da variável assumir um valor dentro desse intervalo. Isso foi feito via distribuição normal (z-score) padronizada. Os dados utilizados para o cálculo do z-score foram: comprimento final medido no projetor de perfil igual a 25,670, comprimento final médio de 25,679 obtido via micrômetro com desvio padrão de 0,004928. Os resultados mostraram que a probabilidade de o comprimento final do inserto (L_f) estar entre o valor verificado via projetor de perfil e o valor médio obtido no micrômetro é de aproximadamente 96%.

Analisando quantitativamente o desgaste da ferramenta através dos valores de ΔL mostrados na tabela 3, nota-se que o desgaste do inserto de metal duro foi em média de apenas 18 μm (0,018 mm considerando as medidas do projetor de perfil e do micrômetro). Isso indica, que o desgaste foi relativamente pequeno, uma vez que o metal duro é um material muito duro e conseqüentemente, o material usinado nos testes (aço AISI 1020), é um aço de baixo carbono de baixa dureza.

Os critérios de vida útil da ferramenta de metal duro segundo norma ISO 3685 (1993), foram apresentados no trabalho de Peçanha Júnior (2014), e estabelece para um desgaste de flanco médio, um fim de vida útil $VB = 0,3$ mm. Desta forma, conclui-se que o nível de desgaste verificado neste trabalho, não influenciou significativamente a vida útil do inserto de metal duro. Isso já era de se esperar, pois além da alta dureza do inserto de metal duro, foram executadas apenas 30 passadas nos testes de torneamento.

O aspecto qualitativo do desgaste da ferramenta também foi analisado. Observando a figura 8 que mostra a ponta (vista superior a aresta de corte) da ferramenta de metal duro, pode-se notar que pode ter havido um deslocamento do revestimento do inserto (seta

branca), o que pode ter originado desgaste por cratera. O desgaste por cratera pode estar associado ao aumento de temperatura oriundo do atrito entre o cavaco e a face da ferramenta. Essa caracterização superficial gerada, promoveu remoção de parte do revestimento da ferramenta, mostrando as severas condições de corte durante os testes de usinagem. Pode-se observar também, que pode ter ocorrido desgaste de flanco (seta preta) bem na ponta da ferramenta, uma vez que não é possível analisar a superfície de folga de forma mais detalhada na figura 8.

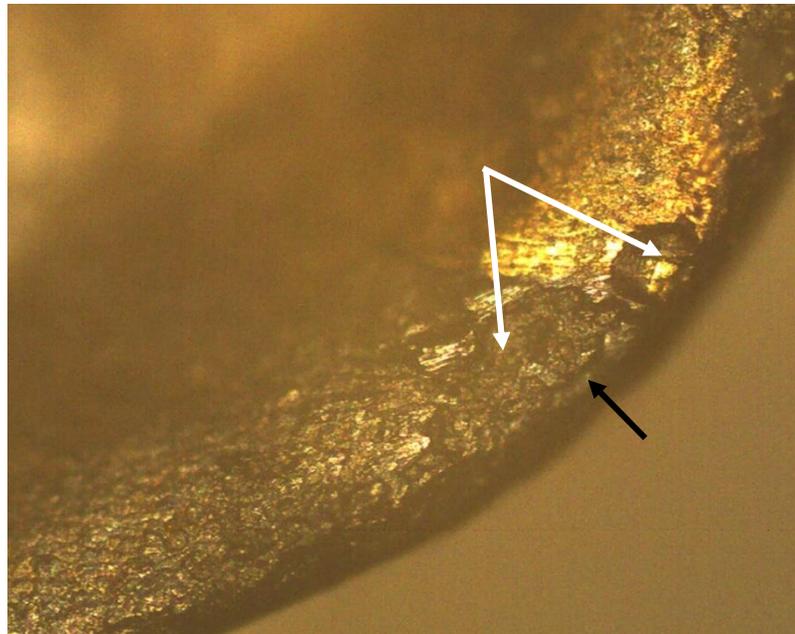


Figura 8: Desgaste por cratera (seta branca) e de flanco (seta preta) no inserto de metal duro após torneamento (400x).

5. CONCLUSÕES

São apresentadas abaixo, algumas conclusões deste trabalho.

Os valores de dureza obtidos não apresentaram variação significativa, o que indica um alto nível de significância do valor calculado.

O teste t indica que há evidência suficiente para concluir que há correlação significativa entre R_a e Δx . Entretanto, o valor de r calculado de 0,51 não está tão próximo de 1. Assim, novas investigações deverão ser realizadas.

Em relação a avaliação qualitativa do desgaste verificou-se que pode ter ocorrido desgaste por cratera e desgaste por flanco.

O desgaste médio de 18 μm apresentado pelo inserto de metal duro, está bem abaixo do valor considerado pelo critério de vida útil da ferramenta, levando-se em consideração que foram executadas 30 passadas.

Os testes estatísticos utilizados neste trabalho, mostraram que a forma de determinação do desgaste adotado, pode ser um método alternativo de avaliação, considerando que se analisa a significância dos valores assumidos pelas variáveis.

6. REFERÊNCIAS

ARCELORMITTAL. **Guia do Aço**. Arcelormittal do Brasil, 2016.

ARSECULARATNE, J.A., ZHANG, L.C., MONTROSS, C. Wear and tool life of tungsten carbide, PCBN and PCD cutting tools. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 46, p. 482–491, 2006. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.07.015

ASM HANDBOOK. **Properties and Selection: Iron, Steels, and High- Performance Alloys**. v.1, 1990.

COELHO, R. D. N.; BRITO, R. F.; SILVA, S. M. M. L. **Análise térmica de processos de usinagem variando os tipos de revestimentos da ferramenta de corte**. v.9, n.1, 2019.

DINIZ, A. S.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 5.ed. São Paulo: Artliber Editora, 2010.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 8.ed. São Paulo, Edgard Blücher Ltda, 2013.

HUANG, Y., CHOU, Y. K., LIANG, S. Y. cBN tool wear in hard turning: a survey on research progresses. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 35, n. 5, p. 443-453, 2007. DOI: 10.1007/s00170-006-0737-6

PEÇANHA JÚNIOR, L. A. F. **Sinterização de compósitos TiB₂-AlN via plasma pulsado aplicado a ferramenta de corte**. 2014. Tese (Doutorado) – Laboratório de Materiais Avançados, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2014.

LARSON, R. **Estatística Aplicada**. 4ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil Ltda, 2013.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos materiais**. 2.ed. São Paulo: edgard Blucher, 2011.

SUYAMA, D. I. **Uma contribuição ao estudo do torneamento interno em aços endurecidos**. 2014. 119p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

TOLOCZKO, F. R., GONÇALVES, M. C., BARALDI, E. C. Seleção de metodologias de ensino para processos de usinagem, baseada em programas de graduação brasileiros e estrangeiros. **Revista de Ensino de Engenharia**, v. 39, p.108-109, 2019. DOI: 10.5935/2236-0158.20190026

WANG, X., WANG, W., NGUWEN, N., KRISHNAKUMAR, K. Design of neural network-based estimator for tool wear modeling in hard turning. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 19, p. 383–396, 2008. DOI: 10.1007/s10845-008-0090-8

WOSNIAK, F.A. **Análise do Processo de Furação Profunda no Aço AISI 4150**. 2011. 142p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.