

AVALIAÇÃO DO DESGASTE DE FERRAMENTA DE USINAGEM DURANTE O PROCESSO DE TORNEAMENTO

Bruno Pacheco Pizza

Adalto de Farias

Marcelo Otávio dos Santos

Vanessa Seriacopi

Instituto Mauá de Tecnologia – Praça Mauá, 01 – Bairro Mauá – São Caetano do Sul/SP – 09050-080

adalto.farias@maua.br

marcelo.santos@maua.br

vanessa.seriacopi@maua.br

Gilmar Ferreira Batalha

Escola Politécnica da USP - Av. Prof. Luciano Gualberto, 380 - Butantã, São Paulo/SP - 05508-010

gfbatalh@usp.br

Ed Claudio Bordinassi

Instituto Mauá de Tecnologia – Praça Mauá, 01 – Bairro Mauá – São Caetano do Sul/SP – 09050-080

ecb@maua.br

Resumo: O objetivo deste trabalho foi estudar o uso de conceitos de aprendizado de máquina para avaliar os efeitos do desgaste em insertos de usinagem e na força de corte, medida e monitorada em tempo real. Para isso, foram criados métodos de coleta e tratamento de dados visando correlacionar o desgaste diretamente a força de corte, utilizando modelos estatísticos de análise de variância (ANOVA) e regressão. Um método de desgaste artificial utilizando um disco de corte diamantado foi empregado para gerar um pequeno desgaste nas arestas de pastilhas novas, que então foram utilizadas nos corpos de prova do material ABNT P20 (similar DIN 35CrMo4), variando o tempo de usinagem em cada uma das arestas, tendo em vista obter uma faixa de resultados abrangente. Foram geradas previsões das forças de corte, utilizando o modelo de regressão obtido, e esses valores foram comparados aos dados originais da força de corte. O modelo obteve erro médio de 6,3% com desvio padrão de 10,9%, mostrando que o desgaste tem efeito significativo na força de corte. Como foco secundário, também foi estudado o efeito do desgaste na qualidade superficial de peças torneadas, e como esperado, os valores de uma pastilha nova seguem mais próximos aos teóricos e divergem dos valores das pastilhas desgastadas. Com base nos resultados obtidos nesse estudo, foi possível estabelecer uma relação entre desgaste e forças de corte, gerando um modelo que pode ser utilizado na criação de um algoritmo de monitoramento do desgaste em tempo real se adjunto de demais fatores simultaneamente monitorados. Além disso, as análises feitas possibilitaram confirmar a existência do impacto causado pelo desgaste na qualidade superficial das peças, que aumentaram à medida que o desgaste progrediu.

Palavras-chave: Desgaste; Esforços de usinagem; Torneamento

1. INTRODUÇÃO

A usinagem é um dos métodos de manufatura mais utilizados quando se trata de metais. Com o avanço da tecnologia e da indústria 4.0, esse processo tem sido cada vez mais otimizado. O torneamento, que é um processo de usinagem, consiste em rotacionar o material a ser trabalhado e movimentar as ferramentas de corte de maneira a remover pequenas quantidades da peça inicial até ser obtida a geometria desejada. Este processo é aplicado, em grande parte, quando se deseja manufaturar peças simétricas de geometria circular. Para tais operações, uma pequena pastilha de metal duro, por exemplo, pode ser utilizada para desbastar metais de dureza inferior a ela (KHAYAL, 2019).

O desgaste das pastilhas de corte é um processo natural que decorre do processo de usinagem. Existem diversos fatores que alteram a velocidade com que ele acontece, como por exemplo, a quebra ou o desgaste excessivo da ferramenta, que levam à perda de tempo e ineficiência no processo de manufatura, visto que tal falha pode danificar peças sendo produzidas, como as tolerâncias geométricas, integridade superficial e até mesmo o próprio equipamento, levando à intervenção total do processo (GARCÍA-ORDAS et al., 2016). A avaliação da condição de desgaste em uma ferramenta de usinagem, durante o processo de fabricação, não é uma tarefa simples. Em geral, é executada pelo operador da máquina, que, por sua vez, deve possuir um bom treinamento para avaliar uma região que possui no máximo 0,6 mm de extensão na aresta da ferramenta, sendo assim, não é fácil caracterizar corretamente a extensão precisa do desgaste. Logo, a previsão e o monitoramento desse desgaste são pontos críticos para maior eficiência e diminuição de custos na manufatura.

Segundo Zhaojun et al. (2018), é possível correlacionar dados de força de corte (F_c) diretamente ao desgaste presente na ferramenta, porém diversos fatores a influenciam. A área de material removido na forma de cavaco, determinado pela

profundidade de corte (a_p) e pelo avanço (f_n) são fatores que determinam o esforço de corte (MACHADO et al., 2018). A velocidade de corte (v_c) também tem influência nos esforços e afeta grandemente o desgaste em função dos valores adotados. Sendo assim, ambos se mostraram predominantes em relação ao desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmáx}$).

A norma ISO 3685 define desgaste como a “mudança de sua forma original durante o corte, resultante da perda gradual de material”. (ISO 3685, 1993). O tipo mais comum e previsível é o desgaste de flanco, o qual consiste na perda de material da superfície de folga da ferramenta. Esse fenômeno decorre, geralmente, da abrasão, que ocorre quando o material é removido ou deslocado da superfície por partículas duras que podem estar soltas entre duas superfícies, denominada abrasão de três corpos, ou que pertencem a uma das superfícies, denominada abrasão de dois corpos. (HUTCHINGS, 1992)

Para manter um padrão de testes e segurança na indústria, foi estabelecido nesta norma um padrão de desgaste de flanco médio de 0,3 mm e máximo de 0,6 mm em ferramentas de corte.

O objetivo desse trabalho focou no estudo dos efeitos do desgaste na ferramenta nas forças de corte. Também foi avaliada a variação da rugosidade em função do desgaste.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A Tabela 1 mostra a nomenclatura utilizada para as variáveis do trabalho.

Tabela 1. Nomenclatura utilizada no trabalho

Descrição	Variável
Avanço	f_n
Desvio Padrão	Dp
Desgaste de flanco máximo	$VB_{Bmáx}$
Desgaste de flanco médio	VB_B
Força de corte	F_c
Profundidade de corte	a_p
Rugosidade média	R_a
Raio da ponta da pastilha	r_ϵ

Para avaliar o efeito do desgaste nas forças de corte, foram coletados dados de experimentos com pastilhas novas e já desgastadas. Foram utilizadas pastilhas do fabricante Sandvik Coromant modelo: DCMT 11T308-PM e suporte de ferramenta: SDNCN 2525 M11.

Foi estabelecido um método de desgaste artificial: utilizando um disco de corte, foi feito um pequeno desgaste em 6 arestas de pastilhas novas (Figura 2), por volta de 0,3 mm (V_B) que então foram utilizadas na usinagem de corpo de prova de aço ABNT P20, em um torno convencional ROMI I30, variando o tempo de usinagem em cada uma das pontas, tendo em vista obter uma faixa de resultados abrangente. Foram realizados ensaios com 8 arestas (duas em estado novo e seis com desgastes induzidos) em cinco condições distintas de avanço e a_p (Tab. 2), a rotação foi mantida constante em todos os ensaios.

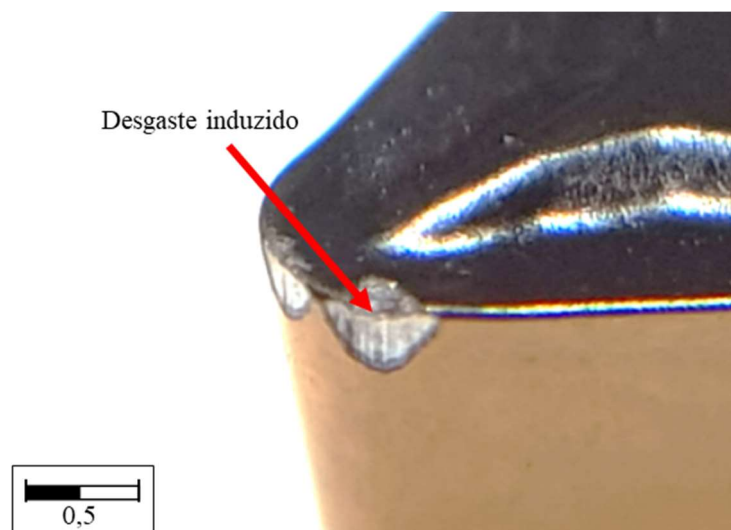


Figura 2. Desgaste artificial induzido na ponta da pastilha de corte.

Nesse trabalho, foi medida apenas a força de corte (F_c), que pode ser observada na Fig. 3, utilizando strain gages colados no suporte da ferramenta e calibrados previamente. Os dados foram aquisitados e gravados utilizando um módulo de aquisição QuantumX MX840B da HBM com o software “CatmanEasy”.

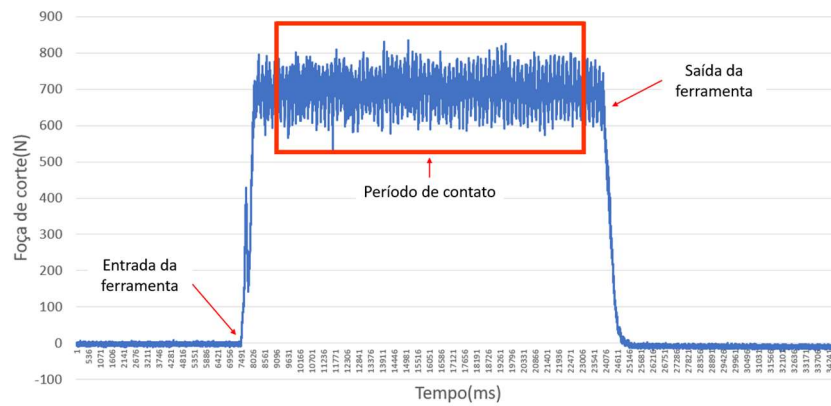


Figura 3. Exemplo de sinal coletado durante usinagem.

Foram estabelecidas 5 condições de ensaios (Tab. 2) para cada uma das 8 arestas empregadas, onde foram alterados o avanço (f_n) e a profundidade de corte (a_p). Em cada ensaio, os esforços foram medidos ao longo de um trecho de aproximadamente 30 mm no corpo de provas, demarcado por canais, que também tem o propósito de criar um espaço livre de contato com a pastilha, para que o torno possa acelerar e desacelerar sem causar alterações no desgaste, e monitoramento para que as configurações de profundidade possam ser alteradas entre cada ensaio.

Tabela 2. Configurações dos ensaios.

Ensaio	f_n (mm/rotação)	a_p (mm)	Rotação (RPM)
1	0,338	1	1600
2	0,338	0,5	1600
3	0,229	0,75	1600
4	0,104	1	1600
5	0,104	0,5	1600

Foram realizados ensaios com 8 arestas, duas em estado novo e seis com desgastes induzidos, gerando 40 linhas de dados.

Para medição do desgaste nas arestas, foi estabelecido um método de aquisição de imagem (método direto), de modo a permitir ser repetido, utilizando uma câmera DSLR juntamente com uma lente específica para imagens microscópicas. Em seguida, o software de manipulação de imagens Adobe Photoshop foi utilizado para aproximar o desgaste médio e máximo na aresta da ferramenta (Fig. 4), a partir da medida conhecida da espessura da pastilha (4,07mm), foi ajustada a escala, a fim de aferir um valor aproximado do $VB_{máx}$, conforme Fig. 4.

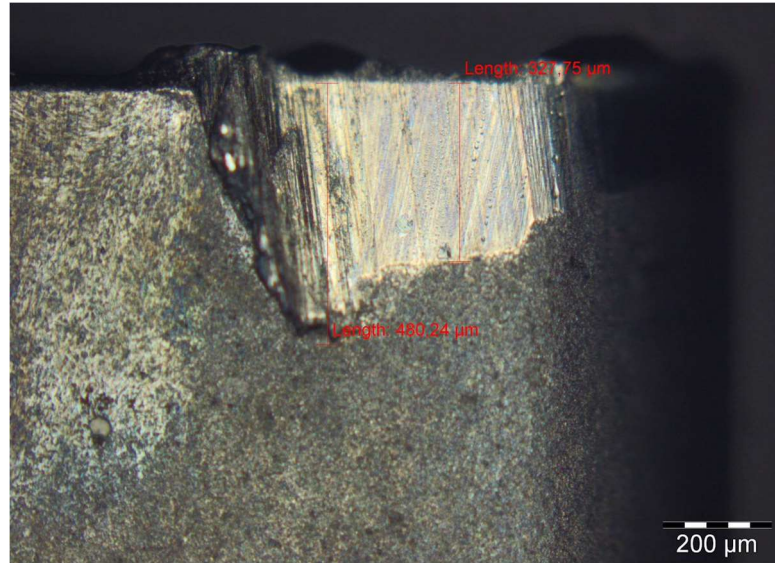


Figura 4. Exemplo de medição de desgaste efetuado na aresta F com $VB_{m\acute{a}x}=0,48\text{mm}$.

O rugosímetro Mitutoyo SJ201 (Fig. 5) foi utilizado para as medições de rugosidade. O parâmetro utilizado foi o R_a , empregando um cut-off de 0,8mm, visando verificar o impacto do desgaste na superfície da peça. Foram aferidas medições em 3 ensaios, sendo em dois deles com a pastilha em condição desgastada e no outro, em condição nova. Foram feitas 4 medições por trecho para garantir um resultado mais consistente e em seguida estes valores foram comparados aos valores teóricos, obtidos pela Eq. 1.

$$R_a = \frac{f_n^2}{31,2 \times r_\epsilon} \quad (1)$$



Figura 5. Medição de rugosidade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tab. 3 mostra os valores encontrados para as medições de desgaste dos inserts, cada aresta foi denominada com uma letra para facilitar a identificação do ensaio.

Tabela 3. Valores de desgaste encontrados após os ensaios por aresta.

Aresta	$VB_{Bm\acute{a}x}(\text{mm})$	Pastilha	$VB_{Bm\acute{a}x}(\text{mm})$
A	0,60	D	0,44
B	0,67	E	0,57
C	0,45	F	0,48

A Tab. 4 mostra os valores para as medições de rugosidade efetuadas. A partir dos valores da Tab. 3 foi gerada a Fig. 6, no qual é possível observar que, como esperado, os valores teóricos seguem mais próximos aos de uma pastilha nova e divergem dos valores das pastilhas desgastadas.

Tabela 4. Resultados de rugosidade Ra obtidos nos ensaios

Linha	Run	Aresta	$a_p(mm)$	$f_n(mm/rotação)$	$VB_{Bmáx}(mm)$	Ra (μm)	Ra _{teórico} (μm)
1	1	Nova 1	1	0,338	0	4,38	4,58
2	2	Nova 1	0,5	0,338	0	4,92	4,58
3	3	Nova 1	0,75	0,229	0	2,26	2,10
4	4	Nova 1	1	0,104	0	0,66	0,43
5	5	Nova 1	0,5	0,104	0	0,94	0,43
6	1	A	1	0,338	0,6	2,2	4,58
7	2	A	0,5	0,338	0,6	0,97	4,58
8	3	A	0,75	0,229	0,6	2,22	2,10
9	4	A	1	0,104	0,6	2,75	0,43
10	5	A	0,5	0,104	0,6	1,17	0,43
11	1	B	1	0,338	0,67	2,35	4,58
12	2	B	0,5	0,338	0,67	1,07	4,58
13	3	B	0,75	0,229	0,67	2,05	2,10
14	4	B	1	0,104	0,67	4,25	0,43
15	5	B	0,5	0,104	0,67	2,99	0,43
16	1	C	1	0,338	0,45	1,84	4,58
17	2	C	0,5	0,338	0,45	3,4	4,58
18	3	C	0,75	0,229	0,45	1,84	2,10
19	4	C	1	0,104	0,45	1,74	0,43
20	5	C	0,5	0,104	0,45	1,62	0,43
21	1	D	1	0,338	0,44	3,91	4,58
22	2	D	0,5	0,338	0,44	6,05	4,58
23	3	D	0,75	0,229	0,44	2,1	2,10
24	4	D	1	0,104	0,44	1,61	0,43
25	5	D	0,5	0,104	0,44	1,65	0,43
26	1	E	1	0,338	0,57	1,43	4,58
27	2	E	0,5	0,338	0,57	2,64	4,58
28	3	E	0,75	0,229	0,57	2,39	2,10
29	4	E	1	0,104	0,57	1,6	0,43
30	5	E	0,5	0,104	0,57	1,74	0,43
31	1	F	1	0,338	0,48	2,23	4,58
32	2	F	0,5	0,338	0,48	1,22	4,58
33	3	F	0,75	0,229	0,48	2,17	2,10
34	4	F	1	0,104	0,48	4,32	0,43
35	5	F	0,5	0,104	0,48	3,51	0,43
36	1	Nova 2	1	0,338	0	4,41	4,58
37	2	Nova 2	0,5	0,338	0	5,06	4,58
38	3	Nova 2	0,75	0,229	0	2,25	2,10
39	4	Nova 2	1	0,104	0	0,68	0,43
40	5	Nova 2	0,5	0,104	0	1,03	0,43

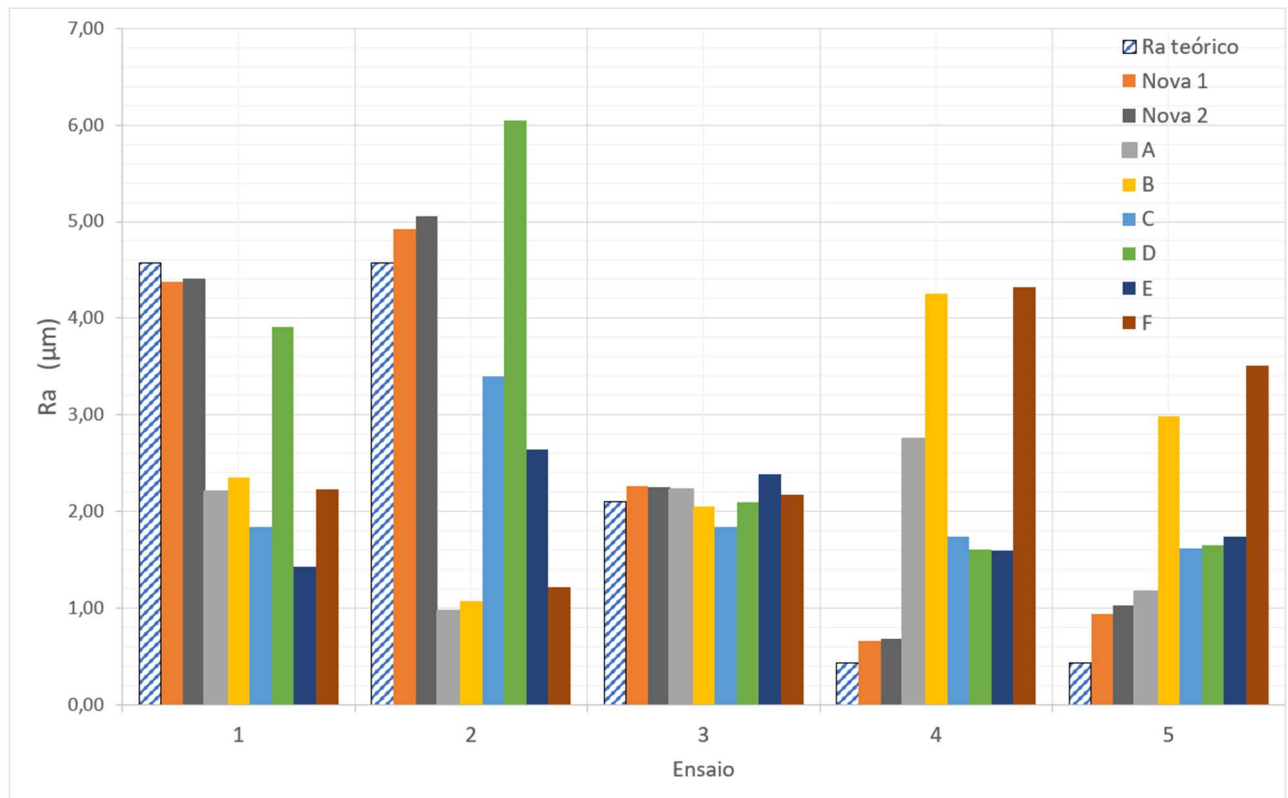


Figura 6. Comparação dos valores teóricos de rugosidade vs. medidos.

O método análise de variância é uma ferramenta estatística que parte da comparação entre a variância das médias entre os grupos e das médias dentro dos grupos, a fim de determinar se os grupos são todos parte de uma população maior ou populações distintas com características diferentes. A partir disso, pode-se obter a relevância de diferentes fatores e da combinação deles no estudo de um processo. Esse método é muito utilizado no gerenciamento de melhorias contínuas, e é de grande utilidade para esse projeto, pois possibilita analisar a influência do desgaste das pontas de ferramenta na força de corte medida, e compará-la a outros fatores como o avanço e profundidade de corte. (WATKINS, 2016)

Para realizar o estudo, foi utilizado o software de análise estatística Minitab. Nele foram escolhidos os fatores independentes a_p , f_n e $V_{B\text{máx}}$ e a resposta F_c , em seguida foi feita uma análise de experimento de superfície de resposta.

As Figuras 7 e 8 mostram os gráficos de Pareto para a força de corte. Na Figura 7 observa-se que, como visto na teoria, o avanço e a profundidade de corte exercem maior influência na força de corte em relação ao desgaste que também tem influência significativa, visto que seus valores cruzam a linha de referência que está em 2,04. Estes fatores são estatisticamente significativos ao nível 0,05 com os termos do modelo atual. Além disso, o modelo obteve R^2 de 98,91%, verificando bom ajuste à base de dados.

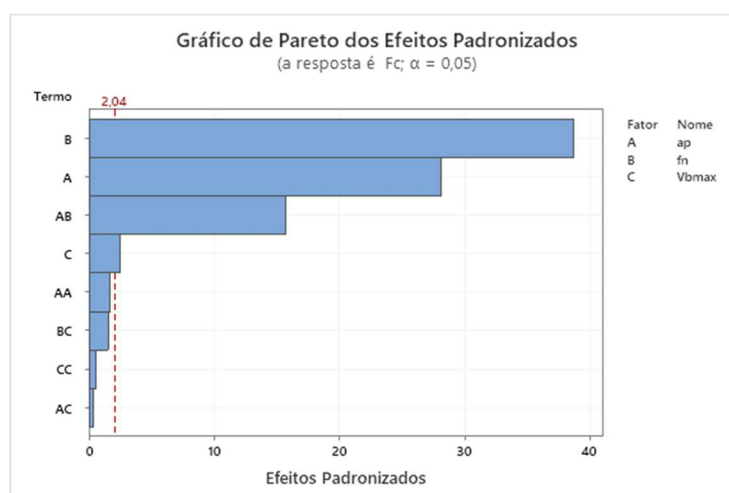


Figura 7. Digrama de Pareto para a força de corte

A Figura 8 mostra os gráficos de efeitos principais para a Força de Corte com relação aos demais parâmetros (a_p , f_n e $V_{Bmáx}$), observa-se uma relação diretamente proporcional da Força de Corte com a_p e f_n e que há uma atenuada relação inversamente proporcional entre o $V_{Bmáx}$ e a Força de Corte, à medida que há um maior desgaste de flanco máximo, o mecanismo de formação do cavaco se altera devido ao maior atrito da superfície de flanco desgastada, que pode induzir um ligeiro aumento de temperatura refletindo em uma menor força de corte.

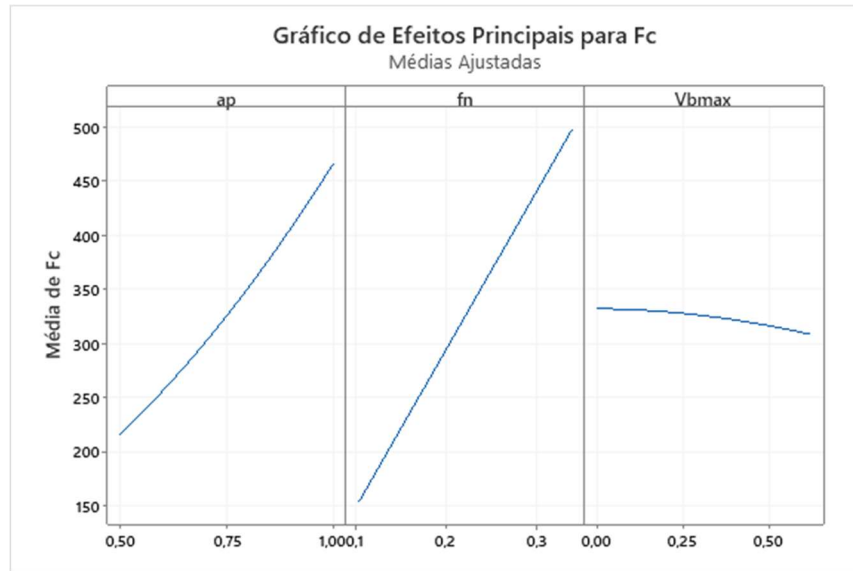


Figura 8. Efeitos principais para a Força de Corte

A partir da análise de variância, foi gerada a equação de regressão do modelo da força de corte (Equação 2), que é utilizada para descrever a relação entre a resposta e os termos no modelo. A Tabela 4 mostra todos os resultados utilizados para a geração do modelo.

$$F_{c_{mod}} = 122,6 - 363a_p - 141f_n + 66,9VB_{Bmáx} + 251a_p^2 - 57VB_{Bmáx}^2 + 2243a_p \times f_n - 27,7a_p \times VB_{Bmáx} - 224f_n \times VB_{Bmáx} \quad (2)$$

Tabela 4. Dados e resultados do modelo de força de corte

Linha	Ensaio	Aresta	a_p (mm)	f_n (mm/rotação)	$VB_{Bmáx}$ (mm)	F_c (N)	$F_{c_{mod}}$ (N)	Erro
1	1	Nova 1	1	0,338	0	709,561	721,076	1,60%
2	2	Nova 1	0,5	0,338	0	320,691	335,259	4,35%
3	3	Nova 1	0,75	0,229	0	345,868	344,484	-0,40%
4	4	Nova 1	1	0,104	0	236,422	229,208	-3,15%
5	5	Nova 1	0,5	0,104	0	110,807	105,822	-4,71%
6	1	A	1	0,338	0,6	699,409	676,528	-3,38%
7	2	A	0,5	0,338	0,6	291,492	299,298	2,61%
8	3	A	0,75	0,229	0,6	316,722	319,367	0,83%
9	4	A	1	0,104	0,6	234,32	217,158	-7,90%
10	5	A	0,5	0,104	0,6	145,767	102,359	-42,41%
11	1	B	1	0,338	0,67	614,357	676,528	9,19%
12	2	B	0,5	0,338	0,67	248,172	299,298	17,08%

13	3	B	0,75	0,229	0,67	300,795	319,367	5,82%
14	4	B	1	0,104	0,67	203,82	217,158	6,14%
15	5	B	0,5	0,104	0,67	64,404	102,359	37,08%
16	1	C	1	0,338	0,45	686,476	693,103	0,96%
17	2	C	0,5	0,338	0,45	316,657	313,519	-1,00%
18	3	C	0,75	0,229	0,45	339,2	330,614	-2,60%
19	4	C	1	0,104	0,45	221,485	224,822	1,48%
20	5	C	0,5	0,104	0,45	104,361	107,669	3,07%
21	1	D	1	0,338	0,44	699,386	693,103	-0,91%
22	2	D	0,5	0,338	0,44	332,226	313,519	-5,97%
23	3	D	0,75	0,229	0,44	331,992	330,614	-0,42%
24	4	D	1	0,104	0,44	224,517	224,822	0,14%
25	5	D	0,5	0,104	0,44	98,388	107,669	8,62%
26	1	E	1	0,338	0,57	704,682	676,528	-4,16%
27	2	E	0,5	0,338	0,57	354,166	299,298	-18,33%
28	3	E	0,75	0,229	0,57	336,319	319,367	-5,31%
29	4	E	1	0,104	0,57	221,08	217,158	-1,81%
30	5	E	0,5	0,104	0,57	110,602	102,359	-8,05%
31	1	F	1	0,338	0,48	705,157	693,103	-1,74%
32	2	F	0,5	0,338	0,48	300,965	313,519	4,00%
33	3	F	0,75	0,229	0,48	330,846	330,614	-0,07%
34	4	F	1	0,104	0,48	220,952	224,822	1,72%
35	5	F	0,5	0,104	0,48	97,391	107,669	9,55%
36	1	Nova 2	1	0,338	0	732,75	693,103	-5,72%
37	2	Nova 2	0,5	0,338	0	345,487	313,519	-10,20%
38	3	Nova 2	0,75	0,229	0	337,598	344,484	2,00%
39	4	Nova 2	1	0,104	0	221,979	229,208	3,15%
40	5	Nova 2	0,5	0,104	0	110,205	105,822	-4,14%

O modelo obteve erro médio de 6,3% e desvio padrão de 10,9% de forma a mostrar que o desgaste tem efeito significativamente constante na força de corte.

Dentre esses resultados, 2 apresentaram erro significativamente superior do normal, de -42,41% e 37,08%, ambos ocorreram durante o último ensaio das arestas A e B respectivamente. Sendo este o último teste, o desgaste na pastilha é máximo e a ponta já apresenta demasiada deterioração, ao ponto de danificar as geometrias de formação de cavaco na superfície da ferramenta, levando a formação muito irregular de cavacos e desgaste da pastilha.

4. CONCLUSÕES

Com base nos estudos realizados nesse projeto, foi possível estabelecer uma relação entre desgaste e força de corte. Utilizando o método de medição da força de corte apresentado, pode-se estabelecer esta relação e modelar o fenômeno. Dessa forma, foi gerado um modelo que pode ser utilizado na criação de um algoritmo de monitoramento do desgaste em tempo real se adjunto aos demais fatores simultaneamente monitorados. Além disso, as análises feitas possibilitaram confirmar o impacto causado pelo desgaste na qualidade superficial das peças.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Mauá de Tecnologia pelo patrocínio do trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Garcia-Ordas, M., Alegrei, E., Gonzáles-Castro, V., Alaiz-Rodríguez, R., 2016. *A computer vision approach to analyze and classify tool wear level in milling processes using shape descriptors and machine learning techniques*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-016-9541-0>.
- Hutchings, I.M., 1992. *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. London.
- ISO 3685, 1993. *Tool-life testing with single-point turning tools*.
- Khayal, O.M.E.S., 2019. *Literature review on turning operations*.
- Machado, A.R., Abrão, A.M., Coelho, T., Silva, B., 2018. *Teoria da usinagem dos materiais*. 3. ed., Blucher.
- Watkins, J.C., 2016. *An Introduction to the Science of Statistics: From Theory to Implementation*.
- Zhaojun, R.; Shengguan, Q.; Yalong, Z.; Xiaoqiang, L.; Chao, Y., 2018. Machining Performance of TiAlN-Coated Cemented Carbide Tools with Chip Groove in Machining Titanium Alloy Ti-6Al-0.6Cr-0.4Fe-0.4Si-0.01B, Metals. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-4701/8/10/850>.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

EVALUATION OF TOOL WEAR CONDITION DURING THE TURNING PROCESS

Adalto de Farias

Marcelo Otávio dos Santos

Vanessa Seriacopi

Instituto Mauá de Tecnologia – Praça Mauá, 01 – Bairro Mauá – São Caetano do Sul/SP – 09050-080

adalto.farias@maua.br

marcelo.santos@maua.br

vanessa.seriacopi@maua.br

Gilmar Ferreira Batalha

Escola Politécnica da USP - Av. Prof. Luciano Gualberto, 380 - Butantã, São Paulo/SP - 05508-010

gfbatalh@usp.br

Éd Claudio Bordinassi

Instituto Mauá de Tecnologia – Praça Mauá, 01 – Bairro Mauá – São Caetano do Sul/SP – 09050-080

ecb@maua.br

Abstract. *The aim of this study was to study the use of machine learning concepts to evaluate the effects of wear, on machining inserts and on cutting forces, measured and monitored in real time. Methods were created to collect and process data in order to directly correlate the wear to the cutting force, using statistical models of analysis of variance ANOVA and regression. An artificial wear method using an abrasive diamond cutting was used to generate a small wear on the edges of new inserts, which were used in a test body made of ABNT P20 material (similar to DIN 35CrMo4), varying the machining time in each of the edges, in order to obtain a comprehensive range of results. Predictions of the cutting forces were generated, using the obtained regression model, and these values were compared to the original data of the cutting force. The model obtained a mean error of 6.3% with a standard deviation of 10.9%, showing that wear has a significant effect on the cutting force. As a secondary focus, the effect of wear on the surface quality of turned parts was also studied, and as expected, the theoretical values are closer to those of a new insert and diverge from the values of worn inserts. Based on the results carried out in this study, it was possible to establish a relationship between wear and cutting forces, generating a model that can be used to create a real-time wear monitoring algorithm in conjunction with other simultaneously monitored factors. In addition, the analyzes carried out made it possible to confirm the existence of the impact caused by wear on the surface quality of the parts, which increased as the wear progressed.*

Keywords: *Wear; Cutting forces; Turning*

RESPONSIBILITY NOTICE

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