

# AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE DESGASTE DA FERRAMENTA DE USINAGEM DURANTE O PROCESSO DE FABRICAÇÃO UTILIZANDO APRENDIZADO DE MÁQUINA (MACHINE LEARNING)

Bruno Pacheco Pizza<sup>1</sup>; Adalto de Farias<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

<sup>2</sup> Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

**Resumo.** *Este projeto propõe o uso da tecnologia presente nos conceitos da Indústria 4.0 para avaliar os efeitos do desgaste, em ferramentas de usinagem, na força de corte, que pode ser 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 e regressão. Como foco secundário, também foi estudado o efeito do desgaste na qualidade superficial de peças torneadas. Com a aplicação dos métodos propostos, foi possível modelar o fenômeno e assim obter melhor compreensão sobre o mesmo, possibilitando otimizações do processo.*

## 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 quantias da peça inicial até ser obtida a geometria desejada. Este processo é utilizado, em grande parte, quando se deseja manufaturar peças simétricas de geometria circular. Para tais operações, uma pequena pastilha de carbetto 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 durante a usinagem. Existem diversos fatores que alteram a taxa de velocidade com que ele acontece, como por exemplo, a quebra ou o desgaste excessivo da ferramenta, que levam a perda de tempo e ineficiência no processo de manufatura, visto que tal falha pode danificar peças sendo produzidas, como as tolerâncias geométricas, integridades superficiais e até mesmo o próprio equipamento, levando a 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 0,6mm de extensão na ponta 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.

O objetivo desse projeto é o estudo dos efeitos do desgaste na ferramenta em relação a força de corte. Para isso, foi estabelecido um sistema de testagem e coleta de dados do processo de usinagem, que então foram tratados em um software de análise estatística, com intuito de avaliar a influência do desgaste na força de corte medida.

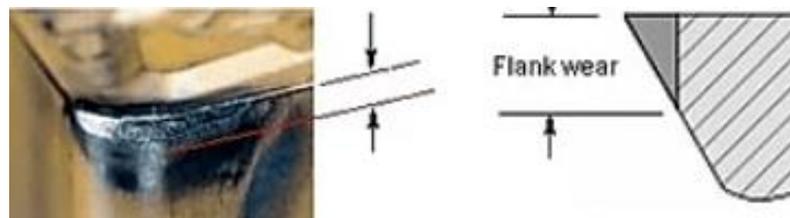
Segundo (ZHAOJUN *et al.*, 2018), é possível correlacionar dados de força de corte ( $F_c$ ) diretamente ao desgaste presente na ferramenta, porém diversos fatores a influenciam. A área de contato entre a ferramenta com o material, determinado pelo ( $a_p$ ) e a velocidade de corte, determinada pelo avanço ( $f_n$ ) são os fatores de maior influência. (MACHADO *et al.*, 2018). Sendo assim, ambos se mostraram predominantes em relação ao desgaste de flanco máximo ( $VB_{Bmáx}$ ).

## Materiais e Métodos

Tabela 1 Nomenclatura

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	$a_p$
Desvio aritmético médio	$R_a$
Raio da ponta da pastilha	$r_\epsilon$

Figura 1 Desgaste de flanco em ferramenta de carbeto



Fonte: (CADEM, 2016) *modificado*

### Norma ISO 3685

A norma ISO 3685 define desgaste como a “mudança de sua forma original durante o corte, resultante da perda gradual de material”. (ISO, 2017) O tipo mais comum e previsível é o desgaste de flanco, o qual consiste na perda de material da superfície de folga da ferramenta, como indicado na figura 1. 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 0,3mm e máximo de 0,6mm em ferramentas de corte. (MACHADO *et al.*, 2018) Essa medida é utilizada como referência para a criação dos métodos de testagens deste projeto, de modo a serem reproduzíveis e eficientes.

### Definição do método de testagem

Para que possa ser feita a avaliação do efeito do desgaste na força de corte, devem ser coletados dados de experimentos com pastilhas novas e já desgastadas, assim esperando obter diferentes resultados na força de corte, variando ao mínimo os demais fatores.

No estudo, foram utilizadas pastilhas da fabricante *Sandvik Coromant* modelo: DCMT 11T308-PM e suporte de ferramenta: SDNCN 2525 M11.

Foi então estabelecido um método de desgaste artificial: utilizando um disco de corte, foi feito um pequeno desgaste em 6 pontas de pastilhas novas (Figura 2), que então foram novamente desgastadas em um corpo de ensaios num torno manual (Figura 4), variando o tempo de usinagem em cada uma das pontas, tendo em vista obter uma faixa de resultados abrangente.

Figura 2 Desgaste artificialmente induzido na ponta da pastilha de corte



### Método da medição de força de corte

Durante a usinagem, são geradas forças em diferentes planos, nesse projeto foi medida apenas a força de corte ( $F_c$ ), que pode ser observada na figura 5.

A força de corte pode ser definida como “a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de corte dada pela velocidade de corte” (MACHADO *et al.*, 2018). Os *strain gauges* são dispositivos utilizados para medir deformações elásticas microscópicas em materiais. Para medir a força durante o processo de usinagem foram utilizados 4 *strain gauges* colados no suporte de ferramenta, próximos a pastilha e para monitorar e captar os dados foi utilizado um módulo de aquisição universal, de modelo: QuantumX MX840B da fabricante HBM em conjunto do software “catmanEasy” (Figura 3).

Figura 3 Software catmanEasy

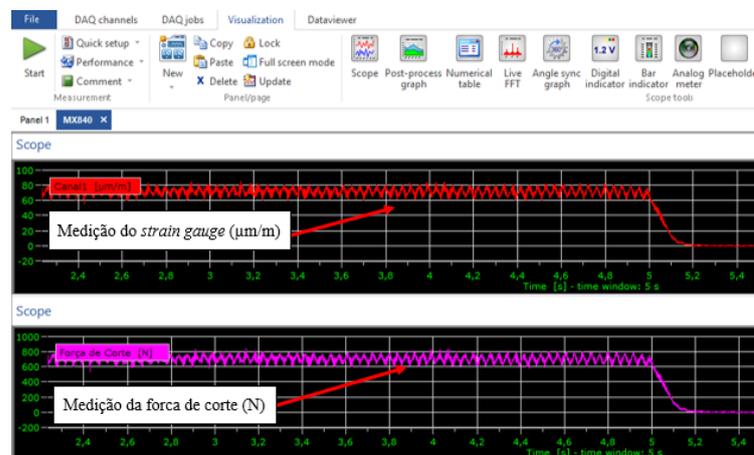
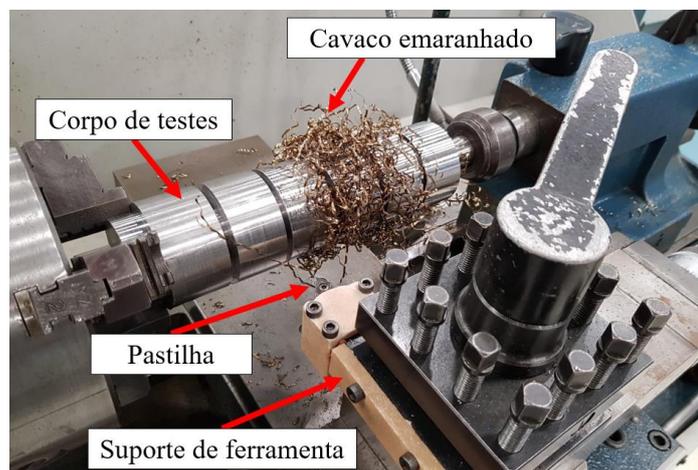


Figura 4 Formação de cavaco emaranhado



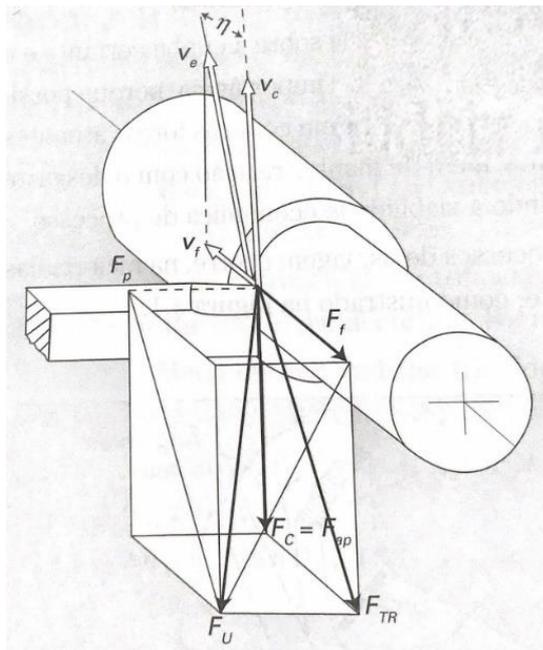
### Parâmetros dos ensaios

Visando obter uma faixa mais abrangente das medições, foram estabelecidos 5 ensaios para cada ponta de ferramenta (Tabela 2), onde foram alterados o avanço ( $f_n$ ) e a profundidade de corte ( $a_p$ ). Em cada ensaio, foi medida a força de corte na ponta da pastilha ao longo de um trecho de aproximadamente 30 mm no corpo de provas, demarcado pelos sulcos, 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 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

Figura 5 Força de usinagem e seus componentes



Fonte: (FERRARESI, 1977) *modificado*

### Ensaios

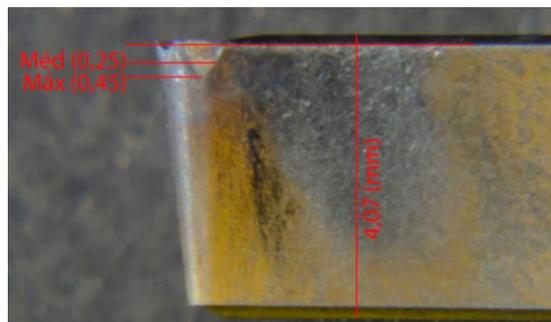
Foram então realizados ensaios com 8 pontas de pastilhas, duas em estado novo e seis com desgastes induzidos, gerando 40 linhas de dados (Tabela 5). Durante os ensaios das pastilhas com desgaste induzido, foi possível observar formações de cavaco emaranhado (Figura 4). Nesses casos, foi necessária a remoção do material preso ao corpo de prova para assim garantir a segurança durante os experimentos. Esse tipo de formação de cavaco pode ser perigoso ao operador e gera perda de eficiência no processo, visto que a operação deve ser interrompida. (MACHADO *et al.*, 2018).

### Medição do desgaste na ponta de corte

A medição do desgaste pode ser feita pelos métodos diretos, utilizando sensores ópticos ou resistências elétricas e métodos indiretos, utilizando parâmetros monitorados durante o processo com uso de algoritmos de predição. (BOVIC, PIERRE e XAVIER, 2011)

Para medir o desgaste na ponta das pastilhas, foi estabelecido um método de aquisição de imagem (método direto), que pudesse 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 ponta da ferramenta (Figura 7), a partir da medida conhecida da espessura da pastilha (4,07mm), foi ajustada a escala, a fim de aferir um valor aproximado do  $VB_{Bmáx}$  e  $VB_B$ , entretanto o segundo não foi utilizado pois não há informações suficientes nas imagens para se concluir uma medida precisa.

Figura 7 Medição do desgaste médio e máximo



### Coleta de dados da rugosidade

A integridade superficial é uma característica escolhida pelo projetista durante a fase de design de uma peça. Ela pode ser afetada durante a usinagem por diversos fatores, tais como: formação de cavaco, avanço, profundidade de corte, vibrações da máquina e também o desgaste.

Com um rugosímetro (Figura 8) foram coletados dados do desvio aritmético médio ( $R_a$ ), parâmetro importante da rugosidade, 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 *run* ao redor de cada peça para garantir um resultado mais consistente. Em seguida foram calculadas as médias destas medidas (Tabela 3), e depois comparados aos valores teóricos, obtidos pela equação 1.

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

Figura 8 Medição da rugosidade



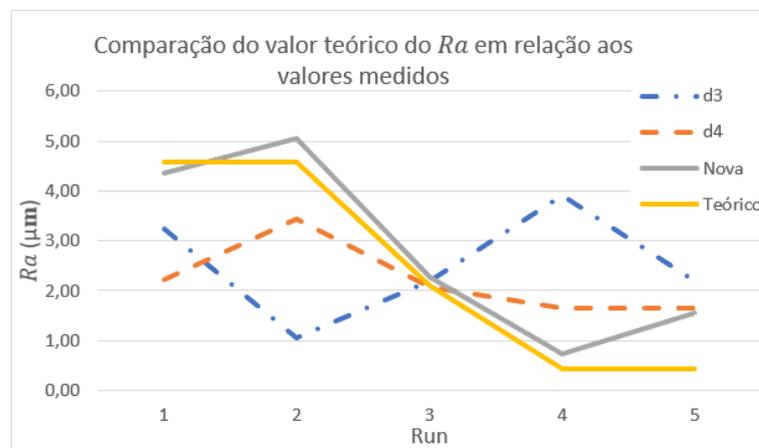
Tabela 3 Estudo da rugosidade ( $R_a$ )

Avanço	Run	Pastilha d3 ( $\mu\text{m}$ )	Pastilha d4 ( $\mu\text{m}$ )	Pastilha Nova ( $\mu\text{m}$ )	Teórico ( $\mu\text{m}$ )
0,338	1	3,23	2,22	4,35	4,46
0,338	2	1,06	3,44	5,05	4,46
0,229	3	2,19	2,07	2,28	2,05
0,104	4	3,90	1,65	0,72	0,42
0,104	5	2,19	1,64	1,54	0,42

### Efeitos do desgaste na rugosidade

A partir dos valores da tabela 3 foi gerado o gráfico 1, 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.

Gráfico 1 Estudo da rugosidade



### Tratamento dos dados da força de corte

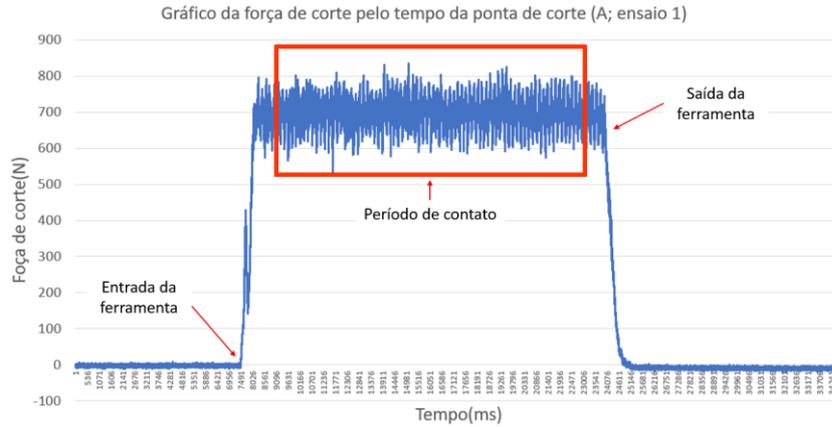
Algumas pastilhas obtiveram  $VB_{Bmáx}$  semelhantes. O método de medição, porém, não é capaz de determinar com segurança centésimos de milímetro, então foi adotada a média dos desgastes máximos similares (tabela 4) gerando 3 níveis de desgaste (0,00; 0,45; 0,62 mm).

Tabela 4 Desgastes máximos medidos e médias

Pastilha	$VB_{Bmáx}$ (mm)	Pastilha	$VB_{Bmáx}$ (mm)
A	0,60	D4	0,48
B	0,60	C2	0,44
D3	0,67	C1	0,42
Média (A, B, D3)	0,62	(D4, C2, C1)	0,45

O tratamento dos dados da força de corte foi feito separando apenas as medições aferidas durante o contato da ferramenta com o corpo de prova (gráfico 8). Em seguida, foi extraída a força média e o desvio padrão para cada ensaio.

Figura 8 Análise e tratamento dos dados da força de corte



Análise de variância (ANOVA)

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. (MINITAB) 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).

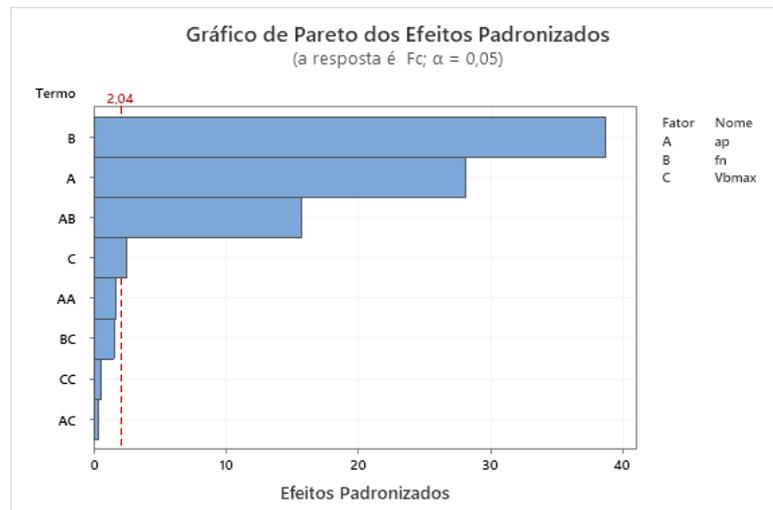
Para realizar o estudo, foi utilizado o software de análise estatística *Minitab*. Nele foram escolhidos os fatores contínuos  $a_p$ ,  $f_n$  e  $VB_{Bmáx}$  e as repostas  $F_c$  e Desvio padrão, em seguida foi feita uma análise de experimento de superfície de resposta.

**Resultados e discussões**

Modelo da força de corte

Os gráficos 2 e 3 mostram os valores absolutos dos efeitos padronizados desde o maior até o menor efeito. No gráfico 2 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 seu valor ultrapassa a linha  $\alpha$ . Além disso, o modelo obteve  $R^2$  de 98,91%, verificando bom ajuste à base de dados.

Gráfico 2 Grafico dos efeitos padronizados sobre a  $F_c$



Em relação ao gráfico 3, o desgaste máximo se mostrara estatisticamente irrelevante para a montagem de um modelo de previsão, visto que a medida não ultrapassara a linha  $\alpha$ .

O gráfico 4 apresenta as relações entre a força de corte e os demais parâmetros ( $a_p$ ,  $f_n$  e  $VB_{Bm\acute{a}x}$ ), a partir das quais pode-se concluir que há uma relação inversamente proporcional entre o  $VB_{Bm\acute{a}x}$  e a força de corte, visto que à medida que há um maior desgaste de flanco máximo, há menor força de corte.

Gráfico 3 Grafico dos efeitos padronizados sobre o Dp

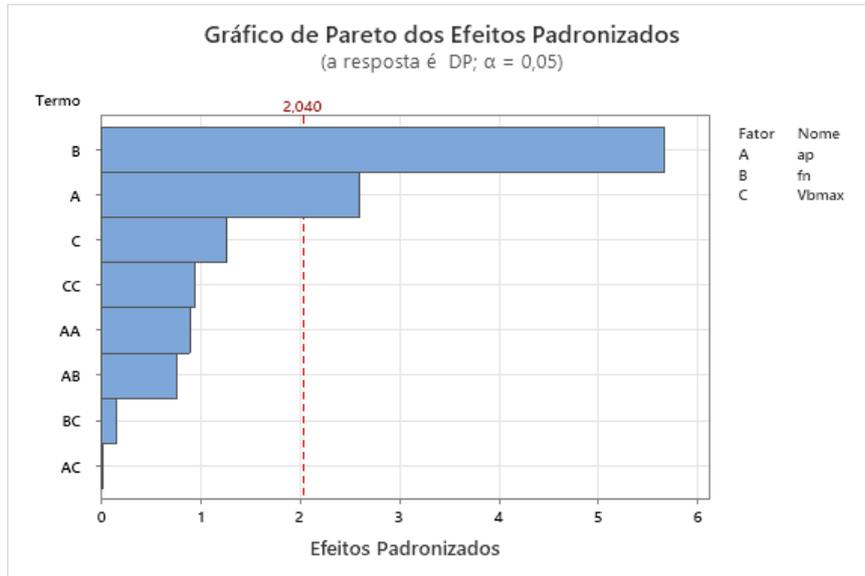
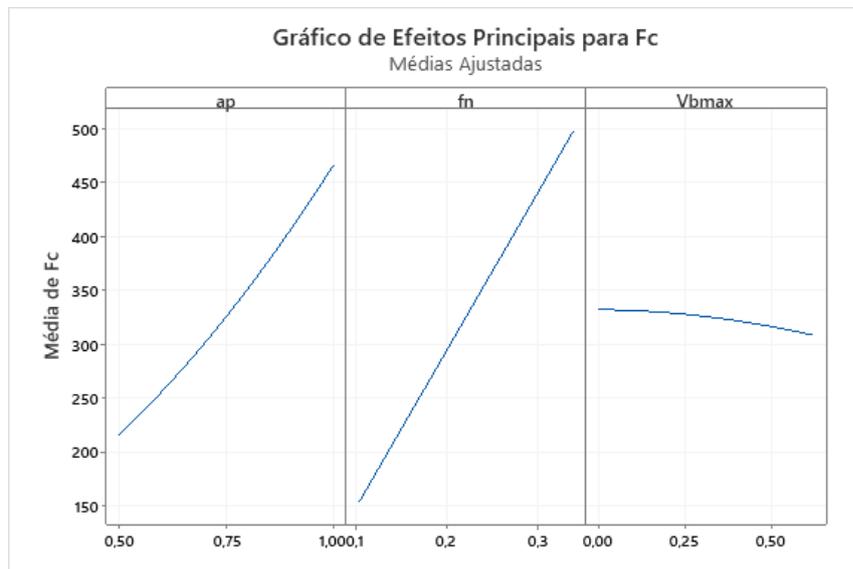


Gráfico 4 Gráficos dos efeitos principais



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.

$$F_{cmod} = 122,6 - 363a_p - 141f_n + 66,9 VB_{Bm\acute{a}x} + 251a_p^2 - 57VB_{Bm\acute{a}x}^2 \quad (2)$$

$$+ 2243a_p \times f_n - 27,7a_p \times VB_{Bm\acute{a}x} - 224f_n \times VB_{Bm\acute{a}x}$$

Tabela 3 Dados e resultados do modelo de força de corte

Linha	Run	$a_p$ (mm)	$f_n$ (mm/rotação)	$VB_{Bmáx}$ (mm)	$F_c$ (N)	$F_{cmod}$ (N)	Erro
1	1	1	0,338	0,00	709,561	721,076	1,60%
2	2	0,5	0,338	0,00	320,691	335,259	4,35%
3	3	0,75	0,229	0,00	345,868	344,484	-0,40%
4	4	1	0,104	0,00	236,422	229,208	-3,15%
5	5	0,5	0,104	0,00	110,807	105,822	-4,71%
6	1	1	0,338	0,62	699,409	676,528	-3,38%
7	2	0,5	0,338	0,62	291,492	299,298	2,61%
8	3	0,75	0,229	0,62	316,722	319,367	0,83%
9	4	1	0,104	0,62	234,32	217,158	-7,90%
10	5	0,5	0,104	0,62	145,767	102,359	-42,41%
11	1	1	0,338	0,62	614,357	676,528	9,19%
12	2	0,5	0,338	0,62	248,172	299,298	17,08%
13	3	0,75	0,229	0,62	300,795	319,367	5,82%
14	4	1	0,104	0,62	203,820	217,158	6,14%
15	5	0,5	0,104	0,62	64,404	102,359	37,08%
16	1	1	0,338	0,45	686,476	693,103	0,96%
17	2	0,5	0,338	0,45	316,657	313,519	-1,00%
18	3	0,75	0,229	0,45	339,200	330,614	-2,60%
19	4	1	0,104	0,45	221,485	224,822	1,48%
20	5	0,5	0,104	0,45	104,361	107,669	3,07%
21	1	1	0,338	0,45	699,386	693,103	-0,91%
22	2	0,5	0,338	0,45	332,226	313,519	-5,97%
23	3	0,75	0,229	0,45	331,992	330,614	-0,42%
24	4	1	0,104	0,45	224,517	224,822	0,14%
25	5	0,5	0,104	0,45	98,388	107,669	8,62%
26	1	1	0,338	0,62	704,682	676,528	-4,16%
27	2	0,5	0,338	0,62	354,166	299,298	-18,33%
28	3	0,75	0,229	0,62	336,319	319,367	-5,31%
29	4	1	0,104	0,62	221,080	217,158	-1,81%
30	5	0,5	0,104	0,62	110,602	102,359	-8,05%
31	1	1	0,338	0,45	705,157	693,103	-1,74%
32	2	0,5	0,338	0,45	300,965	313,519	4,00%
33	3	0,75	0,229	0,45	330,846	330,614	-0,07%
34	4	1	0,104	0,45	220,952	224,822	1,72%
35	5	0,5	0,104	0,45	97,391	107,669	9,55%
36	1	1	0,338	0,45	732,750	693,103	-5,72%
37	2	0,5	0,338	0,45	345,487	313,519	-10,20%
38	3	0,75	0,229	0,00	337,598	344,484	2,00%
39	4	1	0,104	0,00	221,979	229,208	3,15%
40	5	0,5	0,104	0,00	110,205	105,822	-4,14%

Foram geradas previsões das forças de corte utilizando o modelo da força de corte  $F_{cmod}$  ( $N$ ) na tabela 5 e esses comparados aos dados originais da força de corte. 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 muito acima do normal, de erro -42,41% e 37,08%, ambos ocorreram durante o último *run* das pastilhas 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 errática de cavacos e desgaste esporádico da pastilha. (MACHADO *et al.*, 2018)

## Conclusão

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 de demais fatores simultaneamente monitorados, os quais não foram tratados nesse estudo. Além disso, as análises feitas possibilitaram confirmar a existência do impacto causado pelo desgaste na qualidade superficial das peças.

## Bibliografia

- BOVIC, K.; PIERRE, D.; XAVIER, C. Tool wear monitoring by machine learning techniques and singular spectrum analysis, Acesso em 1 jan. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.07.014>.
- CADEM. Tool life definition – what is tool life in CNC machining? Cadem, Acesso em 27 abr. 2016. Disponível em: <https://cadem.com/tool-life-definition-cnc-machining/>.
- FERRARESI, D. Fundamentos da usinagem dos metais. São Paulo: Blucher, 1977.
- GARCÍA-ORDAS, M.; ALEGREL, E.; GONZÁLES-CASTRO, V.; ALAIZ-RODRÍGUES, R. A computer vision approach to analyze and classify tool wear level in milling processes using shape descriptors and machine learning techniques. Springer, p. 15, 7 out. 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-016-9541-0>.
- HUTCHINGS, I. M. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. London, 1992.
- ISO. Tool-life testing with single-point turning tools. ISO, 2017. Disponível em: [iso.org/standard/9151.html](http://iso.org/standard/9151.html).
- KHAYAL, D. O. M. E. S. Literature review on turning operations. [S.l.]. 2019.
- MACHADO, Á. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, T.; SILVA, B. Formação de cavacos. In: Teoria da usinagem dos materiais. 3. ed. [S.l.]: Blucher, 2018. Cap. 3, p. 57-98.
- MINITAB. Disponível em: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/anova/supporting-topics/basics/what-is-anova/>. Acesso em: 12 out. 2021.
- WATKINS, J. C. An Introduction to the Science of Statistics: From Theory to Implementation, 2016.
- ZHAOJUN, R.; SHENGGUAN, Q.; YALONG, Z.; XIAOQIANG, L.; CHAO, Y. 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, Acesso em 19 out. 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-4701/8/10/850>.