

## **A INFLUÊNCIA DE DIFERENTES GEOMETRIAS EM FERRAMENTAS DE CORTE NO ACABAMENTO SUPERFICIAL GERADO EM PEÇAS FRESADAS**

**Alexandre Maier Eurich, alexandre\_me91@hotmail.com<sup>1</sup>**

**Aldo Braghini Junior, aldo@utfpr.edu.br<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Rua Doutor Washington Subtil Chueire, 330 - Jardim Carvalho - 84017-220 - Ponta Grossa - PR - Brasil

**Resumo.** O acabamento superficial em peças usinadas é influenciado pelas características do mecanismo de formação de cavaco que, por sua vez, estão diretamente ligados às geometrias das ferramentas de corte. Ferramentas mais positivas, ou com ângulos maiores, tendem a facilitar a remoção de cavaco, diminuindo esforços, temperaturas e vibrações. No entanto, o aumento exagerado destes ângulos pode acarretar em uma fragilidade da aresta de corte da ferramenta, tornando-a mais suscetível a choques mecânicos e apresentando maior dificuldade na dissipação de calor. Frente a estes aspectos, a presente pesquisa tem como objetivo avaliar a influência de duas ferramentas de corte de classes semelhantes (ambas P40), porém com geometrias distintas, na obtenção do acabamento superficial ao longo das respectivas vidas. Os ensaios de fresamento de faceamento foram realizados em blocos de aço ABNT 1045 utilizando uma fresadora universal. As superfícies das amostras usinadas geradas durante os ensaios de fresamento foram inspecionadas por perfilometria óptica. A ferramenta caracterizada com ângulo de saída maior e de aresta mais frágil foi mais suscetível ao desgaste e apresentou valores de rugosidade mais alternados quando comparados àqueles obtidos pelo fresamento com a ferramenta com menor ângulo de saída.

**Palavras chave:** Usinagem. Geometria de ferramentas de corte. Acabamento superficial. Rugosidade. Superfície usinada.

**Abstract.** The surface finish on machined parts is influenced by the characteristics of the chip formation mechanism which, in turn, are directly linked to the geometries of the cutting tools. More positive tools, or with larger angles, tend to facilitate chip removal, reducing efforts, temperatures and vibrations. However, the exaggerated increase of these angles is able to lead to a fragility of the cutting edge of the tool, making it more susceptible to mechanical shocks and presenting greater difficulty in heat dissipation. In view of these aspects, the present research aims to evaluate the influence of two cutting tools of similar classes (both P40), but with different geometries, in obtaining the surface finish throughout their respective lives. The face milling tests were performed on ABNT 1045 steel blocks using a universal milling machine. The surfaces of the samples machined generated during the milling tests were inspected by optical profilometry. The tool characterized with a larger rake angle and a more fragile edge was more susceptible to wear and presented more alternated roughness values when compared to those obtained by milling with the tool with a smaller rake angle.

**Keywords.** Machining. Geometry of cutting tools. Surface finish. Roughness. Machined surface.

### **1. INTRODUÇÃO**

Um processo de fabricação busca produzir peças conforme a necessidade de cada projeto e com a melhor qualidade possível. No entanto, estes processos nunca são perfeitos e produzem produtos finais com erros geométricos e dimensionais. Dentre os erros mais comuns, estão os desvios no perfil da topografia da superfície da peça, ou rugosidade, que é um dos parâmetros que define a qualidade do acabamento superficial.

Dos processos utilizados para fabricar peças e preparar as superfícies, a usinagem é o mais utilizado. Este é o processo que permite a obtenção de baixos níveis de rugosidade, gerados, entre outros fatores, pela impressão do perfil da aresta de corte da ferramenta na peça usinada. Partindo desta afirmação, crê-se que a utilização de uma ferramenta em seu perfeito estado, fabrica peças com valores de rugosidade muito menores quando comparadas a peças produzidas com ferramentas que sofreram desgaste.

A geometria de uma ferramenta de corte tem uma importante significância na taxa com que os desgastes ocorrem: ferramentas com ângulos menores e, portanto, com arestas mais robustas, tendem a apresentar vidas maiores e são mais resistentes aos mecanismos de desgaste. Por outro lado, ângulos maiores tendem a facilitar o mecanismo de formação de cavaco, podendo gerar superfícies com melhores acabamentos superficiais.

A busca por melhorias na qualidade superficial em peças que constituem componentes mecânicos é cada vez maior no cenário industrial, pois implicam em acréscimos na resistência à corrosão, na condição de deslizamento e na aparência. Frente a isto, é importante tanto o entendimento do comportamento da rugosidade à medida que a aresta de corte da ferramenta sofre mudanças, quanto da influência da geometria da aresta de corte na topografia impressa na peça usinada. Análises de resultados como estes permitirão estabelecer condições que geram um bom acabamento superficial. Estas condições, além de promover um aperfeiçoamento na qualidade do produto, poderão trazer redução de custos e melhor controle no processo de fabricação. Neste sentido, a presente pesquisa tem como objetivo geral investigar e avaliar a influência de duas ferramentas de corte de classes semelhantes (ambas P40), porém com geometrias distintas, na obtenção do acabamento superficial ao longo dos seus tempos de vida.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Segundo Stephenson e Agapiou (2016), a usinagem é um processo de fabricação que garante as formas, as dimensões e o acabamento de uma peça por meio da remoção controlada de cavaco realizada através da ação de cisalhamento de uma ferramenta sobre um metal bruto. De acordo com Diniz et. al (2010), o corte do material se dá pelo cisalhamento concentrado ao longo de um plano conhecido como plano de cisalhamento.

Entre os processos de usinagem convencionais, destaca-se o fresamento. Segundo Trent e Wright (2000), neste tipo de operação a ferramenta é rotacionada enquanto a peça, fixada a mesa da máquina fresadora, é responsável pelos movimentos de avanço longitudinal e transversal.

Para que o corte ocorra e o cavaco seja removido, há um processo conhecido como mecanismo de formação de cavaco, que envolve alguns fenômenos, tais como: deformação elástica e plástica, atrito e cisalhamento. Além de fatores tais como material da peça, material da ferramenta, tipo de máquina ferramenta e parâmetros de corte, outros pontos que têm grande influência no mecanismo de formação de cavaco estão relacionados às geometrias das ferramentas, entre eles: ângulo de saída ( $\gamma$ ), ângulo de folga ( $\alpha$ ), ângulo de cunha ( $\beta$ ) e raio da aresta ( $r_e$ ).

Machado (2009) descreve a importância de alguns ângulos geométricos da ferramenta no mecanismo de formação de cavaco e conseqüentemente na geração da superfície usinada:

- Ângulo de saída: maiores ângulos de saída reduzem as forças de corte e, portanto, as alturas dos picos e as profundidades dos vales que representam a rugosidade da superfície serão menores;
- Ângulo de folga: deve ser suficientemente alto para evitar o contato da superfície da ferramenta com a superfície usinada, já que este atrito causa esforços e flexões adicionais. Além disso, podem imprimir, na superfície usinada, os defeitos ou desgastes da ferramenta.

Em operações de fresamento de faceamento com insertos intercambiáveis, como os da presente pesquisa, as geometrias dos encostos do cabeçote fresador também devem ser levadas em consideração no estudo e relacionados com os valores das ferramentas avulsas gerando, desta maneira, ângulos efetivos de corte, tais como ângulo de saída radial e axial e ângulo de posição, conforme exposto na Figura 1.

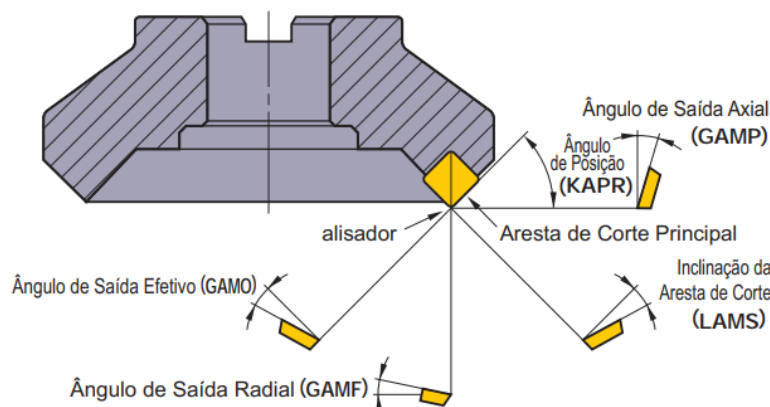


Figura 1. Ilustração dos ângulos gerados pela combinação dos ângulos da ferramenta avulsa com os ângulos dos assentos do cabeçote fresador (Mitsubishi Tools, 2020)

Já em relação a superfícies usinadas, a medição dos valores de rugosidade permite avaliar a qualidade do acabamento superficial, sendo um acabamento melhor e mais refinado para menores valores de rugosidade, e vice-versa. Neste sentido, alguns parâmetros de rugosidade são utilizados para caracterizar estas superfícies, dentre eles: rugosidade média ( $R_a$  ou  $S_a$ ), desvio médio quadrático do perfil ( $R_q$  ou  $S_q$ ), altura máxima de pico ( $R_p$  ou  $S_p$ ), profundidade máxima de vale ( $R_v$  ou  $S_v$ ), fator de assimetria ( $R_{sk}$  ou  $S_{sk}$ ), fator de achatamento ( $R_{ku}$  ou  $S_{ku}$ ) e alguns outros parâmetros extraídos da curva *Abbott-Firestone*.

Segundo Whitehouse (1994), o parâmetro de rugosidade média é o parâmetro de rugosidade amplamente utilizado no cenário industrial, no entanto é severamente limitado em termos de informações fornecidas sobre a superfície e, portanto, deve ser analisado em paralelo a outros parâmetros de rugosidade.

Cabe salientar ainda que os parâmetros que fazem a análise em área de amostragem (parâmetros S) são muito mais representativos da superfície gerada por fresamento pois representam e avaliam, em superfícies fresadas, as trilhas de usinagem como um todo, trilhas estas geradas pelas arestas de corte; ao fazer as avaliações com os parâmetros R, tem-se a representatividade de uma linha do perfil de rugosidade e, portanto, com menor representatividade por não fazer um mapeamento completo da superfície.

Trent e Wright (2000) afirmam uma piora no acabamento superficial e uma maior dificuldade em remover cavaco em processos de fresamento, ao longo da vida da ferramenta e à medida que a mesma sofre desgaste. Os efeitos da evolução do desgaste podem ser analisados sob dois aspectos: da morfologia do cavaco e da impressão na superfície usinada. Quando se observa o cavaco, nota-se que, quando a ferramenta está em ótimas condições, os serrilhados são uniformes e a sua superfície posterior é lisa e refletiva; no entanto, à medida que a ferramenta sofre desgaste, a altura dos serrilhados fica cada vez mais variada e a superfície posterior passa a apresentar fissuras e padrões irregulares. Quanto a superfície usinada, nota-se que, em perfeito estado, as ferramentas geram superfícies regulares e reflexivas; no entanto, à medida que o desgaste ocorre, as superfícies passam a ficar mais opacas e aumenta-se a frequência do aparecimento de “orelhas” entre as trilhas de usinagem.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Duas ferramentas de corte com características semelhantes (ambas são de metal duro e classe ISO P40), porém de geometrias diferentes, foram selecionadas para os experimentos. Portanto, estabeleceu-se: ferramentas A, montadas no cabeçote do mesmo fabricante do inserto, e ferramentas B, no cabeçote do mesmo fabricante do inserto (Figura 2).

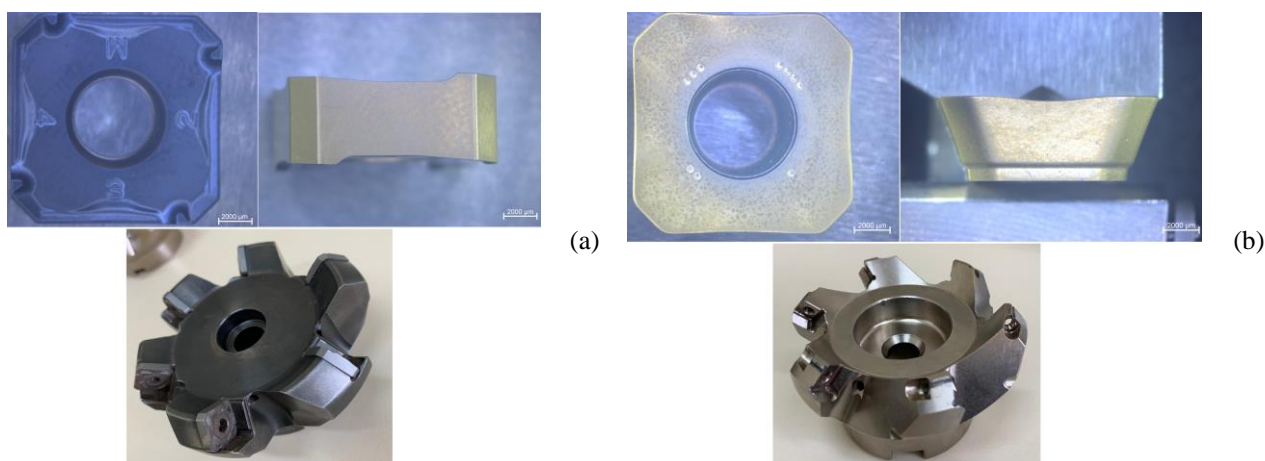


Figura 2. Imagens da ferramenta A (a) e da ferramenta B (b) e seus respectivos cabeçotes

Caracterizações mostraram-se importantes porque são ferramentas e cabeçotes com ângulos distintos e que, conseqüentemente, terão mecanismos de formação de cavaco diferentes. Além do mais, os revestimentos também são distintos, influenciando de maneira desigual na propagação de calor, no coeficiente de atrito e na resistência ao desgaste. A soma destes fatores em decorrência da distinção de geometria e de revestimentos pode trazer uma variação significativa no processo de usinagem e, principalmente, na qualidade do acabamento da peça.

A caracterização dimensional e geométrica das ferramentas foi feita por meio de informações disponibilizadas nos catálogos dos fabricantes e/ou pela medição dos ângulos através dos desenhos disponibilizados nos catálogos virtuais e com auxílio de um *software* CAD. Cabe ressaltar que os ângulos considerados são os efetivos, ou seja, dados pela combinação dos ângulos da ferramenta avulsa com os ângulos do próprio cabeçote.

Quanto a composição química das ferramentas A e B, foi necessário o corte transversal das mesmas para posterior caracterização dos elementos constituintes do substrato e dos revestimentos das mesmas. A técnica utilizada para esta caracterização foi a espectroscopia de energia dispersiva (EDS) modelo *x-act* do fabricante *Oxford* e acoplado microscópio eletrônico de varredura utilizado foi o modelo *Vega 3* do fabricante *TESCAN*.

Os ensaios de fresamento foram realizados em blocos de aço ABNT 1045 cujas medidas podem ser observadas na Figura 3 (a). Como se tratava de um bloco pesado e de grandes dimensões, o manuseio e o transporte tornavam-se difíceis. Portanto, com o intuito de solucionar este problema e possibilitar a análise (pelo perfilômetro óptico) destas superfícies geradas, foram fabricadas amostras com dimensões reduzidas a partir dos blocos padrão, conforme Figura 3 (b).

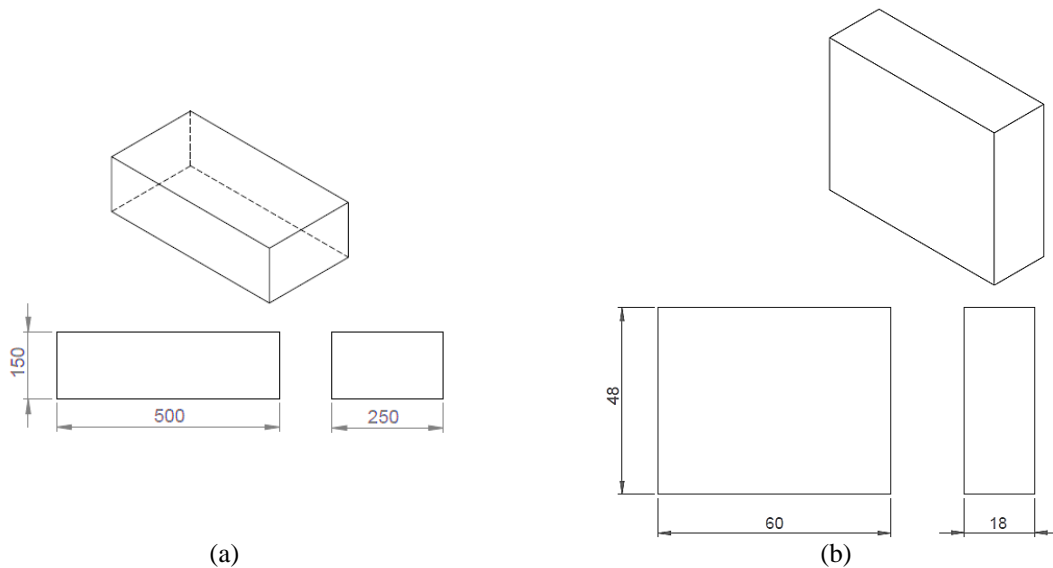


Figura 3. Dimensões (em mm) do bloco de aço padrão fresado nos experimentos (a) e dimensões (em mm) das amostras fabricadas a partir do bloco padrão

O fresamento foi realizado em uma fresadora universal, modelo FH4 do fabricante *Clark Machine*, por determinado tempo efetivo de corte, seguido de um intervalo em que as ferramentas foram utilizadas para gerar uma superfície nas amostras do material da peça. O perfil topográfico impresso representa o acabamento superficial no momento da parada, ou seja, considera o estado de degradação da ferramenta naquele momento. As superfícies das amostras usinadas foram analisadas em uma área de 20,25 mm<sup>2</sup> em um perfilômetro óptico, modelo 3D CCI Lite do fabricante Tyler Hobson, com o intuito de obter os valores dos parâmetros de rugosidade.

Sendo assim, cada superfície gerada ao fim de cada período de corte efetivo é representativa do atual estado de degradação da aresta de corte, construindo um histórico de superfícies usinadas ao longo da vida da ferramenta.

A seleção de quais valores dos parâmetros mais adequados aos experimentos foi feita considerando-se os valores de avanço por aresta de corte e velocidade de corte recomendados pelos fabricantes das ferramentas e os permitidos pela fresadora. A partir disto, estabeleceu-se condições de usinagem para a execução dos ensaios, dispostas na matriz de experimentos da Tabela 1.

Tabela 1. Matriz de experimentos

Número do experimento	Rotação (rpm)	Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/min)	Avanço por aresta (mm/aresta)	Profundidade de corte (mm)	Largura de corte (mm)	Ferramenta	Número de insertos no cabeçote
1	915	230	247	0,270	1,5	50	B	1
2	915	230	342,4	0,374	1,5	50	B	1
3	915	230	247	0,270	1,5	50	A	1
4	915	230	342,4	0,374	1,5	50	A	1

Ao se analisar os parâmetros de corte das condições de fresamento, nota-se que são variáveis apenas os valores de avanço e os tipos de ferramentas utilizadas. Esta construção de matriz foi adotada pois permitiu uma análise mais clara da influência de ferramentas com geometrias distintas na geração do acabamento superficial.

## 4. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os principais resultados das caracterizações das ferramentas de corte e seus cabeçotes e das análises de rugosidade por perfilometria óptica.

### 4.1. Caracterização das ferramentas de corte e dos cabeçotes de fresamento

Nesta seção, serão expostos os resultados das caracterizações geométricas e de composição química das ferramentas A e B, utilizadas nos experimentos da presente pesquisa.

Inspecionando as medições realizadas no *software* CAD, pôde-se fazer o levantamento dos valores das geometrias do conjunto ferramenta e cabeçote A, conforme exposto na Tabela 2.

Tabela 2. Valores dos ângulos efetivos do conjunto ferramenta-cabeçote A

Ângulo efetivo do conjunto ferramenta-cabeçote	Valor
Ângulo de saída radial ( $\gamma_f$ )	$-12^\circ$
Ângulo de saída axial ( $\gamma_p$ )	$-7^\circ$
Ângulo de folga ( $\alpha$ )	$6^\circ$

Já em relação a ferramenta B, os valores de suas dimensões geométricas foram informados pelo fabricante da mesma e, portanto, bastou relacionar os valores dos ângulos da ferramenta avulsa com os do cabeçote fresador. Os valores estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 3. Valores dos ângulos efetivos do conjunto ferramenta-cabeçote B

Ângulo efetivo do conjunto ferramenta-cabeçote	Valor
Ângulo de saída radial ( $\gamma_f$ )	$2^\circ$
Ângulo de saída axial ( $\gamma_p$ )	$27^\circ$
Ângulo de folga ( $\alpha$ )	$10^\circ$

Por fim, pode-se observar que a ferramenta B possui ângulos de saída positivos e a ferramenta A possui ângulos de saída negativos. Ângulos de saída positivos favorecem o mecanismo de formação de cavaco, reduzindo as taxas de deformação, os esforços e a temperatura.

Quanto a caracterização da composição química do substrato e dos revestimentos das ferramentas A e B, os resultados provenientes da técnica de EDS, que indica quais os elementos químicos formam o substrato e os revestimentos da ferramenta A, são dispostos na Figura 4.

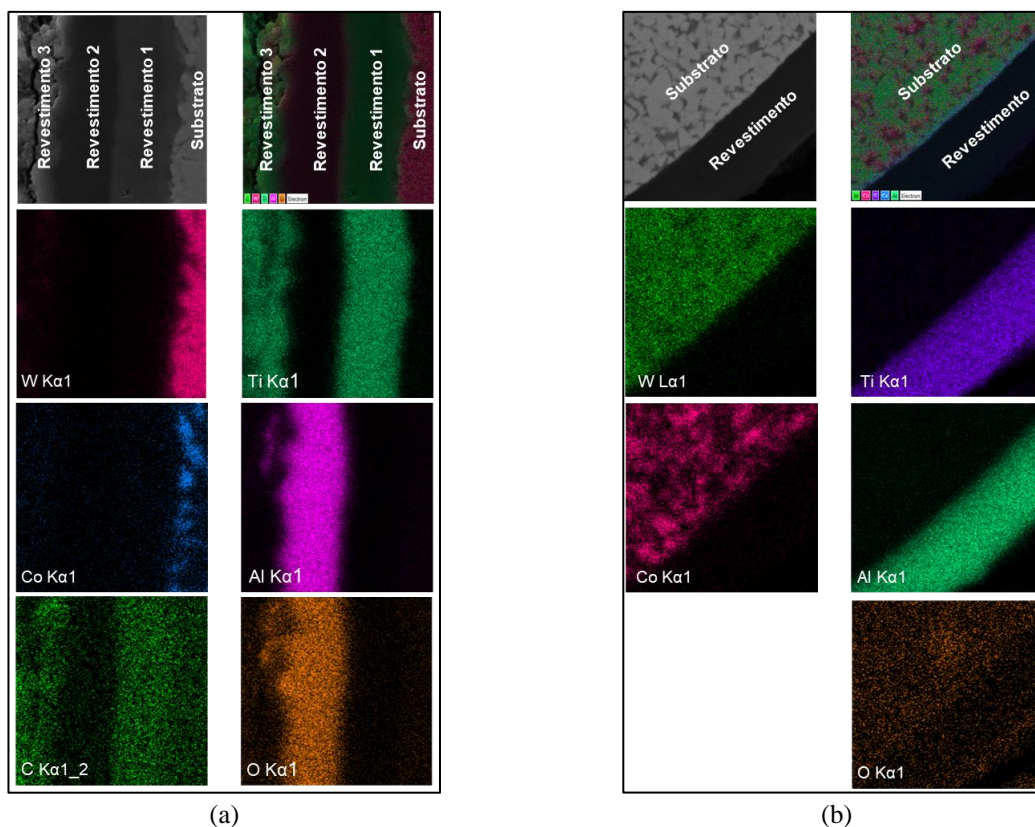


Figura 4. Imagens de EDS da ferramenta A (a) e da ferramenta B (b), revelando a composição química do revestimento e do substrato

Analisando a Figura 4, observa-se que se trata de ferramentas de metal duro (apresentam cobalto e tungstênio no substrato). A ferramenta A é revestida por três camadas de revestimento: o carbonitreto de titânio (TiCN) em contato com o substrato, o óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) como intermediário e o nitreto de titânio (TiN) como revestimento externo. Já a ferramenta B é revestida por uma única camada de nitreto de titânio alumínio (TiAlN).

A principal finalidade de revestir uma ferramenta é aumentar a resistência ao desgaste e melhorar as condições tribológicas nas interfaces ferramenta-cavaco e ferramenta-peça, aumentando assim a vida útil das mesmas por redução dos esforços e das temperaturas envolvidas no corte. Em relação aos revestimentos observados na ferramenta A, o TiCN é utilizado como primeira camada pois garante maior aderência do revestimento no substrato e de novos revestimentos sobre ele, o  $Al_2O_3$  gera uma barreira térmica (por reduzir a condutividade térmica), inércia química e dureza e, portanto, resistência ao desgaste e o TiN garante uma redução no coeficiente de atrito, característica importante para a camada mais externa. Em relação à ferramenta B, trata-se de um revestimento único de TiAlN que gera uma boa relação entre resistência ao desgaste, estabilidade química e coeficiente de atrito.

#### 4.2. Comportamento da rugosidade média ao longo da vida das ferramentas

Buscando comparar as condições de acabamento geradas ao longo da vida das ferramentas para as quatro condições de usinagem utilizadas na presente pesquisa, recorreu-se a comparações dos comportamentos de parâmetros de rugosidade que avaliam uma superfície (parâmetros S), visto que se concluiu que estes são mais representativos.

A primeira comparação é feita em relação aos valores de rugosidade média, conforme o Figura 5.

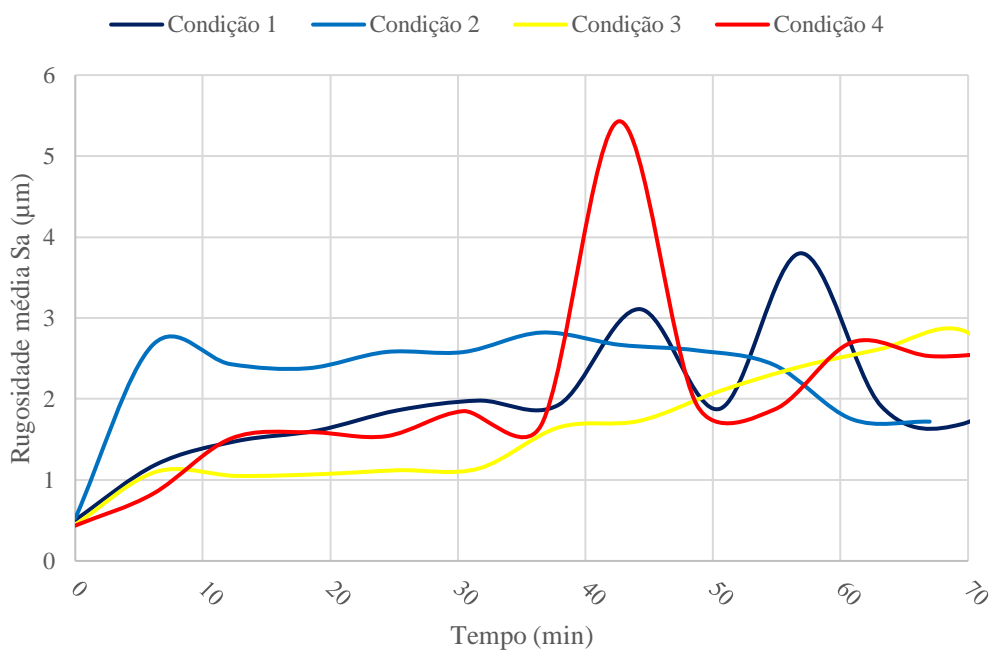


Figura 5. Gráficos comparativos das rugosidades médias (Sa) entre as quatro condições de usinagem

Como pode-se observar na Figura 5, o comportamento da rugosidade média é altamente desorientado e sem tendência nas condições 1 e 3. Acredita-se que este fato se dê pelo fato de que estas condições operam com baixos valores de avanço e, portanto, aumenta-se a probabilidade de formação de adesão de material nas superfícies da ferramenta. O surgimento de adesão, por sua vez, além de gerar mudanças no mecanismo de formação do cavaco, é algo cíclico, ou seja, que pode ser aderido e recalado continuamente e, inclusive, carregar consigo partículas da ferramenta no momento em que é extraído. Este comportamento cíclico gera oscilações no modo que as ferramentas influenciam na geração da superfície usinada.

Quando a análise é feita para as condições com menor avanço (condição 1 e 3), nota-se que a maioria dos valores de rugosidade média está entre 1 e 3 µm: para a condição 1, 72,7 % das medidas têm seus valores nesta faixa e, para a condição 3, a proporção é de 90,9 %. Ao se analisar as condições com maior avanço (condição 2 e 4), nota-se que a maioria dos valores de rugosidade média está entre 2 e 3 µm: para a condição 2, 75 % das medidas têm seus valores nesta faixa e, para a condição 4, esta proporção é de 33,3 %. Nesta análise, a teoria é confirmada: valores de avanço menores tendem a gerar superfícies com melhor acabamento.

Observa-se ainda que para o menor avanço utilizado que deveria resultar em um acabamento mais refinado, a ferramenta A apresentou melhores resultados. Ao se analisar a Figura 5, nota-se que, nas condições 1 e 3, onde os valores

de Sa se encontram entre 1 e 3  $\mu\text{m}$ , a ferramenta A, condição 3, gerou um comportamento onde as alternâncias de seus valores não são de grande magnitude. Acredita-se que este fato ocorreu pelo fato de que a ferramenta A apresenta ângulo de cunha maior e, portanto, é mais robusta; esta característica favorece a resistência da ferramenta contra os choques térmicos e mecânicos envolvidos no fresamento e reduz os efeitos de batimento e vibração.

Na Figura 6 são expostos os valores de altura máxima de pico ( $S_p$ ) e da altura reduzida dos picos ( $S_{pk}$ ), para as quatro condições de usinagem.

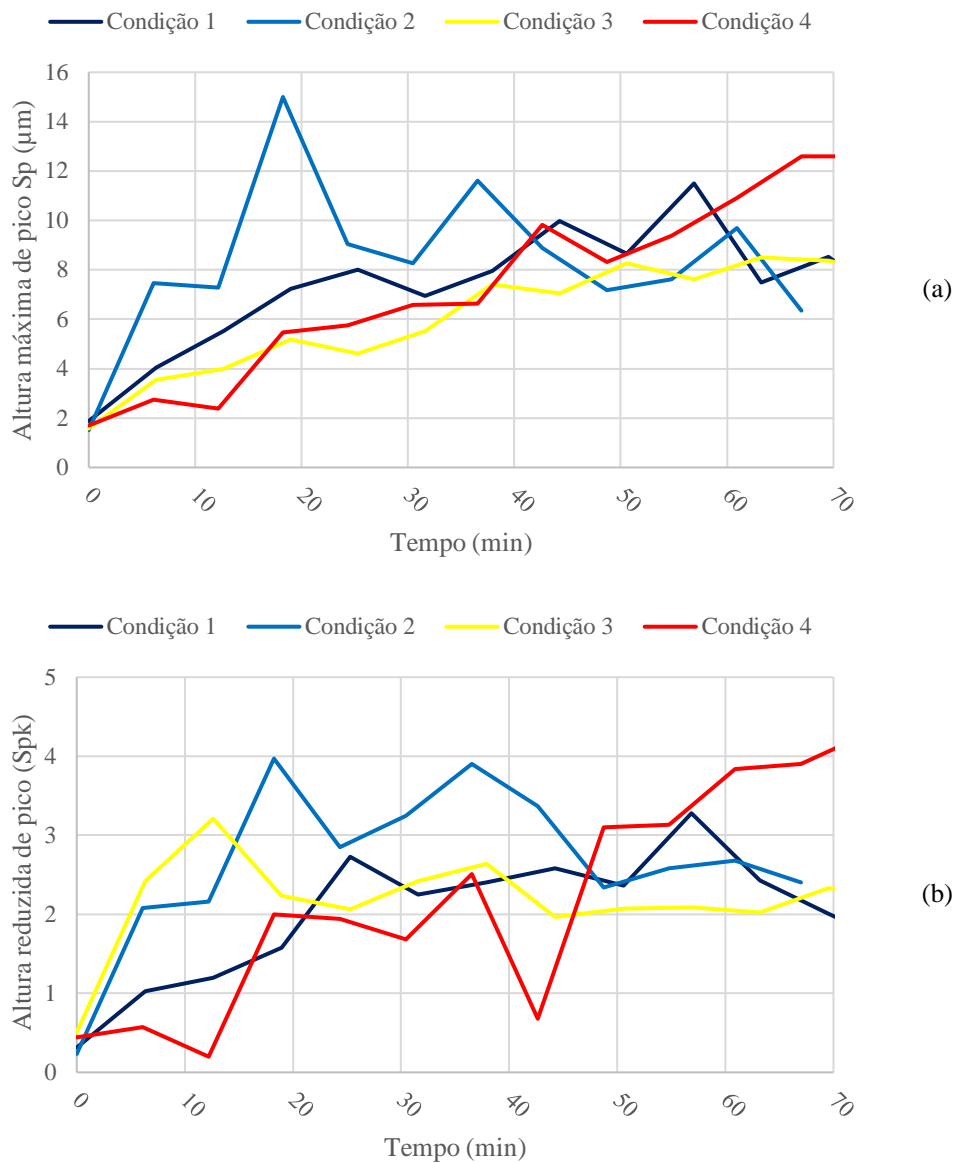


Figura 6. Gráficos comparativos das alturas máximas de pico ( $S_p$ ) (a) e das alturas reduzidas dos picos ( $S_{pk}$ ) (b) entre as quatro condições de usinagem

Nota-se, na Figura 6, que nas condições 1 e 3, os valores de rugosidade não têm um comportamento tão alternado como nas condições 2 e 4, inclusive, a ferramenta A (na condição 3) gerou superfícies com valores de  $S_p$  e  $S_{pk}$  que apresentam baixa alternância, entre 4 e 8  $\mu\text{m}$  e 2 e 3  $\mu\text{m}$ , respectivamente. No entanto, ao se observar a ferramenta A operando sob avanço maior (condição 4), nota-se um comportamento crescente destes parâmetros.

Ao se analisar os valores de  $S_p$  e  $S_{pk}$  para as condições 1 e 2, que fazem uso da ferramenta B, nota-se comportamentos com grande alternância de seus valores; acredita-se que isto pode ocorrer pelo fato de que a ferramenta B é mais positiva e, portanto, tem uma aresta de corte mais frágil e suscetível ao desgaste.

## 5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e mencionados na seção anterior, conclui-se que o conjunto ferramenta-cabeçote B é mais positivo, ou seja, apresenta ângulos de saída maiores quando comparados aos do conjunto ferramenta-cabeçote A. Além do mais, a ferramenta A apresenta três camadas de revestimento, enquanto a ferramenta B é revestida por uma única camada.

Valores de avanço menores geraram melhores acabamentos superficiais, confirmando a teoria. Ao se comparar a condição 1 com a condição 2, ambas com a ferramenta B, nota-se que na condição 1, de menor avanço, obteve-se valores de rugosidade média menores, qualificando estas superfícies como de melhor acabamento superficial. Analogamente, ao se comparar as condições 3 e 4, ambas com a ferramenta A, nota-se que na condição 3, de menor avanço, também se obteve valores de rugosidade média menores.

Em relação à comparação do acabamento gerado por cada uma das ferramentas, observou-se que a ferramenta A, mesmo não sendo tão positiva e que, em teoria, não gerasse um mecanismo de formação de cavaco tão facilitado quanto a ferramenta B, gerou superfícies com melhores acabamentos superficiais e, inclusive, não apresentou valores de rugosidade com um comportamento tão alternado. Acredita-se que este fato seja justificado pela diferença dos revestimentos e pelo fato de que a ferramenta A, por não ser tão positiva, apresenta um ângulo de cunha maior, com maior volume de material em sua aresta de corte e, portanto, mais resistente aos esforços envolvidos durante a usinagem.

## 6. REFERÊNCIAS

- Eurich, A.M., 2021. *Caracterização da superfície usinada por fresamento de faceamento por meio da rugosidade ao longo da vida da ferramenta*. Dissertação de mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa.
- Diniz, A.E., Marcondes, F.C. e Coppini, N.L., 2010. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. Artliber, São Paulo.
- Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T. e Silva, M. B., 2009. *Teoria da usinagem dos materiais*. Blucher, São Paulo.
- Stephenson, D.A. e Agapiou, J.S., 2016. *Metal cutting theory and practice*. CRC Press, Nova Iorque.
- Trent, E. e Wright, P., 2000. *Metal Cutting*. Butterworth-Heinemann, California.
- Whitehouse, D.J., 1994. *Handbook of surface metrology*. Institute of Physics Publishing, Filadélfia.

## 7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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