MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

INVESTIGAÇÃO DA VIDA DA FERRAMENTA DE METAL-DURO UTILIZADA NO TORNEAMENTO A SECO DO AÇO AISI 420C ENDURECIDO PARA DIFERENTES PARÂMETROS DE CORTE

por

Marco Ismael Wilchen Becker

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, junho de 2016.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

INVESTIGAÇÃO DA VIDA DA FERRAMENTA DE METAL-DURO UTILIZADA NO TORNEAMENTO A SECO DO AÇO AISI 420C ENDURECIDO PARA DIFERENTES PARÂMETROS DE CORTE

por

Marco Ismael Wilchen Becker

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Coorientador: M. Eng. Guilherme Cortelini da Rosa

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gongalez

Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, 24 de junho de 2016.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Maria Wilchen, a qual desde cedo me educou ensinando a importância do estudo na vida de uma pessoa, me dando apoio e confiança nas minhas escolhas.

À minha namorada, Amanda Chanelle, que durante todo o curso esteve vivenciando de perto os altos e baixos de um aluno de Engenharia Mecânica, sempre me dando apoio e incentivo, tornando-se um alicerce do caminho que construí.

Ao professor André João de Souza, que desde a primeira conversa sobre o trabalho de diplomação sempre se mostrou receptivo e disposto a ajudar em quaisquer circunstâncias ao longo dos meses de trabalho.

Ao coorientador Guilherme Cortelini da Rosa, pela grande ajuda na determinação das diretrizes do trabalho, assim como na usinagem e no apoio ao decorrer do trabalho.

Ao supervisor técnico da Sandvik do Brasil S.A., Aldeci Santos, por sua cordialidade e interesse em fornecer gratuitamente os insertos de metal duro para os experimentos.

BECKER, M. I. W. **Investigação da vida da ferramenta de metal-duro utilizada no torneamento a seco do aço AISI 420C endurecido para diferentes parâmetros de corte**. 2016. 25 fls. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RESUMO

O trabalho apresenta a análise da vida de uma ferramenta de metal-duro classe S no torneamento de acabamento a seco do aço inoxidável AISI 420C endurecido a 53 HRC para diferentes combinações de parâmetros de corte. O processo foi monitorado do início ao fim, e consistiu em mensurar a largura da marca do desgaste de flanco da ferramenta, as componentes ortogonais da força de usinagem (forças passiva, de corte e de avanço) e os valores de rugosidade média (R_a) e total (R_t) da superfície usinada. Os parâmetros de corte foram estipulados dentro dos intervalos recomendados pelo fabricante. Mantendo-se a profundidade de corte constante (0,4 mm), foram definidos três valores de velocidade de corte (50; 60; 70 m/min) e três de avanço (0,08; 0,10; 0,12 mm/volta), totalizando nove ensaios de vida. Observou-se nos ensaios forte influência do mecanismo de aderência e arrastamento (*attrition*) associado ao de abrasão mecânica, os quais aceleraram os desgastes das arestas cortantes e estimularam lascamentos em duas amostras quando utilizada a maior velocidade de corte. Em uma delas, foram verificados grandes aumentos nos valores das forças passiva e de avanço (respectivamente 237% e 157%) quando o lascamento ocorreu, mostrando a importância do monitoramento dos parâmetros de saída (desgaste, força e rugosidade) na qualidade do processo. As rugosidades também apresentaram variações, atingindo um aumento de 97% para R_a e 181% para R_t.

PALAVRAS-CHAVE: Aço AISI 420C endurecido; Vida da ferramenta; Força de usinagem; Rugosidade da superfície torneada.

BECKER, M. I. W. **Carbide tool-life investigation on AISI 420C hardened stainless steel dry turning for distinct cutting conditions**. 2016. 25 fls. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ABSTRACT

This paper presents the analysis of the tool-life behavior of a class S carbide tool in the finish dry turning of the AISI 420C hardened stainless steel with 53 HRC for different combinations of cutting parameters. The process was monitored from the beginning to the end, and consisted on measuring the tool flank wear mark width, the machining orthogonal force components (passive, cutting and feed forces) and the roughness values for the profile average height (R_a) and maximum profile height (R_t) of the machined surface. The cutting parameters were stipulated between the manufacturer recommended interval. Keeping the depth of cut constant (0.4 mm), three values of cutting speed were defined (50; 60; 70 m/min) and three of feed rate (0.08; 0.10; 0.12 mm/rev), totalizing nine tool life samples. It was observed strong influence of the adhesion and creep mechanism (*attrition*) associated to the mechanical abrasion, which accelerated the cutting edge wear and stimulated the chipping in two samples when using the higher cutting speed. In one of them, it was verified large increase of the passive and feed forces (237% and 157% respectively) when the chipping occurred, showing the importance of monitoring the output parameters (tool wear, machining forces and surface roughness) in the process quality. The surface roughness also presented large variations, increasing 97% for R_a and 181% for R_t.

KEYWORDS: AISI 420C hardened stainless steel; Carbide tool-life; Machining force; Turning surface roughness.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1

2. OBJETIVO 1

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 1

3.1. Aço Inoxidável 420C 1

3.2. Ferramenta de Metal-Duro 2

3.3. Vida da Ferramenta de Corte 2

3.4. Forças no Processo de Torneamento 4

3.5. Acabamento Superficial 5

3.6. Monitoramento da Usinagem 6

3.7. Projeto e Análise de Experimentos 7

4. METODOLOGIA 8

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO 10

5.1. Vida da Ferramenta de Corte 10

5.2. Componentes Ortogonais de Força 12

5.3. Rugosidades 13

6. CONCLUSÕES 14

REFERÊNCIAS 14

APÊNDICES 16

I – Dados da Usinagem das Nove Amostras 16

II – Desgaste de flanco (VB) no fim de vida das ferramentas para as nove amostras. 17

III – Comportamento das Componentes Ortogonais da Força de Usinagem 18

IV – Perfis de Rugosidade 19

1. INTRODUÇÃO

O torneamento é um processo de usinagem onde um sólido de revolução é transformado retirando-se material de sua periferia. De acordo com Souza, 2011, os primeiros passos de pesquisa de ferramentas de corte passaram pela procura das melhores geometrias para a operação de corte. A etapa seguinte dedicou-se à busca de materiais de melhores características de resistência e durabilidade. Em seguida passou-se a combinar materiais em novos modelos construtivos sincronizando as necessidades de desempenho, custos e redução nos tempos de parada no processo produtivo. Como resultado, consagrou-se o uso de ferramentas compostas, onde o elemento de corte é um inserto montado sobre uma base.

O processo de usinagem conta com diversos parâmetros de entrada e saída. Entre os principais parâmetros de entrada, destacam-se o material da peça, o material e a geometria da ferramenta de corte, a velocidade de corte v_c [mm/min], o avanço f [mm/volta], a profundidade de corte a_p [mm] e o meio lubrirrefrigerante (p. ex. fluido de corte). Como parâmetros de saída, destacam-se as falhas na ferramenta de corte (diferentes desgastas e avarias), as componentes ortogonais da força da usinagem (força de corte F_c [N], força de avanço F_f [N] e força passiva F_p [N]) e os parâmetros de rugosidade que quantificam o acabamento da superfície usinada (rugosidades média R_a [µm] e total R_t [µm]).

Segundo Diniz *et al.*, 2013, a vida da ferramenta é o tempo que a mesma trabalha efetivamente até perder sua capacidade de corte para um critério previamente estabelecido. Os fatores que definem a fixação de um valor limite de desgaste para o fim da vida podem ser:

- os desgastes na ferramenta atingirem proporções tão elevadas que se receia a quebra da aresta de corte;
- o aumento da força de usinagem, proveniente dos desgastes elevados da ferramenta, interfere no adequado funcionamento da máquina;
- o acabamento superficial deixa de ser satisfatório.

As diferentes combinações dos parâmetros de entrada afetam diretamente o tempo de vida da ferramenta de corte, resultando em alterações nos sinais de força e influenciando o acabamento superficial da peça usinada.

2. OBJETIVO

Analisar a vida de uma ferramenta de metal-duro classe S (indicada para a usinagem de ligas especiais resistentes ao calor à base de ferro, níquel e cobalto, além de titânio e suas ligas) no torneamento a seco do aço inoxidável martensítico AISI 420C endurecido a 53 HRC para diferentes combinações de parâmetros de corte através de correlações diversas entre as variáveis de saída (desgastes, forças, rugosidades e tempos de vida) e de entrada (velocidades de corte e avanços) no torneamento desse material.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Aço Inoxidável 420C

Trata-se de um aço ligado ao cromo, inoxidável, martensítico, temperável e ferromagnético com alta resistência mecânica até a temperatura de 400°C e boa resistência à oxidação até 610°C. Quando temperado e revenido alcança durezas até 55 HRC. Não apresenta boa capacidade de conformação a frio, sendo necessário um pré-aquecimento entre 200 e 400°C. A característica inoxidável pode ser melhorada mediante a utilização de superfícies limpas e polidas, sendo necessário, portanto, a remoção de carepas formadas nas operações de soldagem, tratamentos térmicos, ou conformações a quente. Deve-se evitar revenimento na faixa de temperatura entre 425 e 525°C, onde ocorre a fragilização do material [Favorit, 2016].

O aço inoxidável AISI 420C é geralmente utilizado na fabricação de peças onde há necessidade de alta resistência mecânica aliada à ductilidade e resistência à corrosão e ao desgaste. Levando em conta tais características, Cardarelli, 2008, cita algumas aplicações,

como rolamentos, moldes, vasos de pressão, cutelaria, instrumentos cirúrgicos, partes estruturais em aeronaves e também componentes de turbinas.

A Tabela 3.1 especifica a composição química em percentual de massa do AISI 420C.

Tabela 3.1 – Composição química em percentual de massa do aço AISI 420C [Favorit, 2016].

Cromo (C_r) [%]	**Silício (S_i)** [%] máx.	**Manganês (Mn)** [%] máx.	**Carbono (C)** [%]	**Fósforo (P)** [%] máx.	**Enxofre (S)** [%] máx.
12,0 - 14,5	1,00	1,00	0,30 - 0,42	0,04	0,03

3.2. Ferramenta de Metal-Duro

Segundo Machado *et al*., 2015, o metal-duro combina as durezas em temperatura ambiente e a quente, resistência ao desgaste e tenacidade, apenas pela variabilidade de sua composição. Essencialmente, as ferramentas de metal-duro possuem dois constituintes combinados através da metalurgia do pó: carboneto de tungstênio (WC), que pode ser associado a outros carbonetos conferindo dureza à temperatura ambiente e altas temperaturas, além de resistência ao desgaste; e elemento aglomerante, geralmente cobalto (Co), com função de unir as partículas duras dos carbonetos, conferindo tenacidade ao material.

De acordo com Davim, 2011 e Machado *et al*., 2015, as classes de metal-duro são organizadas seguindo a norma ISO 513 e são divididas em seis grupos:

- P: aços de baixo e médio carbono e ligas leves;
- M: aços inoxidáveis;
- K: ferros fundidos (ou aços ligados mais duros que os indicados para as categorias P e M);
- N: ligas de alumínio;
- S: superligas e ligas resistentes ao calor;
- H: aços temperados e endurecidos (acima de 45 HRC);

Klocke, 2011, salienta o ganho de eficiência de insertos de metal-duro revestidos (com cobertura). A função principal da camada de material de alta dureza do revestimento é inibir o contato ferramenta-peça, reduzindo o desgaste causado por diferentes mecanismos tais como aderência e arrastamento (*attrition*), abrasão, difusão e oxidação. Enquanto a cobertura melhora a resistência ao desgaste e diminui a adesão entre os materiais da peça e da ferramenta, o substrato atua como suporte de dureza e tenacidade para o revestimento.

Existem dois tipos de cobertura: CVD (deposição química de vapor) e PVD (deposição física de vapor). Atualmente o PVD é mais utilizado em ferramentas de metal-duro principalmente devido à cobertura CVD gerar tensões de tração na aresta de corte da ferramenta em contraste à cobertura PVD, que resulta em tensões compressivas que retardam a formação e a propagação de trincas [Smith, 2008].

3.3. Vida da Ferramenta de Corte

Conforme Tschätsch, 2009, a vida da ferramenta é o período de tempo (expresso em minutos) para qual a aresta de corte, afetada pelo processo de usinagem, mantém sua capacidade de corte durante a operação, permanecendo funcional até certa quantidade de desgaste previamente definido em função de um critério preestabelecido.

Davim, 2008, ressalta que o próprio desgaste da ferramenta é muitas vezes utilizado como critério de fim de vida pela sua facilidade de ser determinado quantitativamente. O desgaste de flanco, por sua vez é frequentemente utilizado como critério por sua influência na rugosidade e na precisão dimensional da peça. Smith, 2008, complementa que o mecanismo de abrasão que predominantemente gera o desgaste de flanco é considerado como um comportamento “tribologicamente” normal. Este desgaste pode ser tolerado e tratado através de uma estratégia de troca de ferramenta baseada em uma expectativa de vida.

A partir do padrão de desgaste de flanco, Frederick Winslow Taylor, o pioneiro a realizar um estudo de vida da ferramenta em usinagem, relacionou o tempo de vida da ferramenta em função da velocidade de corte, apresentada na Equação 3.1:

$$T = \frac{K}{v_c^x} \tag{3.1}$$

onde v_c [m/min] é a velocidade de corte, T [min] é a vida da ferramenta tomada para desenvolver um valor de desgaste de flanco predeterminado, K e x são constantes do material determinados experimentalmente para determinadas condições de usinagem (combinação ferramenta/material/parâmetros de corte) [Davim, 2008].

Diniz *et al*., 2013, sugerem que para compor a curva de vida da ferramenta [$T = f(v_c)$] devem-se construir em primeiro lugar gráficos auxiliares, que forneçam os desgastes de flanco da ferramenta para diferentes velocidades e tempos de trabalho, em determinadas condições de usinagem, conforme a Figura 3.1.

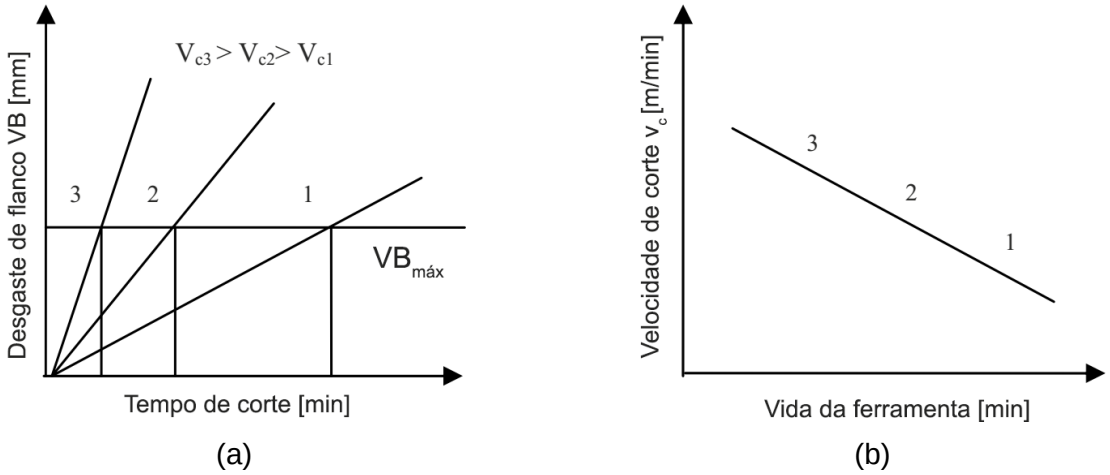


Figura 3.1 – Determinação da curva de vida da ferramenta: (a) curvas de desgaste em função do tempo de usinagem para diferentes velocidades de corte; (b) gráfico log-log da vida da ferramenta para um determinado VB_{max} [adaptado de Davim, 2008].

A progressão do desgaste é influenciada principalmente pela velocidade de corte (90%), depois pelo avanço (60%) e por último pela profundidade de corte (15%) [Klocke, 2011]. O comportamento do desgaste de flanco (*VB*), quando são usadas ferramentas de metal-duro, cresce lentamente devido à alta resistência ao desgaste das camadas de cobertura da ferramenta até atingir valores médios de *VB* da ordem de 0,3 mm a 0,4 mm. Neste momento, as camadas de cobertura já estão quase que totalmente consumidas, *i.e.*, o corte passa a ser realizado pelo substrato da ferramenta, região menos resistente, o que faz com que o desgaste de flanco passe a crescer rapidamente, chegando a valores da ordem de 0,8 mm a 1,0 mm em um curto espaço de tempo [Diniz *et al*., 2013].

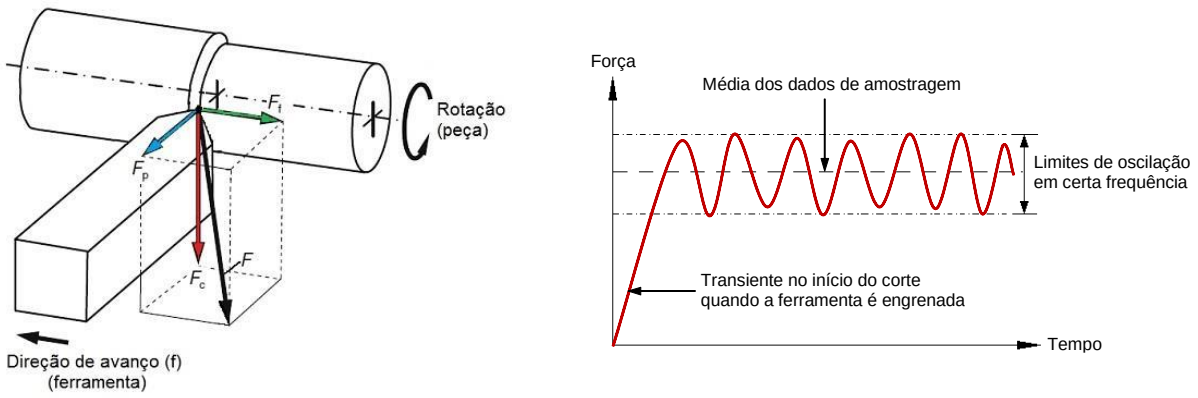
A vida da ferramenta de corte é impactada também pela presença do desgaste de entalhe (VB_N). Souza, 2011, cita que o entalhe aparece sempre nas regiões coincidentes com as laterais do cavaco (superfície de saída ou de folga) da ferramenta na usinagem de materiais de difícil corte (aços endurecidos, aços austeníticos, superligas resistentes ao calor, ligas de titânio, etc.) que geram variação da espessura do cavaco durante a sua formação (bordas serrilhadas típicas de cavacos lamelares e cisalhados). O desgaste de entalhe é devido principalmente à abrasão e ao *attrition*, fenômenos bastante influenciados pelas interações com a atmosfera [Trent e Wright, 2000]. O fluxo irregular do cavaco devido às baixas velocidades de corte facilita o mecanismo de desgaste por *attrition*. No caso, fragmentos microscópicos são arrancados da superfície da ferramenta e arrastados junto ao fluxo de material adjacente à interface peça-ferramenta [Diniz *et al*., 2013; Machado *et al*., 2015].

3.4. Forças no Processo de Torneamento

Os conhecimentos sobre a força de usinagem que age sobre a cunha cortante e sobre suas componentes são de grande importância, pois possibilitam estimar a potência necessária para o corte, bem como os esforços atuantes nos elementos da máquina-ferramenta, além de manter uma relação direta com os desgastes das ferramentas de corte, influenciando a viabilidade econômica do processo [Machado *et al.*, 2015].

A força de usinagem é influenciada pelo material da peça, pelo material, geometria e estado da ferramenta, e também pelos parâmetros de corte. Essa força possui três componentes ortogonais que agem diretamente na cunha cortante, e, por conseguinte, na máquina-ferramenta (Fig. 3.2a). A parcela tangencial projetada sobre o plano de corte é a força de corte (F_c). Geralmente é a força de maior intensidade no torneamento e também o principal fator de cálculo da potência necessária ao corte. A parcela normal à direção de corte projetada sobre o plano de avanço é a força de avanço (F_f). A componente radial projetada na direção perpendicular ao plano de trabalho é a força passiva (F_p) ou de profundidade [Souza, 2011].

A força relacionada ao processo de usinagem geralmente é composta por duas parcelas, apresentadas na Figura 3.2b. A primeira, dinâmica, é devido a vibrações (variações de avanço, velocidade, desgaste etc.); a segunda, estática, é representada pela média dos dados de amostragem.



(a) (b)

Figura 3.2 - Força de usinagem no torneamento [Nassif *et al.*, 2013]: (a) representação das componentes ortogonais; (b) parcelas estática e dinâmica.

Admitindo-se que a ferramenta não possua raio de ponta, a força de corte (F_c) pode ser definida em função da área da seção de corte (A) – calculada pelo produto entre profundidade de corte (a_p) e avanço (f) – e da pressão específica de corte (k_s), conforme Equação 3.2:

$$F_c = k_s \cdot A = k_s \cdot a_p \cdot f \tag{3.2}$$

A pressão específica de corte (k_s) é a força necessária para a remoção de uma área de corte equivalente a 1,0 mm^2. Inicialmente acreditava-se que k_s era uma característica exclusiva do material (similar à tensão de ruptura). Porém, ensaios mostraram que k_s varia principalmente com o material da peça, a geometria da ferramenta, o avanço (f), a velocidade de corte (v_c), a lubrirrefrigeração e o desgaste da ferramenta [Machado *et al.*, 2015].

Diniz *et al.*, 2013, e Machado *et al.*, 2015, apontam que k_s diminui com o aumento do avanço (f), proporcionando um corte mais dinâmico e com menor atrito. O avanço também influencia no processo de formação de cavaco. Parte do volume de material da peça deformado não se transforma em cavaco, mas sim escorrega entre a peça e a superfície de folga da ferramenta, gerando o fluxo lateral de cavaco. À medida que o avanço (f) cresce, a espessura do cavaco aumenta e o fluxo lateral de cavaco diminui, reduzindo o k_s. Assim, pode-se dizer que F_c cresce com o aumento de f (aumento de A), mas não proporcionalmente, pois k_s diminui como mostra a Figura 3.3a.

Ao usinar materiais dúcteis em baixas velocidades de corte (v_c) pode ocorrer o mecanismo de aderência do material na ferramenta, que modifica a geometria da aresta de corte (formação de aresta postiça) e, por conseguinte, os valores da pressão específica de corte (k_s). Com o aumento de v_c, os valores de k_s tendem a diminuir por causa da redução da deformação e da dureza do material usinado, bem como dos coeficientes de atrito que o aumento da temperatura proporciona com o acréscimo de v_c [Machado *et al*., 2015; Klocke, 2011]. A Figura 3.3b ilustra esse comportamento.

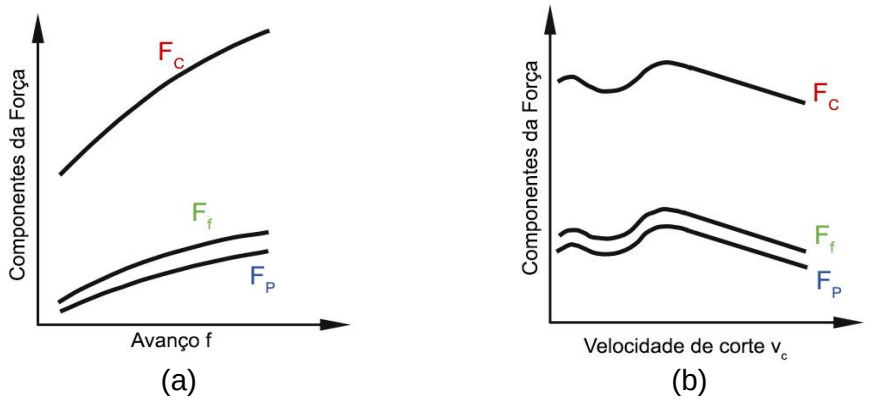


Figura 3.3 - Comportamento das componentes da força de usinagem em relação a: (a) avanço; (b) velocidade de corte [adaptado de Klocke, 2011].

A pressão específica de corte também é influenciada pelos desgastes de flanco (superfície de folga) e de cratera (superfície de saída) da ferramenta. O primeiro faz com que k_s aumente à medida que o desgaste cresce devido ao maior atrito entre peça e ferramenta. O segundo faz com que k_s diminua, pois o ângulo de saída da ferramenta aumenta com o desgaste, diminuindo a deformação do cavaco e facilitando o corte [Diniz *et al*., 2013].

3.5. Acabamento Superficial

O acabamento de uma superfície usinada é a combinação de vários fatores que podem ser divididos em rugosidade, ondulações e falhas.

Ondulações consistem de irregularidades superficiais ou erros geométricos cujos espaçamentos são maiores que as irregularidades consideradas rugosidades. Podem ser causadas por vibrações e flexões da ferramenta e/ou da peça devido à força de usinagem, temperatura de corte ou erros de fixação da peça ou ferramenta [Machado *et al*., 2015].

Marco Filho e Stockler Filho, 2009, definem como rugosidade um conjunto de finas irregularidades, pequenas saliências e asperezas que caracterizam uma superfície, resultantes da ação inerente ao processo de corte (marcas de avanço, rebarbas, aresta postiça de corte, desgaste da ferramenta etc.), podendo ser medidas através de um rugosímetro.

Segundo Machado *et al*., 2015, ondulações e falhas devem ser evitadas na fabricação de uma superfície, pois representam erros de fabricação. A rugosidade, entretanto, é um parâmetro especificado de acordo com a aplicação da superfície técnica a ser usinada.

Dentre os muitos parâmetros para a avaliação da rugosidade normalizados por diferentes organizações (ISO, DIN, JIS), o mais utilizado na quantificação de rugosidade é o desvio aritmético médio ou rugosidade média (R_a).

A rugosidade média é amplamente empregada como parâmetro de controle de qualidade, uma vez que alterações no seu valor apresentam alterações no processo, em especial no desgaste da ferramenta. Como representa um valor médio, é um parâmetro estável, que não recebe influência de efeitos ocasionais. Embora bastante vantajoso, o parâmetro R_a, isoladamente, não é suficiente para identificar algumas características importantes da superfície. Neste caso, pode-se empregar a altura total do perfil ou rugosidade total (R_t), pois o parâmetro é influenciado por qualquer defeito ou irregularidade na superfície [Machado *et al*., 2015]. A Figura 3.4 ilustra graficamente os perfis de rugosidade média e total.

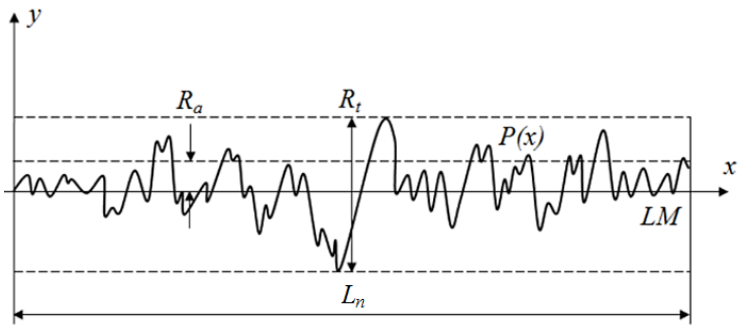


Figura 3.4 – Representação gráfica das rugosidades média (R_a) e total (R_t) na superfície de uma amostra com comprimento L_n [Souza *et al*., 2014].

O comprimento de amostragem, L_r (ou *cut-off*), é definido, segundo a norma ABNT NBR ISO 4287, 2002, como sendo o comprimento na direção do eixo *x* usado para identificar as irregularidades características do perfil sob avaliação. Já o comprimento de avaliação, L_n, é entendido como sendo o comprimento na direção do eixo usado para estabelecer o perfil em avaliação e pode conter um ou mais comprimentos de amostragem. É recomendado um comprimento de avaliação equivalente a cinco vezes o comprimento de amostragem de forma a obter uma maior confiança nos dados. Para uma faixa de valores de rugosidade média de 0,1 μm ≤ R_a < 2,0 μm é recomentado utilizar L_f = 0,8 mm e para uma faixa de valores de (2 μm ≤ R_a < 10 μm), L_f = 2,5 mm [Machado *et al*., 2015].

Davim, 2010, cita que as dimensões de rugosidade em uma superfície usinada são influenciadas pela combinação do raio de ponta (r_ε [mm]), do avanço (*f* [mm/volta]) e da estabilidade da peça e ferramenta. A rugosidade média teórica ($R_{a\text{-teórica}}$) é definida pela Equação 3.3 e a rugosidade máxima teórica ($R_{máx\text{-teorica}}$) pela Equação 3.4.

$$R_{a\text{-teórica}}\ [\mu m] = \frac{1000 \cdot f^2}{18\sqrt{3} \cdot r_\varepsilon} = 32{,}075 \cdot \frac{f^2}{r_\varepsilon} \tag{3.3}$$

$$R_{máx\text{-teórica}}\ [\mu m] = \frac{1000 \cdot f^2}{8 \cdot r_\varepsilon} = 125 \cdot \frac{f^2}{r_\varepsilon} \tag{3.4}$$

Assim, pelas equações teóricas, $R_{máx\text{-teorica}} \cong 4 \cdot R_{a\text{-teórica}}$

3.6. Monitoramento da Usinagem

Lauro *et al*., 2014, explicam que o monitoramento da usinagem representa economia e praticidade ajudando a identificar o desgaste da ferramenta, a rugosidade e anomalias do material usinado. As técnicas de monitoramento são categorizadas em diretas e indiretas, podendo medir valores para os desgastes, forças, vibração, temperatura e emissão acústica:

- Medidas diretas: o valor associado ao mensurando resulta naturalmente da aplicação do sistema de medição sobre este. Requer que o processo seja interrompido.
- Medidas indiretas: envolve a determinação do valor associado ao mensurando a partir da combinação de duas ou mais grandezas por meio de expressões matemáticas. Pode acompanhar e avaliar a grandeza física em tempo real.

O monitoramento indireto das forças atuantes na ferramenta em um processo de corte com parâmetros fixos possibilita o conhecimento do estado da mesma a partir da análise microscópica do desgaste de flanco e da rugosidade. A partir deste monitoramento, pode-se definir um padrão no comportamento do sinal de força obtido a fim de determinar o fim de vida da ferramenta para os parâmetros de corte e material utilizado.

Com relação ao desgaste da ferramenta, o mesmo pode atuar sobre a força de diferentes maneiras. Como já mencionado, o desgaste de cratera pode diminuir as forças

envolvidas, modificar a geometria do cavaco e piorar a qualidade superficial; já o desgaste de flanco tende a aumentar as forças devido ao maior atrito no contato entre peça e ferramenta. A medição das forças mostra-se eficaz na detecção de falhas transitórias na aresta de corte da ferramenta. Em geral, uma mudança brusca e repentina no nível de amplitude do sinal de força indica fratura (lascamento ou quebra) na ferramenta [Souza, 2011].

O monitoramento das forças pode ser realizado através do uso de um dinamômetro piezelétrico. Klocke, 2011, define que o sinal piezelétrico é causado através da interação entre o estado mecânico e elétrico dos cristais. Ao deformar a malha de cristais através do eixo, os elementos positivos e negativos são deslocados relativamente entre si, gerando um momento do dipolo elétrico. A carga gerada (em Coulomb) pode ser convertida em um sinal de tensão elétrica (em volts) através de um condicionador de sinais. Os sinais analógicos são lidos e convertidos para digitais em uma placa de aquisição de dados com fundo de escala de ±10 V. Assim é possível visualizar graficamente em um computador a força com os pontos obtidos ao longo do tempo através de um software que realize o processamento dos sinais digitais.

Outro mensurado (parâmetro de saída do processo) que pode ser monitorado durante a usinagem é a rugosidade. Neste caso, realiza-se a medição direta. O aparelho empregado na medição direta da rugosidade é chamado rugosímetro.

Marco Filho e Stockler Filho, 2009, citam que o rugosímetro é composto por quatro partes: apalpador, unidade de acionamento, amplificador e registrador. O apalpador tem a função de deslizar sobre a superfície que será verificada, levando os sinais da agulha apalpadora de diamante até o amplificador. A unidade de acionamento desloca o apalpador sobre a superfície numa velocidade constante e por uma distância desejável, mantendo-o na mesma direção. O amplificador contém a parte eletrônica principal, dotada de um indicador de leitura que recebe os sinais da agulha, amplia-os e os calcula em função do parâmetro de rugosidade escolhido. O registrador é um acessório do amplificador e fornece a reprodução do corte efetivo da superfície. Assim, o processo de determinação da rugosidade consiste em percorrer a superfície a ser avaliada com um apalpador de formato normalizado, acompanhado de uma guia em relação ao qual ele se move verticalmente. Enquanto o apalpador acompanha a rugosidade, a guia acompanha as ondulações da superfície. O movimento da agulha é transformado em impulsos elétricos e registrado no mostrador.

3.7. Projeto e Análise de Experimentos

Experimento é um procedimento planejado, partindo de uma hipótese, que visa provocar fenômenos em condições controladas, observar e analisar seus resultados. Um experimento é constituído, basicamente, por um conjunto de unidades experimentais, sobre as quais são aplicados os tratamentos, de forma causada, das quais se obtêm os dados experimentais [Souza *et al.*, 2002].

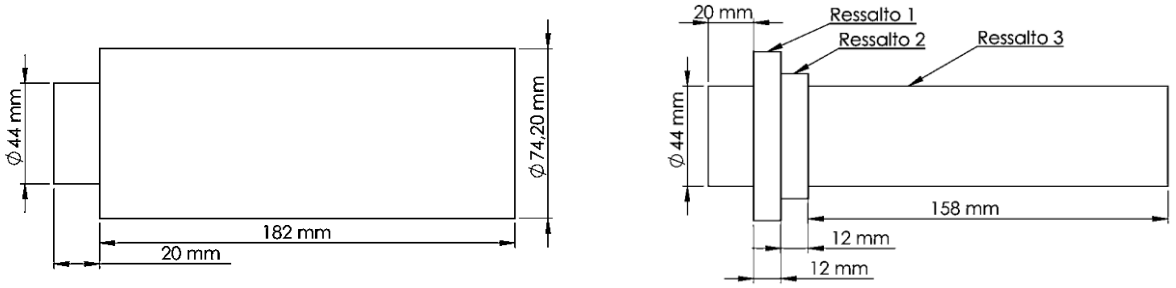
Também conforme Souza *et al.*, 2002, para planejar um experimento, é preciso definir a unidade experimental e a variável em análise. Também é preciso definir os tratamentos em comparação e a maneira de designar os tratamentos às unidades. Isto é, em geral, simples de se realizar. No entanto, pode ser extremamente difícil estabelecer a forma de medir a variável que se pretende estudar.

Muitos experimentos envolvem o estudo dos efeitos de dois ou mais fatores. Em geral, Projetos e Análises de Experimentos (PAE) ou *Design of Experiments* (DOE), é o método mais eficiente para este tipo de estudo.

Em um esquema fatorial, todas as combinações possíveis dos fatores são investigadas, onde o efeito de um fator é definido através da resposta produzida por uma mudança do nível do fator em questão. Isso é chamado de efeito principal, porque se refere aos fatores primários de interesse no experimento. Se todos os fatores possuem valores fixos, pode-se facilmente formular e testar hipóteses sobre os efeitos principais e interações utilizando a análise de variâncias (ANOVA). Projeto e Análise de Experimentos envolve um método de otimização estatística que visa trabalhar de forma simultânea para correlacionar os efeitos principais dos fatores estudados sobre as variáveis de respostas de interesse (por exemplo, as componentes da força de usinagem, o tempo de vida da ferramenta e as rugosidades), bem como as interações entre fatores (por exemplo, a velocidade de corte e o avanço) [Montgomery, 2013].

4. METODOLOGIA

A geometria dos corpos de prova utilizados nos ensaios é apresentada na Figura 4.1. Os corpos de prova foram endurecidos por têmpera em óleo com posterior revenimento, obtendo-se assim uma dureza uniforme de (53 ± 2) HRC livre de tensões residuais.



(a) (b)

Figura 4.1 – Geometria do corpo de prova: (a) antes da usinagem; (b) após a usinagem.

Nos ensaios foram utilizados insertos de metal-duro para usinagem de acabamento da Sandvik Coromant, modelo TNMG 16 04 04-SF 1105, com formato triangular básico negativo (T-Max P), mostrada na Figura 4.2.

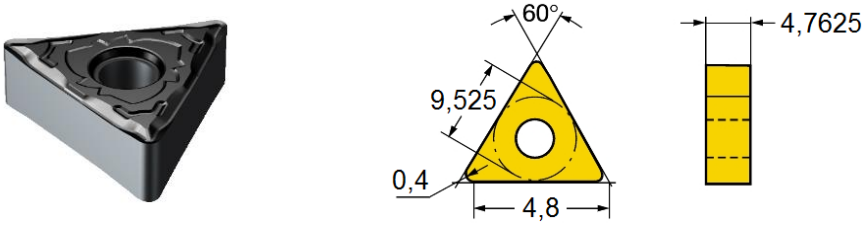


Figura 4.2 – Ferramenta de corte Sandvik TNMG 16 04 04-SF 1105 [Sandvik, 2016a].

De acordo com Sandvik, 2016a, o substrato da classe 1105 é composto de grãos ultrafinos e duros de carboneto de tungstênio (WC), conferindo alta dureza a quente e boa resistência contra deformação plástica. A cobertura de nitreto de titânio-alumínio (TiAlN) por deposição física de vapor (PVD) garante tenacidade, desgaste de flanco uniforme e excepcional desempenho em superligas e ligas especiais resistentes ao calor.

A Tabela 4.1 indica os parâmetros de corte recomendados pela Sandvik.

Tabela 4.1 – Especificações dos insertos [Sandvik, 2016b].

Geometria	**Especificação**	**Parâmetros de corte**		
		v_c [m/min]	f [mm/volta]	a_p [mm]
Standard	TNMG 16 04 04 - SF 1105	65-80	0,08-0,22	0,15-1,5

O porta-ferramentas utilizado é o da Sandvik modelo DTJNL 2020 K16, e possui ângulo de posição χ_r = 93° e sistema de fixação do tipo cunha-grampo.

Assim, seguindo as recomendações do fabricante, os parâmetros de usinagem foram propostos conforme mostra a Tabela 4.2. No caso, optou-se por manter a profundidade de corte (a_p) constante e igual ao raio de ponta da ferramenta (r_ε = 0,4 mm) devido ao fato de a progressão do desgaste de flanco ser pouco influenciado pela profundidade de corte em relação à velocidade de corte (v_c) e ao avanço (f) [Diniz *et al.*, 2013; Machado *et al.*, 2015]. Além disso, o valor de a_p pode possibilitar uma boa visualização de uma possível formação de

entalhe, pois a mesma poderá ocorrer no final do raio de ponta, isto é, a uma distância da borda da ferramenta de r_ε = 0,4 mm, já que no caso, o valor da largura do cavaco (*b*) será similar ao da profundidade de corte (a_p), pois $\text{sen}\chi_r = a_p/b \cong 1$.

Tabela 4.2 – Parâmetros de corte utilizados.

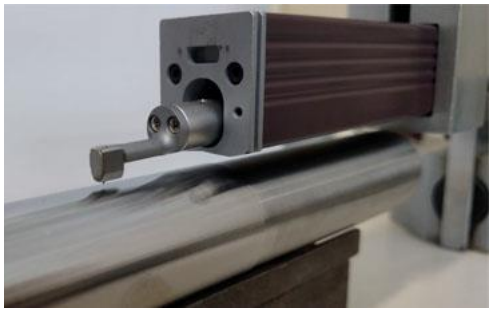
Amostra	1	2	3	4	5	6	7	8	9
v_c [m/min]	50	60	70	50	60	70	50	60	70
***f* [mm/volta]**	0,08			0,10			0,12		

Os experimentos consistiram em realizar o torneamento longitudinal externo dos corpos de prova apresentados na Figura 4.1a no Torno CNC Mazak modelo Quick Turn Nexus 100-II disponível no Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS-UFRGS).

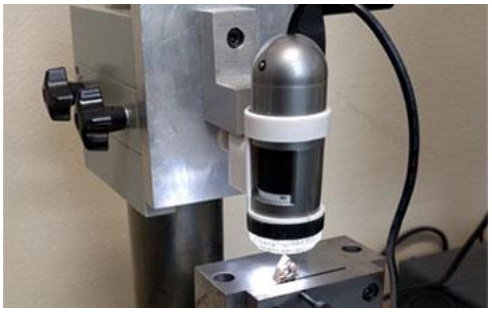
A partir da combinação de parâmetros de entrada (Tab. 4.2), foram realizados nove ensaios de fim de vida. No projeto de experimentos foi definida a interrupção da usinagem da peça para cada ressalto em função do valor da largura da marca de desgaste de flanco (VB). O primeiro passe, com comprimento de 182 mm, definiu o “Ressalto 1”, onde foi possível obter os dados de rugosidade média (R_a) e total (R_t) para a ferramenta nova (VB = 0). Ao longo deste primeiro passe, também foram coletados os dados de força, a fim de registrar o comportamento da aresta de corte em estado novo para cada amostra. Para o “Ressalto 2”, foram planejadas medições deste desgaste a cada cinco passes realizados até que a ferramenta atingisse o valor de VB $\cong$ 0,1 mm. Após atingir este valor, prosseguiu-se a usinagem com o mesmo inserto até um valor de VB $\cong$ 0,2 mm, definindo assim o “Ressalto 3”. Portanto, o “Ressalto 3” corresponde ao último passe, *i.e.*, a ferramenta atingiu o seu fim de vida. Esta metodologia possibilitou as medições das rugosidades ao final da usinagem do corpo de prova (Fig. 4.1b).

Para medição das rugosidades foi usado o rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-201, com resolução de 0,01 µm, empregando *cut-off* de acordo com a norma ABNT NBR ISO 4287, 2002. O rugosímetro em questão possui calibração datada do ano de 2014 para tendência (Td = −0,0370 µm) e repetitividade (Re = ±0,0383 µm) com 95% de confiança (Fig. 4.3a)

O desgaste na superfície de folga da ferramenta (desgaste de flanco) foi analisado e quantificado através do microscópio digital USB Dino-Lite modelo AM-413ZT, com resolução de 1024 x 728 pixels e ampliação de 50x (Fig. 4.3b).



(a)



(b)

Figura 4.3 – Equipamentos para medição de rugosidade e desgaste:
(a) Rugosímetro portátil SJ-201; (b) Microscópio digital AM-413ZT.

Os dados das componentes ortogonais da força de usinagem foram obtidos no passe seguinte à interrupção do corte para a medição do desgaste com o propósito de avaliar o comportamento das forças referentes aos valores de desgaste medidos. A aquisição de sinais de força para as amostras torneadas foi feita utilizando um dinamômetro piezelétrico modelo Kistler 9129AA. Na Figura 4.4 são representadas as componentes ortogonais da força de usinagem – força passiva (F_p), força de corte (F_c) e força de avanço (F_f) – dispostas pelos eixos X, Y e Z, respectivamente no dinamômetro.

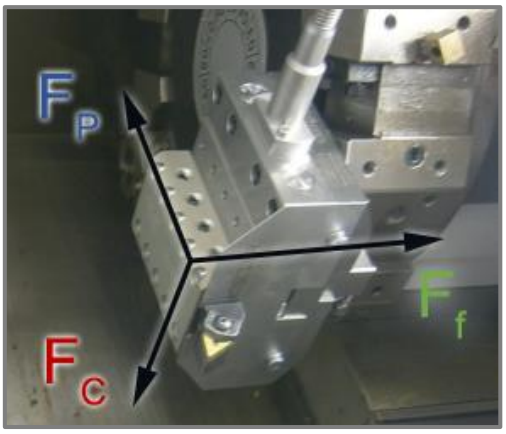


Figura 4.4 – Dinamômetro Kistler 9129A acoplado ao Torno CNC Mazak QTN 100-II [adaptado de Nassif *et al*., 2013].

A carga elétrica (em pico-Coulomb) gerada pela deformação da malha de cristais piezelétricos do dinamômetro Kistler 9129A é convertida em sinal de tensão elétrica (em volts) através de um condicionador de sinais modelo Kistler 5070A.

Os sinais analógicos obtidos são lidos e convertidos para digitais em uma placa de aquisição de dados Measurement Computing modelo PCIM-DAS 1602/16 a uma taxa de aquisição de 30000 pontos por segundo (30 kS/s) com duração de dois segundos no início de cada passe com auxílio do *software* LabVIEW 8.6.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A correlação entre os parâmetros de entrada e saída foi realizada através de análise fatorial completa (DOE) pelo *software* Minitab®17. A Tabela A1 (Apêndice I) apresenta a variação dos parâmetros de entrada e suas respostas para as nove combinações (amostras).

5.1. Vida da Ferramenta de Corte

Através do estudo estatístico dos efeitos principais para o tempo de vida (*T*) da ferramenta de corte (Fig. 5.1) é possível notar o forte impacto do desgaste de flanco (*VB*), seguido pela velocidade de corte (v_c) e uma pequena variação devida ao avanço (*f*).

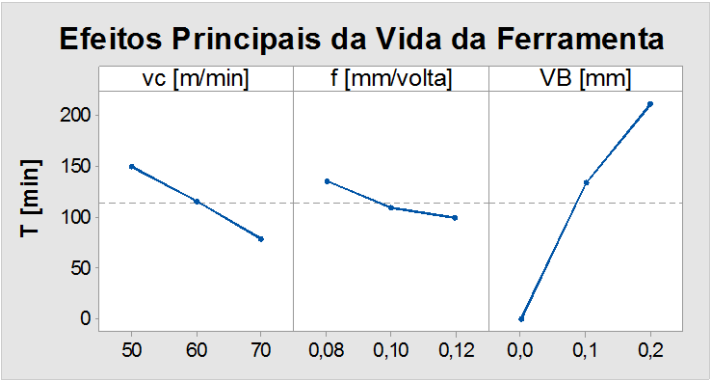
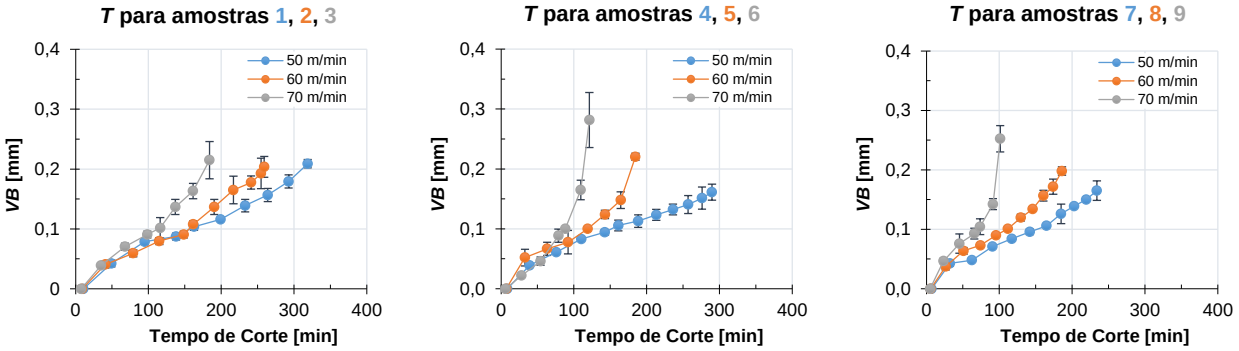


Figura 5.1 – Gráfico de efeitos principais da vida da ferramenta.

Diniz *et al*., 2013, mencionam que a progressão do desgaste da ferramenta é influenciada principalmente pela velocidade de corte, pois com o aumento da mesma, aumenta-se a energia (calor) imputada ao processo, sem um acréscimo da área da ferramenta para dissipar tal energia. O aumento do avanço também acrescenta mais energia ao processo, porém também aumenta a área da ferramenta que recebe este calor.

A Figura 5.2 apresenta os gráficos das curvas de vida obtidas com os dados de desgaste de flanco (*VB*) coletados ao longo da usinagem de todos os corpos de prova, considerando uma confiança de 95,45% (duas vezes o desvio-padrão) da amostra de valores medidos. Nota-se que as curvas seguem o comportamento similar ao apresentado na Figura 3.1a, onde o aumento da velocidade de corte (v_c) impacta substancialmente no tempo de vida (*T*) da ferramenta de corte.

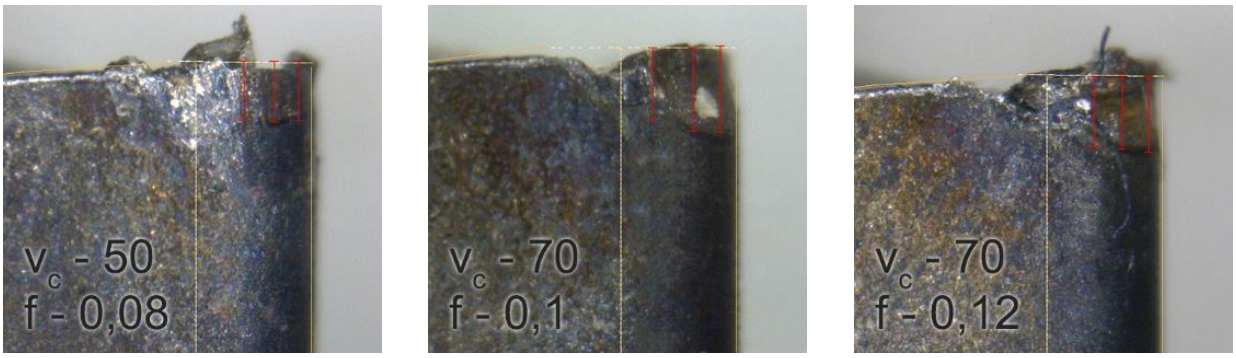


(a) *f* = 0,08 mm/volta (b) *f* = 0,10 mm/volta (c) *f* = 0,12 mm/volta

Figura 5.2 – Progressão do desgaste de flanco (*VB*) em função do tempo de usinagem para diferentes velocidades de corte (v_c) e avanços (*f*).

Através da análise das ferramentas via microscópio digital (Apêndice II, Figura A1) torna-se evidente a presença de material aderido na superfície de folga. De acordo com Diniz *et al*., 2016, devido à ductilidade do aço inoxidável, a extrusão de material entre a ferramenta e a peça é possível com a presença de adesão de material no flanco, a qual gera *attrition* (aderência e arrancamento). Este processo é acompanhado pela abrasão que contribui com a remoção das camadas de cobertura, aumentando o atrito entre a peça e a ferramenta, tornando o mecanismo de *attrition* ainda mais influente. Ao observar a linha vertical em amarelo que expressa o raio de ponta da ferramenta (coincidente com a profundidade de corte), é possível ver um desgaste em formato de "V" para todas as arestas. Trata-se do desgaste de entalhe, causado pelo *attrition*. Machado *et al*., 2015, mencionam que o mecanismo de *attrition* ocorre a baixas velocidades de corte com possível aparecimento de aresta postiça de corte; entretanto, deixa claro que essa afirmação é relativa, visto que se o fluxo de material que incide na superfície de saída for irregular, também a altas velocidades, pode favorecer o *attrition*. A presença da aresta postiça de corte não foi detectada durante a usinagem das nove amostras.

Ao investigar as amostras 1, 6 e 9 (Fig. 5.3), nota-se que houve lascamento na quina das duas últimas (situações mais severas que na amostra 1), com grande quantidade de material aderido na aresta da amostra 9.



Amostra 1 Amostra 6 Amostra 9

Figura 5.3 – Estado final do desgaste de flanco (VB) das ferramentas utilizadas: as linhas em vermelho mostram as medidas das larguras das marcas de desgaste de flanco.

Já na amostra 1, observa-se a presença do material aderido, dada sua coloração e aparecimento de rebarbas acima da aresta principal de corte. A amostra 6 mostra o lascamento com aparência áspera, indicando como causa provável um prévio arrancamento de material aderido com partículas do substrato da ferramenta.

5.2. Componentes Ortogonais de Força

Os efeitos principais das componentes da força de usinagem na análise fatorial ilustram o comportamento de cada componente referente aos parâmetros velocidade de corte (v_c), avanço (f) e desgaste de flanco (VB). As componentes são ilustradas na Figura 5.4.

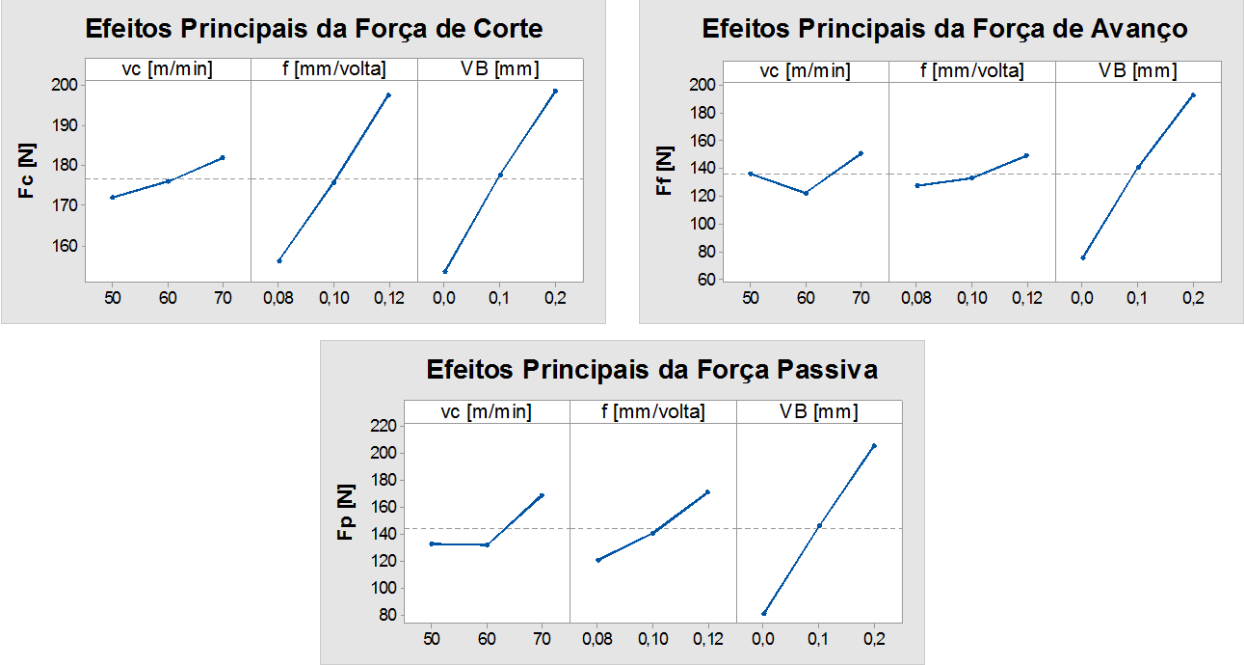


Figura 5.4 – Gráficos de efeitos principais das componentes da força de usinagem.

O fator de maior impacto no valor médio das forças foi o de desgaste de flanco (VB) para as três componentes, comprovando a relação entre as forças e o desgaste previamente mencionada. A força de corte (F_c) mostrou também sua dependência com o avanço (f), comportamento apresentado na Figura 3.3a, seguido de uma pequena influência para a velocidade de corte (v_c). A força de avanço (F_f) apontou variabilidade quase que exclusiva para VB, com pouco aumento provindo de f. Um comportamento semelhante ao da F_f foi visto na força passiva (F_p), em que f apresentou um impacto relativamente maior na grandeza média da F_p. Para as componentes F_f e F_p, a v_c apresentou comportamento indefinido, ora diminuindo, ora mantendo-se constante, passando a crescer a partir de 60 m/min para 70 m/min.

Os efeitos principais alegados são comprovados pela a Figura A2 (Apêndice III), onde é aceitável afirmar que há uma progressão pouco acentuada para as forças ao longo do desgaste, exceto para a amostra 9 (lascada), com uma brusca variação nas componentes ortogonais (F_p = 237%; F_f = 157% e F_c = 25%) ao fim de vida, sustentando a afirmação de Klocke, 2011, de que as componentes aumentam devido ao crescimento da superfície de atrito entre ferramenta e peça. Pode-se também considerar o aumento das componentes proveniente da modificação da geometria da aresta devido ao lascamento.

Como visto na Seção 5.1 (Vida da Ferramenta de Corte), a amostra 6 também sofreu lascamento, mas os dados apresentados na Figura A2c (Apêndice III) representam as componentes da força de três passes anteriores ao fenômeno, demonstrando um comportamento, até então, pouco acentuado com a progressão do desgaste de flanco.

5.3. Rugosidades

Assim como nas forças, os efeitos principais para a rugosidade média (R_a) e rugosidade total (R_t) (Fig. 5.5) visam correlacionar os fatores de maior influência nas grandezas.

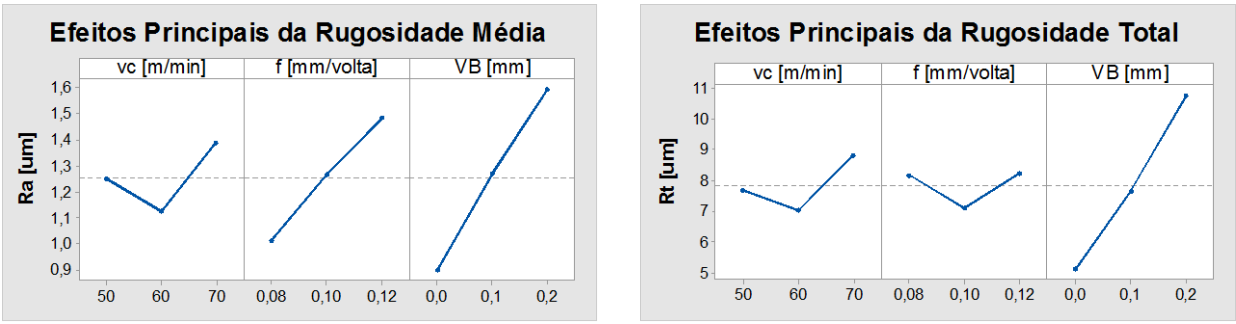


Figura 5.5 – Gráficos de efeitos principais para as rugosidades das superfícies usinadas.

O estudo da Figura 5.5 demonstra a forte influência do desgaste de flanco (*VB*) sobre o aumento de ambas as rugosidades. Também se observa a influência do avanço (*f*) na rugosidade média (R_a), em consonância com a Equação 3.3. O efeito da velocidade (v_c) sobre a rugosidade é variável. Isto provavelmente se deve à instabilidade do sistema máquina-ferramenta-peça. Isto pode gerar vibrações que alteram as forças e as rugosidades.

A Figura 5.6 traz a variação das rugosidades (R_a e R_t) com a evolução do desgaste *VB* para os diferentes valores de *f* e v_c. Para a representação dos valores médios de R_a levou-se em conta a compensação do erro sistemático do rugosímetro (–0,0370 μm). As incertezas são expressas em barras de erro definidas pela soma da repetitividade do instrumento (±0,0383 μm) com o módulo da máxima variação da indicação em relação à média das indicações ($\Delta I_{máx}$). A representação de R_t é dada pelas médias dos valores obtidos, e a incerteza foi representada em barras de erro com confiança de 95,45%.

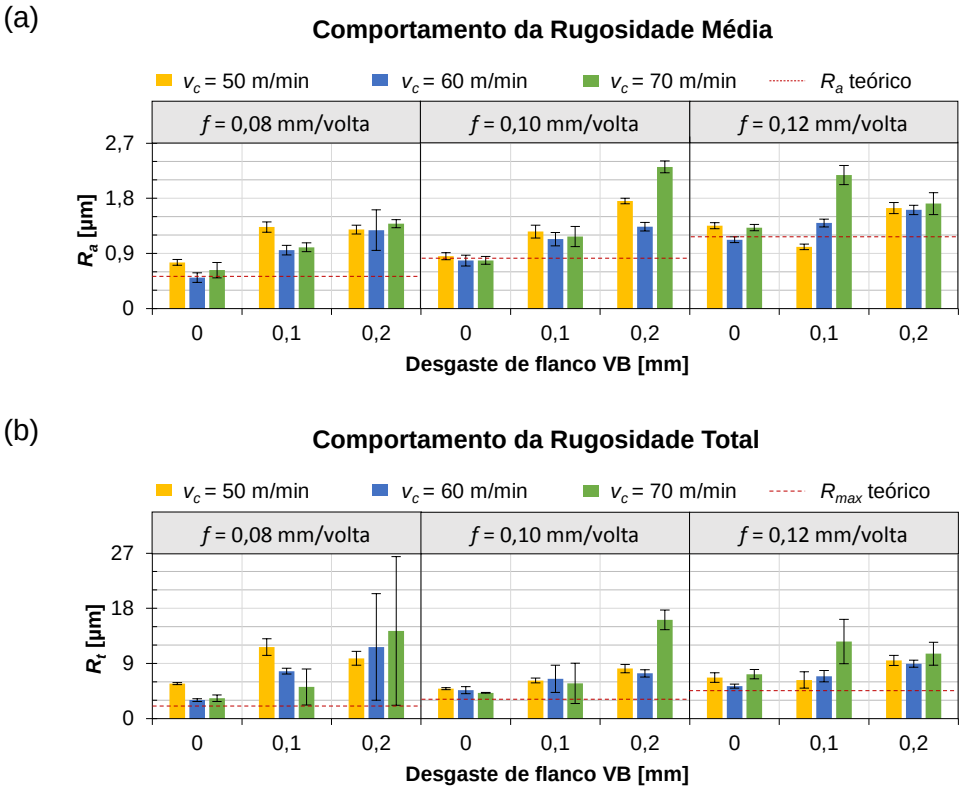


Figura 5.6 – Variação das rugosidades ao longo do desgaste de flanco.

Os gráficos das Figuras 5.6a e 5.6b mostram linhas pontilhadas de valor constante, definidas como as rugosidades média e máxima teóricas, calculadas respectivamente através das Equações 3.3 e 3.4 para o raio de ponta (r_ε = 0,4 mm) e os respectivos valores de *f*. Ao visualizar os valores teóricos em contraste com os medidos, fica evidente a influência do desgaste VB nas rugosidades aumentando progressivamente, como também a variabilidade da influência de v_c na rugosidade para o intervalo de valores usinados.

Examinando as rugosidades das superfícies usinadas provindas das arestas lascadas com *VB* = 0,2 mm (amostras 6 e 9), é possível notar um aumento expressivo dos valores de R_a e R_t para amostra 6 (respectivamente 97% e 181%) em comparação com os valores obtidos para *VB* = 0,1 mm. Apesar de lascada, a aresta da amostra 9 não retratou tal comportamento, inclusive, diminuindo os valores de R_a e R_t (respectivamente -21% e -15%) em relação aos valores para *VB* = 0,1 mm. Tal fato pode ser devido ao material aderido no inserto (amostra 9), criando condições favoráveis à aresta de corte para gerar a textura da superfície usinada. Em contraponto, o inserto da amostra 6 apresenta pouco material aderido, restringindo-se a apenas na linha de profundidade de corte.

De acordo com a Figura 5.6b, a amostra 2 (v_c = 60 m/min e *f* = 0,08 mm/volta) e a amostra 3 (v_c = 70 m/min e *f* = 0,08 mm/volta) denotam baixa confiança dos valores médios de R_t para o fim de vida (*VB* = 0,2 mm), resultando em barras de erro de grande amplitude. Levando em consideração que a rugosidade total resulta da subtração entre os máximos e mínimos medidos no comprimento de amostragem, é admissível afirmar que as três medições realizadas apresentam perturbações na superfície, com cada medição divergindo do valor médio, justificando a amplitude das barras de erro. A Figura A3 (Apêndice IV) detalha os perfis de rugosidade para as duas amostras mencionadas, com um comparativo do perfil de rugosidade da ferramenta sem desgaste para a amostra 2 (Figura A3a). As perturbações registradas podem ser ligadas ao desgaste da ferramenta, ao arrancamento de material pelo mecanismo de *attrition*, e até mesmo pelo fluxo irregular do cavaco.

6. CONCLUSÕES

Os resultados permitiram, com sucesso, estudar a vida da ferramenta de corte classe "S" no torneamento do aço AISI 420C endurecido a (53 ± 2) HRC, correlacionando o impacto da progressão do desgaste de flanco (VB) com as respostas de força e rugosidade.

A partir da análise de vida da ferramenta é plausível afirmar que o mecanismo de desgaste por aderência e arrastamento (*attrition*) foi o principal catalisador para o desgaste (VB), influenciando o mecanismo de abrasão e, portanto, acelerando o processo.

Pode-se dizer que o monitoramento das componentes ortogonais da força de usinagem permite avaliar indiretamente os desgastes nas ferramentas, principalmente através das forças de avanço (F_f) e passiva (F_p). Isso possibilita também detectar fenômenos prejudiciais ao corte, como por exemplo, o lascamento, em que gerou um aumento abrupto da força.

As rugosidades média (R_a) e total (R_t) mostraram-se importantes para verificar o fim de vida das ferramentas com base na qualidade superficial das peças usinadas, visto que os perfis de rugosidades são gravemente afetados ao longo das progressões dos desgastes.

O inserto não se mostrou adequado para a usinagem do aço AISI 420C endurecido com velocidade de corte (v_c) em 70 m/min. Mesmo este valor estando dentro do intervalo indicado pelo fabricante, o mesmo apresentou lascamento da aresta de corte em duas de três amostras.

Levando-se em conta o volume de material removido por vida da ferramenta, conclui-se que a melhor combinação de parâmetros foi a que gerou a amostra 8 (v_c = 60 m/min, *f* = 0,12 mm/volta), tanto para a interrupção do corte em VB = 0,1 mm como para VB = 0,2 mm, respectivamente 333 e 542 cm^3 de material retirado, com valores de R_a em torno de 1,40 μm.

REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas); **"NBR ISO 4287 – Especificações Geométricas do Produto (GPS) – Rugosidade - Método do Perfil – Termos, Definições e Parâmetros de Rugosidade"**, Rio de Janeiro, 2002.

Cardarelli, F.; **“Materials Handbook: A Concise Desktop Reference”**, 2.ed., London, Springer-Verlag, 2008, 95p.

Davim, J. P.; **“Machining of Hard Materials”**, London, Springer-Verlag, 2011.

Davim, J. P.; **“Machining: Fundamentals and Recent Advances”**, London, Springer-Verlag, 2008.

Davim, J. P.; **“Surface Integrity in Machining”**,London, Springer-Verlag, 2010.

Diniz, A.; Machado, A. R.; Corrêa, J. G.; **“Tool wear mechanisms in the machining of steels and stainless steels”**, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, First online: 12 April 2016, 12p.

Diniz, A.; Marcondes, F.C.; Coppini, N.L.; **“Tecnologia de Usinagem dos Materiais”**, São Paulo, Artliber, 8.ed., 2013.

Favorit; **“Aço AISI 420C”**. Disponível em: www.favorit.com.br. Acesso em 12/04/2016.

Klocke, F.; **“Manufacturing Processes 1, Cutting”**, Berlin, Springer-Verlag, 2011.

Lauro, C.H.; Brandão, L.C.; Baldo, D.; Reis, R.A.; Davim, J.P.; **“Monitoring and processing signal applied in machining processes – A review”**, Measurement, v.58, p. 73-86, 2014.

Machado, A. R.; Abrão, A. M.; Coelho, R. T.; Silva, M. B.; **“Teoria da Usinagem dos Materiais”**, 3.ed., São Paulo, Blucher, 2015.

Marco Filho, F.; Stockler Filho, J.; **“Apostila de Metrologia”**, UFRJ, R. Janeiro, 2009.

Montgomery, D. C.; **“Design and Analysis of Experiments”**, 8.ed., John Wiley., 2013.

Nassif, F. P.; Rosa, G. C.; Souza. A. J. **“Analysis of the resulting machining forces by using standard and wiper cutting tools in dry finish turning of AISI 420”**, 22nd International Congress of Mechanical Engineering (Annals of the XXII COBEM), November 3-7, Ribeirão Preto, SP, Brazil, 2013.

Sandvik, 2016a, **“Usinagem de Peças Pequenas: Ferramentas de Corte”**, Sandvik Coromant, p.A107.

Sandvik, 2016b, **“TNMG 16 04 04-SF 1105”**, Disponível em www.sandvik. coromant.com. Acesso em 08/03/2016.

Smith, G. T.; **“Cutting Tool Technology”**, London, Springer-Verlag, 2008.

Souza, A. J.; **“Processos de Fabricação por Usinagem, Parte 2: Processos de Usinagem com Ferramentas de Geometria Definida”**, UFRGS, Apostila, 2011, 93p.

Souza, A. J.; Azambuja, A. S.; Mello, M. S.; Rosa, G. C.; **“Análise comparativa da vida das ferramentas de corte alisadora (wiper) e convencional (standard) no torneamento de acabamento do aço SAE 4140”**, 7º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (Anais do VII COBEF), 15-19 Abr., Penedo, Itatiaia, RJ, 2014.

Souza, A. M.; Ethur, A. B.; Lopes, L. F. D.; Zanini, R. R.; **“Introdução ao Projeto de Experimentos: Caderno Didático”**; Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Estatística, 2002, 127p.

Trent, E. M.; Wright, P. K.; **“Metal Cutting”**, 4.ed., Butterworth-Heinemann, 2000.

Tschätsch, H.; **“Applied Machining Technology”**, 8.ed., Springer Science, 2009.

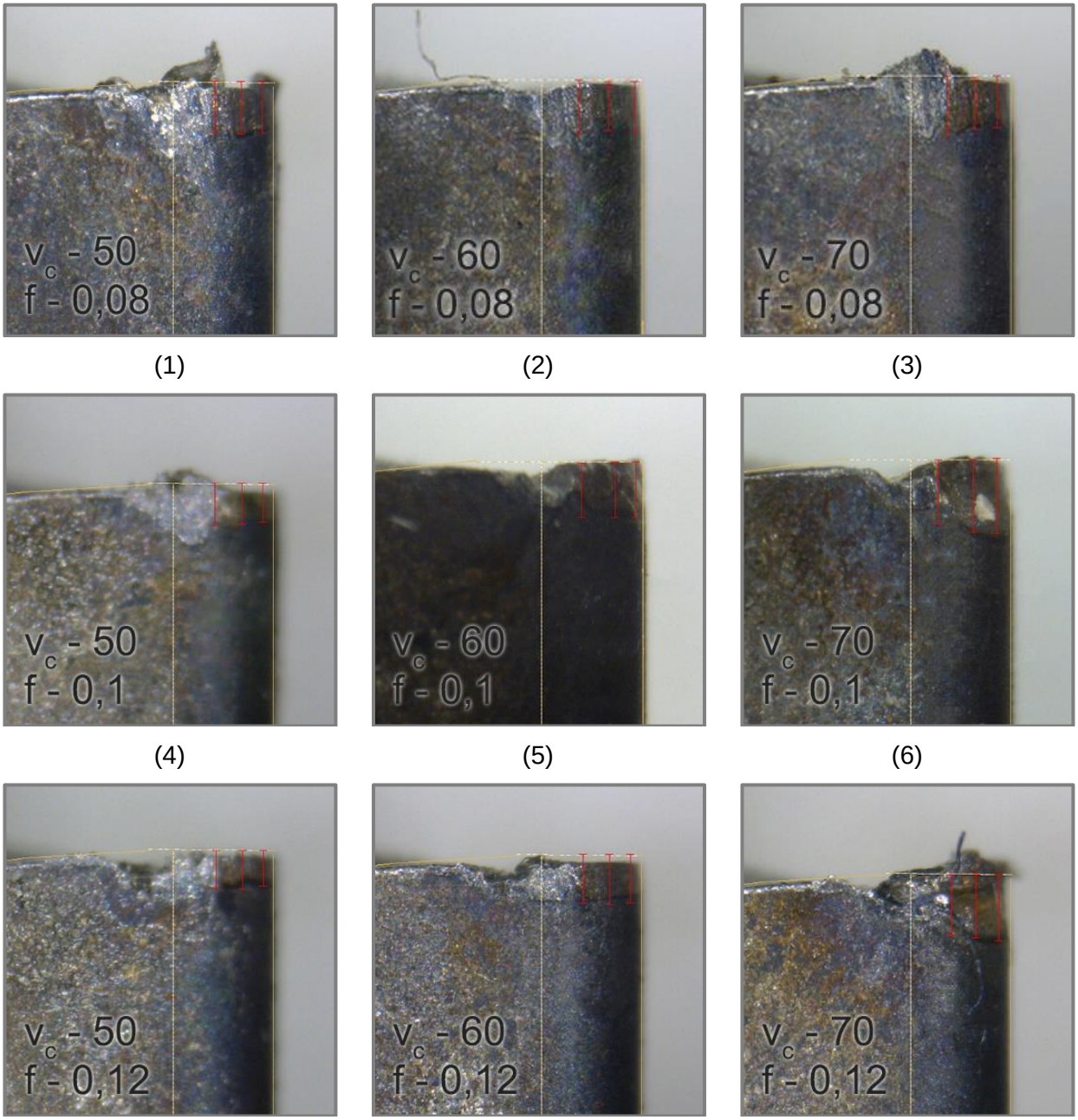
APÊNDICES

I – Dados da Usinagem das Nove Amostras

Tabela A1 – Parâmetros de entrada e respostas para as nove amostras usinadas.

Amostra	v_c [m/min]	f [mm/volta]	VB [mm]	T [min]	R_a [um]	R_t [um]	F_p [N]	F_c [N]	F_f [N]
1	50	0,08	0	0	0,75	5,71	86,18	163,90	78,21
	50	0,08	0,1	170,6	1,33	11,69	131,89	140,61	143,34
	50	0,08	0,2	318,8	1,29	9,83	187,34	211,44	250,24
2	60	0,08	0	0	0,50	3,01	78,64	115,71	66,37
	60	0,08	0,1	167,9	0,95	7,72	136,27	148,65	144,65
	60	0,08	0,2	259	1,28	11,69	129,44	157,48	158,27
3	70	0,08	0	0	0,63	3,32	74,83	133,13	66,03
	70	0,08	0,1	116,1	1,00	5,15	137,95	188,70	124,46
	70	0,08	0,2	188,2	1,39	14,31	123,18	146,00	117,16
4	50	0,10	0	0	0,85	4,87	90,50	141,90	107,90
	50	0,10	0,1	167,1	1,26	6,21	124,85	127,88	109,02
	50	0,10	0,2	289,9	1,76	8,15	123,10	216,29	139,61
5	60	0,10	0	0	0,78	4,63	32,60	175,74	34,84
	60	0,10	0,1	124,1	1,13	6,47	155,53	199,95	140,26
	60	0,10	0,2	188,4	1,34	7,39	211,29	204,86	163,92
6	70	0,10	0	0	0,79	4,20	75,92	133,31	71,11
	70	0,10	0,1	92,9	1,18	5,75	193,08	168,06	205,65
	70	0,10	0,2	125,2	2,31	16,13	258,15	214,34	223,69
7	50	0,12	0	0	1,35	6,70	102,19	153,30	101,42
	50	0,12	0,1	169,2	1,01	6,30	144,65	219,52	124,81
	50	0,12	0,2	236,7	1,64	9,48	202,35	172,16	172,72
8	60	0,12	0	0	1,12	5,28	94,99	191,97	73,62
	60	0,12	0,1	115,7	1,40	6,91	159,16	191,29	145,78
	60	0,12	0,2	188,4	1,61	8,95	183,52	196,90	175,26
9	70	0,12	0	0	1,32	7,24	87,96	171,50	82,52
	70	0,12	0,1	77,4	2,18	12,58	129,35	214,48	130,94
	70	0,12	0,2	104,4	1,71	10,59	435,92	267,09	337,42

II – Desgaste de flanco (VB) no fim de vida das ferramentas para as nove amostras.



(1) (2) (3)

(4) (5) (6)

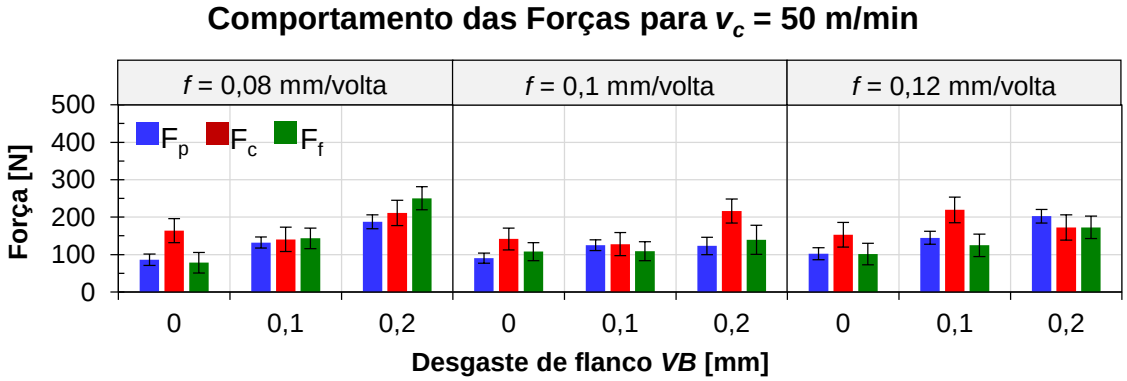
(7) (8) (9)

Figura A1 – Estado final do desgaste de flanco (VB) das ferramentas nas diferentes combinações de velocidade de corte (v_c) e avanço (f) para as nove amostras usinadas.

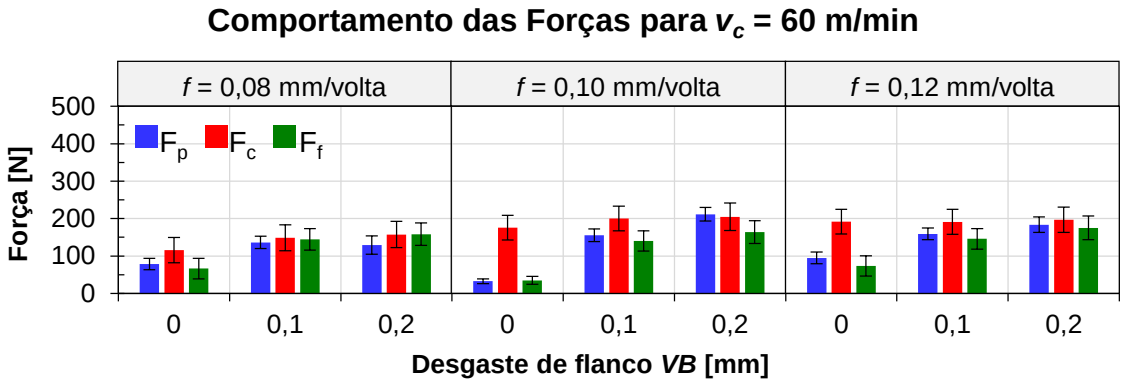
III – Comportamento das Componentes Ortogonais da Força de Usinagem

As componentes da força de usinagem foram dispostas progressivamente segundo o avanço (*f*) e o desgaste de flanco (VB) para as nove amostras usinadas (Fig. A2).

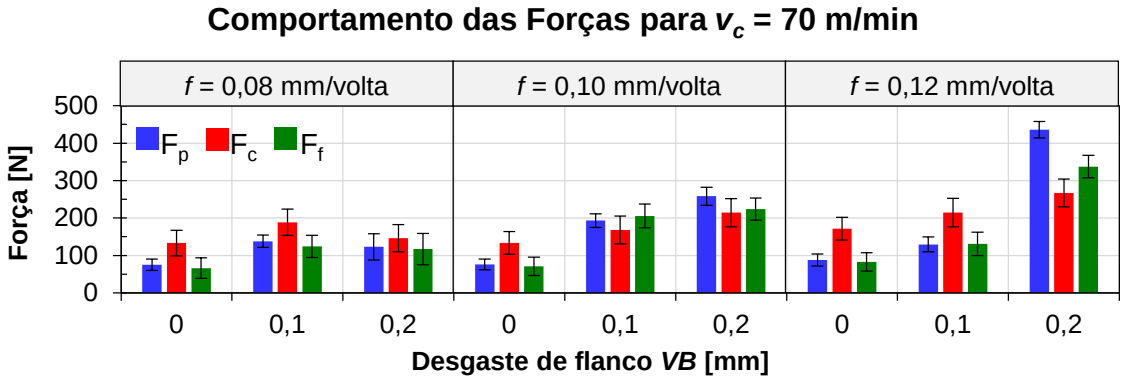
Para a obtenção dos valores das parcelas estáticas, foi calculada a média RMS (*Root Mean Square*) dos 60000 pontos coletados pela plataforma ao longo de dois segundos de corte. A parcela dinâmica das componentes é apresentada em formato de barras de erros, indicando as variações máximas e mínimas, com uma confiança de 95,45% (duas vezes o desvio-padrão) de os pontos estarem no intervalo representado.



(a)



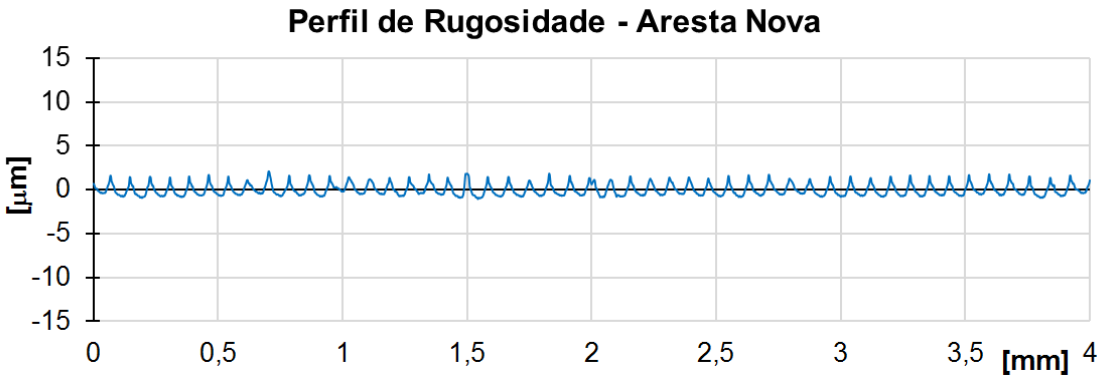
(b)



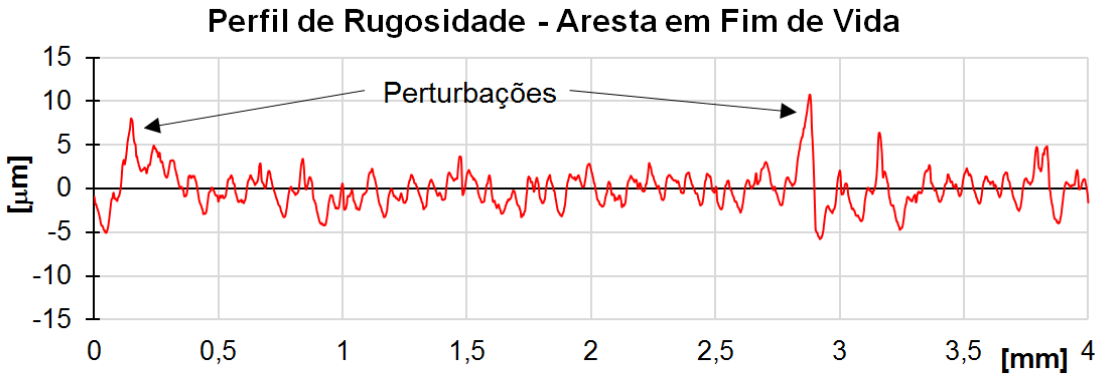
(c)

Figura A2 – Comportamento das forças de usinagem para as nove amostras em função do avanço (*f*) e do desgaste de flanco (*VB*) para diferentes velocidades de corte (v_c)

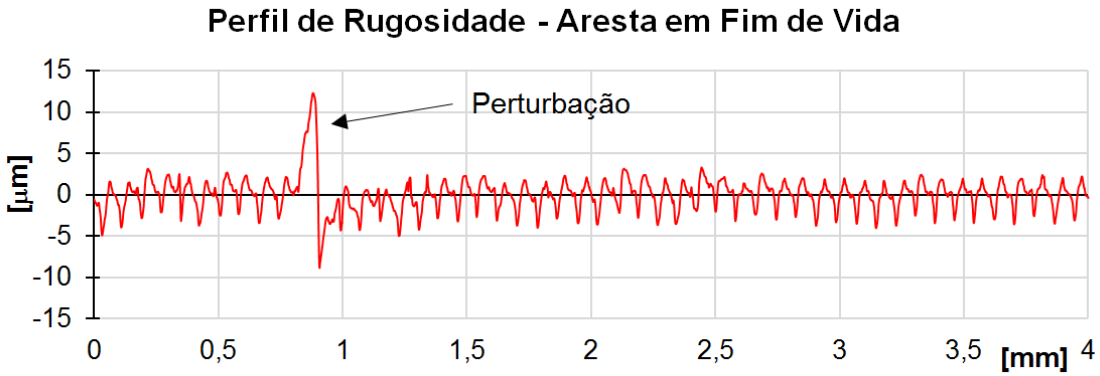
IV – Perfis de Rugosidade



(a) v_c = 60 m/min, f = 0,08 mm/volta, VB = 0 [mm].



(b) v_c = 60 m/min, f = 0,08 mm/volta, VB = 0,2 mm.



(c) v_c = 70 m/min, f = 0,08 mm/volta, VB = 0,2 mm.

Figura A3 – Diferentes perfis de rugosidade.