UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DAVI HENRIQUE CAVILION LAPOLLI

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DA ARESTA OBSOLETA DO INSERTO ROMBOIDAL NO PROCESSO DE TORNEAMENTO DO AÇO ABNT 8620

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO
2020

DAVI HENRIQUE CAVILION LAPOLLI

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DA ARESTA OBSOLETA DO INSERTO ROMBOIDAL NO PROCESSO DE TORNEAMENTO DO AÇO ABNT 8620

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica – DAMEC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Fabio de Freitas Lima

Coorientador: MsC. Vitor Baldin

PATO BRANCO

2020

FOLHA DE APROVAÇÃO

Análise da Influência do Ângulo de Inclinação da Aresta Obsoleta do Inserto Romboidal no processo de Torneamento do Aço ABNT 8620

Davi Henrique Cavilion Lapolli

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 12/11/2020 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

Prof. PhD. Alisson Rocha Machado
(PUC-PR – Departamento de Engenharia Mecânica)

Prof. Dr. Fabio Antonio Xavier
(UFSC – Departamento de Engenharia Mecânica)

MsC. Vitor Baldin
(UTFPR – Departamento de Engenharia Mecânica)

Prof. Dr. Fabio de Freitas Lima
(UTFPR – Departamento de Engenharia Mecânica)
Orientador

Prof. Dr. Paulo Cezar Adamczuk
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

*A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meus pais, Eliane e Rogério.
A minha irmã Gabriele.
E a meus queridos amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais, Eliane Cavilion Lapolli e Rogério Lapolli, por tantos anos de carinho, amor e dedicação para me ajudar a cumprir os meus objetivos, a minha irmã Gabriele Cavilion Lapolli por toda a companhia, e pelos risos, que tornaram o período de faculdade muito mais alegre. A meus avós e família.

Agradeço a meus amigos e colegas, Natan Dalla Corte, Rafael Geronimo, Alon Sgarbossa, Matheus Colpani, Marco D`avila, Marcos Vinícius, Italo Peres, Pedro Pasco, Jomerson Rodrigues, Publio Klein, Giovanni Fredo e Eduardo Blonkoski, pois todos fizeram da faculdade um lugar de companheirismo, compartilharam as dificuldades e juntos ajudaram quando necessário para obtermos crescimento mútuo.

Agradeço a UTFPR – Câmpus Pato Branco, e ao Departamento de Engenharia Mecânica por me dar a oportunidade de realizar esta conquista de me tornar um Engenheiro Mecânico. Agradecimento em especial ao meu orientador, o Prof. Dr. Fabio de Freitas Lima, que muito me ensinou para muito além da realização deste trabalho, e ao meu coorientador, M.Sc. Vitor Baldin, que teve importantíssimo papel para a elaboração e execução de todos os ensaios necessários durante a realização deste trabalho.

Agradecimento a PUC – Curitiba, ao departamento da PUC de Engenharia Mecânica e ao Prof. Ph.D. Alisson Rocha Machado, por valiosas observações e pelo auxílio imprescindível durante a execução dos experimentos.

EPÍGRAFE

Não se espante com a altura do vôo. Quanto mais alto, mais longe do perigo. Quanto mais você se eleva, mais tempo há de reconhecer uma pane. É quando se está próximo do solo que se deve desconfiar. (DUMONT, Alberto Santos)

RESUMO

LAPOLLI, Davi Henrique Cavilion. Análise da Influência do Ângulo de Inclinação da Aresta Obsoleta do Inserto Romboidal no Processo de Torneamento do Aço ABNT 8620. 2020. 53f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2020.

Este trabalho científico apresenta uma abordagem experimental de análise de fatores de usinagem e suas influências, com utilização de insertos romboidais posicionados para usinagem com aresta obsoleta, com foco na análise de resultados com dois ângulos de inclinação diferentes. Utiliza como meio de planejamento a técnica de análise de resultados a análise multivariável fatorial 2k. Sendo com resultados a partir de ensaios dinamométricos e medição de rugosidade superficial que se constrói a avaliação e comparação de resultados de forças e como cada fator influenciou os resultados. Complementado por análise de avaria e desgaste de ferramenta com a utilização de MEV. Foram obtidos bons resultados, com diferentes vantagens para cada ângulo, e também importantes resultados para a análise de forças de corte, uso de fluido e avanço.

Palavras-chave: Torneamento. Fluído de Corte. Força de usinagem. Ângulo de Inclinação. Avaria.

ABSTRACT

LAPOLLI, Davi Henrique Cavilion. Analysis of the Influence of the Inclination Angle of the Obsolete Edge of the Rhomboid Insert in the ABNT 8620 Steel Turning Process. 2020. 53p. Term Paper - Mechanical Engineering Course, Federal Technological University of Paraná. Pato Branco, 2020.

This scientific work presents an experimental approach to the analysis of machining factors and their influences, using rhomboidal inserts positioned for machining with obsolete edge, focusing on the analysis of results with two different inclination angles. It uses the 2k factorial multivariate analysis as a means of planning the results analysis technique. It is with results from dynamometric tests and measurement of surface roughness that the evaluation and comparison of results of forces is built and how each factor influenced the results. Complemented by analysis of damage and tool wear with the use of SEM. Good results were obtained, with different advantages for each angle, and also important results for the analysis of cutting forces, fluid use and feed.

Keywords: Turning. Cutting Fluid. Machining force. Inclination Angle. Damage.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Direção dos Movimentos de Corte 17
Figura 2 - Ângulo de Inclinação Visto no Plano de Corte 19
Figura 3 - Cunha de Corte 20
Figura 4 - Forças de Usinagem 22
Figura 5 - Composição de Forças no Plano de Cisalhamento 23
Figura 6 - Diferenciação Entre o Perfil Real e o Detectado 27
Figura 7 - Áreas de Avarias na Ferramenta 31
Figura 8 - Momento de Início de Ensaio 33
Figura 9 - Suporte Comercial 34
Figura 10 - Suporte Fabricado 34
Figura 11 - Morsa Angular com Matéria Prima do Suporte 35
Figura 12 - Detalhamento do Corpo de Prova 35
Figura 13 - Placa de Descrição da Célula de Carga 36
Figura 14 - Suporte Acoplado a Célula de Carga 36
Figura 15 - Dimensões do Inserto 37
Figura 16 - Faixa de Velocidade de Corte por Avanço do Inserto 37
Figura 17 - Rugosímetro 38
Figura 18 - Configuração Rugosímetro 39
Figura 19 - Diferenças com Fluído de Corte 42
Figura 20 - Diferenças com Avanço 43
Figura 21 - Diferenças com Velocidade de corte 45
Figura 22 - Diferenças com Ângulo de Inclinação 46
Figura 23 - MEV Ferramenta -5 graus: (a) desgaste de flanco zoom 150x, (b) desgaste de flanco zoom 300 x 48
Figura 24 – MEV ferramenta de -10 graus: (a) Fratura frágil inserto romboidal, (b) lascamento região do raio da ferramenta. 48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de Rugosidade Superficial 27
Tabela 2 - Composição Aço 8620 31
Tabela 3 - Comparação de Uso de Fluído 41
Tabela 4 – Comparação de Avanços 43
Tabela 5 – Comparação de Velocidade de Corte.....44
Tabela 6 - Comparação de Ângulo de Inclinação.....46

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A_α	Superfície de principal folga	-
A_α'	Superfície de folga secundaria	-
S	Aresta principal de corte	-
S’	Aresta secundária de corte	-
P_r	Plano de referência	-
λ_s	Ângulo de inclinação	-
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura	-
CNC	Comando Numérico Computadorizado	-
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas	-
A_p	Profundidade de Corte	mm
V_c	Velocidade de Corte	m/min
F	Avanço	mm/rot
R_a	Rugosidade Aritmética	µm

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14

1.1 OBJETIVOS 15

1.1.1 Objetivo Geral 16

1.2 JUSTIFICATIVA 16

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 17

2.1 GEOMETRIA DA FERRAMENTA 18

2.1.1 Influência dos principais ângulos da cunha cortante 19

2.1.2 Detalhes da cunha cortante 20

2.2 FORMAÇÃO DE CAVACOS 21

2.3 FORÇAS DE USINAGEM 22

2.3.1 Pressão Específica de Corte 23

2.3.2 Dinamometria 23

2.4 MATERIAIS DE FERRAMENTAS 24

2.4.1 Metal Duro 25

2.5 INTEGRIDADE SUPERFICIAL 26

2.6 FLUIDOS DE CORTE 28

2.7 AVARIAS E DESGASTE DA FERRAMENTA 30

2.8 AÇOS DE BAIXA LIGA 31

2.8.1 Aço SAE 8620 31

3 METODOLOGIA 32

3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 32

3.2 SUPORTES 34

3.3 MORSA ANGULAR DE PRECISÃO 35

3.4 MATÉRIA PRIMA PARA ENSAIO 35

3.5 CÉLULA DE CARGA 36

3.6 INSERTOS 37

3.7 Fluido de Corte 38

3.8 Rugosímetro 38

4 RESULTADOS 40

4.1 FLUÍDO DE CORTE 40

4.2 AVANÇO 42

4.3 VELOCIADE DE CORTE 44

4.4 ÂNGULO DE INCLINAÇÃO 45

4.4.1 Avarias e Desgaste de Ferramenta 47

5 CONCLUSÕES 50

REFERÊNCIAS 51

APÊNDICE A – TABELA COMPLETA DE COMBINAÇÃO DE VARIÁVEIS E RESULTADOS OBTIDOS A PARTIR DE ENSAIOS DINAMOMÉTRICOS 53

1 INTRODUÇÃO

A usinagem de metais, que data do século XVIII, está a cada dia mais aprimorada, a todo momento novas tecnologias em ferramental e estratégias surgem para dar melhores resultados em eficiência e qualidade. A utilização de máquinas automáticas na usinagem vem se desenvolvendo mais a cada dia, desde que, em 1797, o primeiro torno com avanço automático foi criado por Henry Maudslay. Permitindo taxas como a remoção de material se tornarem constantes juntamente com as forças exercidas durante a usinagem (LU et al., 2011; MACHADO et al., 2015).

Ferramentas que a muito tempo tinham como objetivo produzir peças em madeira foram se aprimorando com os novos materiais para ferramentas, como o aço-carbono, aço rápido e ferramentas de carboneto de tungstênio. Estes materiais favoreceram o avanço tecnológico com alta produtividade e possibilidades de usinar materiais mais duráveis (BOBZIN, 2017). O ganho de desempenho das ferramentas de corte em processos não convencionais, possibilitou a usinagem de peças com geometrias complexas, garantindo melhor usinabilidade e tolerâncias dimensionais estreitas (MACHADO et al., 2015).

O torneamento cilíndrico externo é uma das principais operações de usinagem, caracterizando-se como um movimento efetivo resultante de um movimento de corte e um movimento de avanço (SKERLOS et al., 2013).

Uma das ferramentas mais utilizadas nesse processo são insertos de metal duro, um dos mais revolucionários grupos de ferramentas de corte, o qual surgiu em 1928 com a utilização de materiais como tungstênio, cobalto e níquel (BOBZIN, 2017). Esta nova classe de materiais foi chamada de “*widia*”, do alemão “*wie diamant*”, como diamante (MACHADO et al., 2015).

A utilização desses materiais possibilitou o desenvolvimento de uma grande gama de ferramentas, com infinitas finalidades e tamanhos e formas, como é o caso dos insertos romboidais. Este tipo de ferramenta de corte, possui diferentes formas, diferentes ângulos de ponta e ângulos da aresta efetiva de corte, geralmente 35, 55 e 80°. O ângulo de 80°é mais direcionado a operações de desbaste, enquanto que o de 35° direciona-se para o acabamento. Entretanto, muitas empresas utilizam esse inserto com ângulo de ponta de 80° na posição obsoleta, que normalmente não

teria sido desenvolvida com a finalidade de usinar, para aproveitar ao máximo o valor investido no inserto.

Esta utilização, não usual, gera dúvidas quanto a eficiência da ferramenta de corte, no que diz respeito a forças de usinagem, acabamento superficial das peças, controle e direção de saída do cavaco, vibração e resistência a aplicação de carta e fratura.

Se considerarmos para eficiência as variações causadas pelo ângulo de inclinação da ferramenta, e com isso analisarmos fatores como o desgaste da ferramenta, que pode ocorrer em qualquer ferramenta mesmo que possua tenacidade suficiente para evitar uma avaria, controle de direção de saída do cavaco, que pode também ajudar no resultado de acabamento do processo e segurança do operador, pois o cavaco se sair em direção a peça além de danificar o acabamento pode formar emaranhado o que representa risco de acidente, a resistência da ferramenta contra impactos, será influenciada principalmente pelo ângulo de folga entre a ferramenta e a peça a ser usinada, a força de usinagem, que é alterada pela diferente área e ângulo de contato durante a usinagem, a vibração, que vai também variar pelo contato, e acabamento superficial.

Estas dúvidas justificam o desenvolvimento deste trabalho, pois não existe informações técnicas e científicas ponderando a reutilização de insetos romboidais e a variação do ângulo de inclinação para uma melhor eficiência do processo de torneamento.

1.1 OBJETIVOS

Fabricar um suporte para inserto romboidal, com diferente ângulos de inclinação em comparação a um suporte comercial, onde se possa através de retiradas de cavacos e dinamometria, comparar a eficiência do inserto nesse ângulo com o ângulo do suporte encontrado no mercado, através de um estudo planejado com fatorial 2k, com análise de resultados em forças de usinagem, rugosidade resultante de cada seleção de parâmetros, e avaliação de avarias causadas pelos procedimentos.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é realizar uma análise da influência exercida pela alteração do ângulo de inclinação na eficiência da ferramenta romboidal no torneamento, posicionada para usinar com a aresta obsoleta.

Para atingir o objetivo deve-se realizar ensaios de remoção de cavaco no torneamento aplicando os ângulos de inclinação de -10° e -5°, monitorando as forças de corte, integridade superficial e desgaste das ferramentas de corte.

1.2 JUSTIFICATIVA

Os ângulos das ferramentas de usinagem influenciam os resultados da usinagem, principalmente na direção de saída do cavaco, força e potência de usinagem, vibrações, e acabamento superficial da peça. Pelo grau de importância do ângulo de inclinação, são poucas as informações técnicas e científicas ponderando a reutilização de insetos romboidais e a variação desses ângulos. Também, a reutilização de insertos é uma prática comum e recorrente nas empresas para a diminuição de custos de produção, justificando então a realização deste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

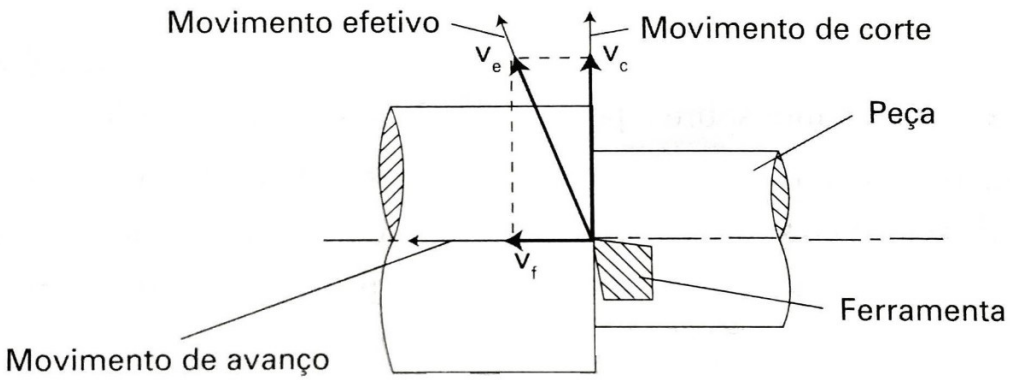
Segundo Reis (2000), existem dois grandes grupos em que se pode dividir os processos de fabricação, sendo: fabricação por usinagem, onde os processos ocorrem com a remoção de material da peça, neste caso a ferramenta é fabricada de um material com dureza e resistência superior ao do material a usinar. O segundo grupo de processos de fabricação, os processos não envolvem a remoção de material, tais como fundição, soldagem, metalurgia do pó e conformação.

A norma ABNT NBR 6175 define usinagem como sendo o processo caracterizado pela modificação da geometria de uma peça a partir da remoção de material na forma de cavacos de maneira direta ou indireta, a qual confere ao material uma geometria com dimensões e acabamento superficial (MACHADO et al., 2015).

O processo de usinagem abrange um grande conjunto de subprocessos, divididos em usinagem convencional, onde existe contato físico entre ferramenta e peça, e o não convencional onde se usa energia eletroquímica, química ou térmica para remoção do material (LU et al., 2011).

As principais operações de usinagem convencional executadas com ferramentas de geometria definida estão de acordo com a máquina-ferramenta empregada, se pode dividir essas operações em desbaste e acabamento. Desbaste quando o foco é remoção de material, acabamento quando o sobre metal será removido, com objetivo de alta qualidade final (MACHADO et al., 2015).

Figura 1 - Direção dos Movimentos de Corte



Fonte: Adaptado de Machado et al. (2015)

O processo de usinagem pode ocorrer quando existe um movimento da ferramenta em relação a peça, por convenção os movimentos sempre são observados

como se a peça estivesse parada e apenas a ferramenta se movimentando. Permitindo assim facilmente organizar sinais algébricos que representaram os movimentos, principalmente quando temos ferramentas de geometrias complexas (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

Os movimentos podem ser divididos entre os movimentos que causam remoção de cavaco e os que não interferem na sua remoção, segundo Machado et al. (2015), definições importantes utilizadas no torneamento são, movimento de corte entre a peça e a aresta de corte, movimento de avanço da ferramenta em relação a peça, realizando retirada continua de cavaco e o movimento efetivo, resultando do movimento de corte e de avanço quando simultâneos, como se pode ver na Figura 1.

2.1 GEOMETRIA DA FERRAMENTA

Algumas definições no quesito referente a geometria da ferramenta são mais importantes quando se trata da análise de inclinação da ferramenta, por padronização será usada a nomenclatura usada por Machado et al. (2015), quando se tratar dos ângulos que serão abordados e para determinar os ângulos da cunha cortante de uma ferramenta:

- Superfície de principal folga (A_α) e secundaria (A_α'), superfícies que juntas determinam a folga entre a ferramenta e a superfície em usinagem.
- Aresta principal de corte (S) e secundaria (S'), a primeira indica a direção de avanço e a segunda indica a direção contraria se observadas no plano de trabalho.
- Plano de referência (P_r), perpendicular à direção admitida de corte, no torneamento é paralelo a superfície de apoio do cabo da ferramenta.
- Ângulo de inclinação (λ_s), único ângulo no plano de corte da ferramenta, entre S e P_r, sempre agudo, seu vértice indica a ponta de corte, positivo quando a aresta de corte se encontra na região posterior em relação ao plano de referência.

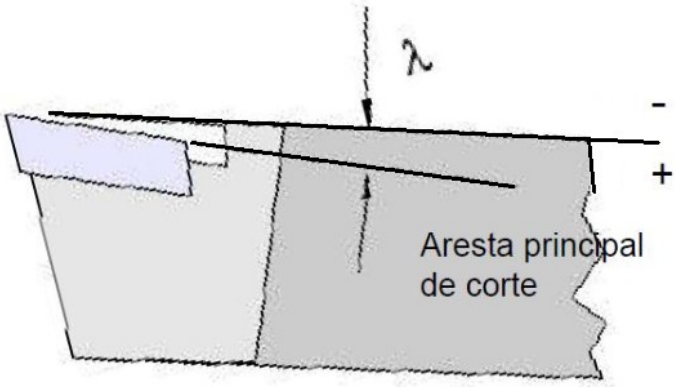
2.1.1 Influência dos principais ângulos da cunha cortante

Todos os ângulos devem ter seu valor cuidadosamente determinado, pelo papel que desempenharam durante a usinagem. Por exemplo, o ângulo de posição geralmente varia de 45° a 95°, e tem como funções distribuir tensões de corte no início e no fim do corte, direcionar a saída do cavaco e aumentar ângulo de ponta. Esse ângulo também induz força passiva na ferramenta, e por consequência na máquina (MACHADO et al., 2015).

O ângulo de ponta, que é definido pelo formato da ferramenta, pode ter 90° em ferramentas quadradas ou variar até 35° em outros tipos de inserto. Nesse segundo caso em ferramentas usadas para perfilamento, o que pode fragilizar a ponta da ferramenta, já em insertos redondos esse ângulo é definido pela profundidade na usinagem. O ângulo de ponta tem a função de assegurar resistência e capacidade de dissipar calor (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

O ângulo de inclinação, normalmente varia nas ferramentas entre -11° a 11°, onde tem como funções controlar a direção de saída de cavaco, proteger a aresta de corte da ferramenta contra impactos, atenuar vibrações quando negativo, entretanto, quando muito negativo, o cavaco direção é direcionado para a peça, elevando as forças de usinagem (MACHADO et al., 2015).

Figura 2 - Ângulo de Inclinação Visto no Plano de Corte



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6163 (1980)

O ângulo de folga normalmente varia de 5° a 20°, este tem como função evitar o atrito entre ferramenta e peça. Se este ângulo for muito baixo, a cunha não penetra de forma adequada na matéria prima, promovendo o desgaste e geração de calor, influenciando negativamente o acabamento. Com um ângulo de folga elevado, a cunha da ferramenta perde resistência e a sua especificação depende da resistência

da ferramenta. Este ângulo está diretamente ligado ao ângulo de inclinação, pois para ferramentas do tipo inserto, onde a ferramenta tem padrões determinados, os dois ângulos estão ligados (MACHADO et al., 2015).

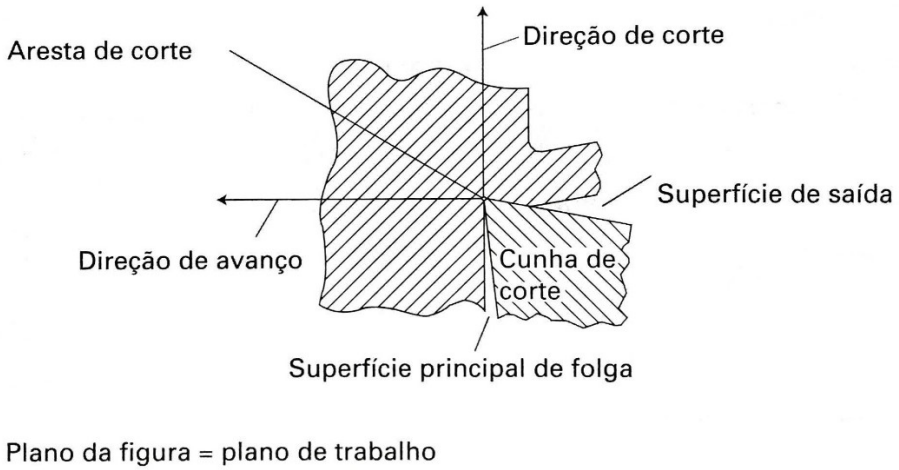
2.1.2 Detalhes da cunha cortante

Características como raio de ponta, raio de cunha e o quebra-cavacos também merecem destaque. O raio de ponta, determina juntamente com o ângulo de ponta a resistência mecânica da ponta da ferramenta de corte. O raio de ponta também influencia a rugosidade da peça, este raio varia de 0,2mm a 2,4mm, entretanto, maiores raios elevam a resistência da ponta da ferramenta, porém provocam um aumento da força passiva, assim valores muito elevados aumentam as vibrações de usinagem (MACHADO et al., 2015).

O raio de cunha tem a finalidade de proteger a cunha cortante da ferramenta este raio não pode ser agudo, pois fragiliza a cunha de corte (Figura 3). Entretanto, quanto maior o raio de cunha maiores as força de corte que atua na direção do avanço. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

Os quebra-cavaco são alterações na geometria da ferramenta nos ângulos de cunha e de saída com a função de fraturar periodicamente o cavaco. O local do quebra-cavaco na ferramenta depende da sua aplicação, quando de desbaste, o quebra-cavaco é afastado da aresta de corte, enquanto que para acabamento, ele está mais próximo da aresta de corte (MACHADO et al., 2015).

Figura 3 - Cunha de Corte



Fonte: Adaptado de Machado et al. (2015)

2.2 FORMAÇÃO DE CAVACOS

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2008) a formação de cavacos influencia diversos fatores ligados a usinagem, tais como: desgaste da ferramenta, esforços de corte, calor gerado no processo, penetração de fluido de corte, etc. Assim estão envolvidos com o processo de formação do cavaco, aspectos econômicos, de qualidade da peça, segurança do operador e utilização adequada da máquina-ferramenta.

A base para um melhor entendimento de todos os processos de usinagem segundo Machado et al. (2015) é um estudo cientifico da formação de cavacos. Esses estudos têm proporcionado grandes avanços nos processos de usinagem com relação a geometria e materiais das ferramentas, possibilitando a usinagem dos mais variados tipos de materiais.

O cavaco é formado em altíssimas velocidades de deformação, seguidas por ruptura do material da peça, neste caso, ao dividir o processo de formação do cavaco em partes, temos, recalque inicial, deformação, ruptura e deslizamento de lamelas. O recalque inicial, tem início na penetração da cunha cortante, onde uma pequena porção do material da peça é pressionada contra a superfície de saída da ferramenta. Na deformação e ruptura, o material pressionado sofre no início uma deformação elástica e logo em seguida uma deformação plástica, aumentando progressivamente até chegar à ruptura, que normalmente se dá por cisalhamento, mas, também pode ser causado por uma mistura de tensões de cisalhamento, compressão e tração.

Com o deslizamento de lamelas, ocorre uma ruptura parcial ou completa na região de cisalhamento, a qual depende da extensão de propagação da trinca gerada, sendo a velocidade de corte o fator determinante do quanto do material rompido permanece unido, dando origem a cavacos contínuos ou descontínuos.

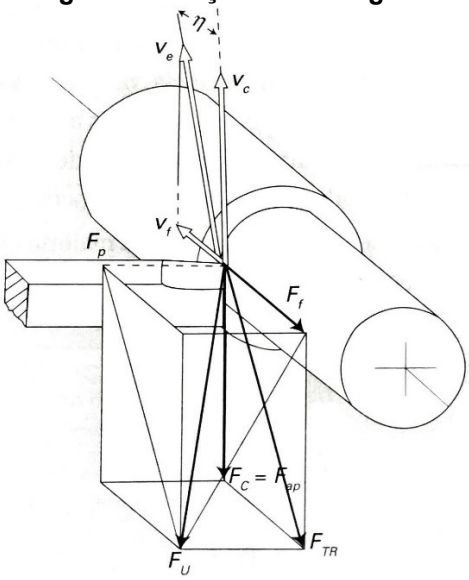
A saída do cavaco causa um escorregamento do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta, em decorrência do movimento relativo entre ferramenta e peça, enquanto isso ocorre uma nova porção de material está entrando em deformação repetindo o fenômeno (MACHADO et al., 2015).

2.3 FORÇAS DE USINAGEM

Segundo Machado et al. (2015), o conhecimento da força de usinagem que age sobre a cunha cortante e o estudo de suas componentes vetoriais são de grande importância, porque possibilitam estimar a potência necessária para o corte, bem como as forças atuantes nos elementos da máquina-ferramenta, além de manter relação com o desgaste das ferramentas de corte, o qual influencia a viabilidade econômica do processo.

Existem duas abordagens no estudo dos esforços de corte, o primeiro teórico, partindo dos fenômenos da formação do cavaco, com algumas simplificações como o corte ser ortogonal, que significa forças em apenas duas direções, e a empírica, onde os esforços são equacionados utilizando dados obtidos por procedimentos experimentais (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

Figura 4 - Forças de Usinagem



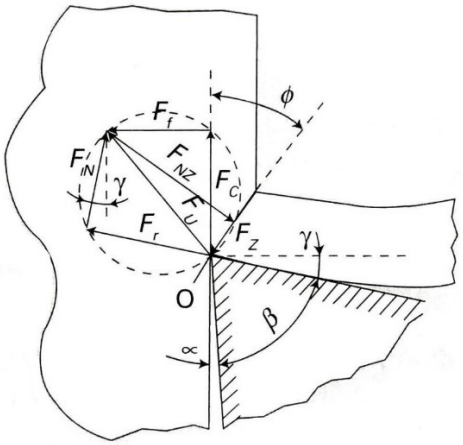
Fonte: Adaptado de Machado et al. (2015)

Existem três componentes básicos da força de usinagem segundo Machado et al. (2015), força de corte (F_c), força de avanço (F_f) e força passiva (F_p). São projeções da sua força resultante que é a força de usinagem (F_u), conforme ilustrado anteriormente na Figura 3.

Para simplificar a atuação das forças se pode usar o modelo de corte ortogonal, com todos os componentes atuando no plano de trabalho, permitindo uma análise vetorial das forças na ferramenta, cavaco e peça. A partir da decomposição

da força de usinagem, se pode obter o Círculo de Merchant, que por geometria permite representar todos os seus componentes (MACHADO et al., 2015).

Figura 5 - Composição de Forças no Plano de Cisalhamento



Fonte: Adaptado de Machado et al. (2015)

2.3.1 Pressão Específica de Corte

A maneira mais apropriada de se obter valores para a pressão específica de corte é a medição em laboratório. Com os valores obtidos, pode-se obter parâmetros para o cálculo e definição da formação do cavaco através de métodos numéricos (ALI et al., 2013), e prever que o aumento em um grau no ângulo de inclinação, diminuir a força de corte e de avanço em 1.5% e a força de profundidade em 10% (GÜNAY et al., 2005; MACHADO et al., 2015; SAGLAM; YALDIZ; UNSACAR, 2007)

2.3.2 Dinamometria

A dinamometria é uma forma de medir experimentalmente as forças exercidas sobre a ferramenta de corte em um procedimento de usinagem. Este método de medição utiliza cristais piezoelétricos, que tem como característica se polarizar eletricamente quando sofrerem uma deformação elástica. Os dinamômetros apresentam boa rigidez mecânica, menor massa e maior rigidez em comparação a outros métodos, tornando possível sua utilização para medição de forças de usinagem em altas frequências (MACHADO et al., 2015).

O estudo teórico ou experimental das componentes da força de usinagem permite otimizar parâmetros de corte com o objetivo de assegurar a menor força e,

consequentemente menor gasto de energia, desgaste da ferramenta de corte e rugosidade superficial. Estas forças são fontes de informações do desempenho da operação através das condições da interface ferramenta peça (RIBEIRO; ABRÃO; SALES, 2015). Segundo (WU et al., 2013), a seleção adequada dos parâmetros de corte depende do comportamento das componentes de força de usinagem. Além dos parâmetros de corte, a dureza do material; o material, geometria e revestimento da ferramenta; o uso ou não de fluído de corte; o desgaste da ferramenta; o efeito térmico, atrito e tensões geradas na zona de corte também contribuem para a variação das forças de usinagem.

A dureza do material interfere significativamente na força de usinagem, ou seja, com o aumento da dureza tem-se um aumento das componentes da força de usinagem. Porém, em usinagem, o calor gerado no processo aumenta a temperatura e ajuda a reduzir a resistência ao cisalhamento do material, reduzindo a força de usinagem. Isso ocorre quando a operação não for conduzida com fluído refrigerante (QIAN; HOSSAN, 2007).

Além da geometria, os revestimentos das ferramentas causam grandes efeito na força de usinagem. As ferramentas revestidas com Cr, Ti, Al e N afetam significativamente as componentes de força de usinagem em comparação as ferramentas não revestidas. Isto se justifica pelo fato das ferramentas revestidas proporcionarem um menor coeficiente de atrito, se comparada as ferramentas sem revestimento (LU et al., 2014).

2.4 MATERIAIS DE FERRAMENTAS

A usinagem utiliza para remoção dos cavacos, ferramentas fabricadas de materiais mais duros e com maior resistência mecânica do que da peça a ser usinada. Com o princípio da dureza relativa, o surgimento de novos materiais e ligas estruturais com excelentes propriedades mecânica e elevada dureza, contribuiu para o desenvolvimento de ferramentas mais resistentes para as diversas operações de usinagem.

Desta forma, pode-se destacar a alta dureza, tenacidade suficiente para evitar falha por fratura, alta resistência ao desgaste abrasivo, alta resistência a compressão, alta resistência ao cisalhamento, boas propriedades mecânicas e térmicas em elevadas temperaturas, alta resistência a choques térmico, alta

resistência a impacto e ser inerte quimicamente como as principais propriedades desejáveis para uma ferramenta de corte.

Sendo assim, para a seleção do material da ferramenta, deve-se ponderar fatores como, material a ser usinado, processo de usinagem, condição da máquina-ferramenta, formato e dimensões da ferramenta, custo da ferramenta, condições de usinagem e condições da operação (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008). São ponderações que definem por exemplo a velocidade de corte na usinagem de um mesmo material, apenas com a troca do material da ferramenta (MACHADO et al., 2015)

2.4.1 Metal Duro

O desenvolvimento do metal duro por Schroter na década de 1920 na Alemanha consistiu em um grande avanço no tocante a materiais para ferramentas de corte, podendo aumentar as velocidades de corte em cerca de dez vezes em relação a ferramentas de aço rápido. Da mistura original com carboneto de tungstênio e cobalto, surgiu a primeira ferramenta de metal duro e a partir desses componentes várias outras composições foram testadas, como adições de diversos componentes.

As ferramentas de metal duro são fabricadas pelo processo de metalurgia do pó, onde pós de WC, TiC, TaC e NbC são misturados em diferentes proporções com o Co também em pó, que atua como ligante, e submetidos a um processamento de prensagem, sinterização e retificação (FERRARESI, 1977). O cobalto utilizado como aglomerante das partículas duras de carbonetos, é o principal responsável pela variação da tenacidade da ferramenta. O TiC, TaC e NbC são constituintes responsáveis por conferir a ferramenta alta resistência ao desgaste, alta dureza em temperaturas elevadas e alta resistência a oxidação (MACHADO et al., 2015).

A Norma ISO 513 (2004) classifica as ferramentas de corte em classe P, M, K, N, S e H, em que cada uma apresenta uma composição específica dos pós de WC, TiC, TaC, Co e NbC, o qual é indicado para a usinagem de determinados tipos de materiais (MACHADO et al., 2015).

A combinação da resistência ao desgaste, resistência mecânica e altos níveis de tenacidade, além de custos relativamente baixos, tornou o metal duro um grande sucesso na usinagem, sendo utilizada atualmente em grande escala (Santos

e Sales, 2007). Além disso, as ferramentas de metal duro permitem a aplicação de um ou mais revestimentos em sua superfície para aumentar a resistência ao desgaste da superfície e tenacidade no núcleo, responsável por suportar os choques mecânicos do processo.

Para (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013), o revestimento em ferramentas de corte tem por finalidade aumentar a resistência ao desgaste da camada que entra em contato com o cavaco, reduzir o atrito na aresta de corte e nas superfícies de saída, reduzir a reatividade química, diminuir o surgimento da aresta postiça de corte e manter tenacidade do metal duro no centro da ferramenta. Esses ganhos podem ser incorporados em uma única ferramenta de corte com aplicação de revestimentos em mono ou múltiplas camadas. Entre os elementos utilizados em revestimentos de ferramentas de corte, destacam-se: Carboneto de titânio (TiC), Nitreto de titânio (TiN), Carbonitreto de titânio (TiCN), Óxido de Alumínio (Al2O3), Nitreto de Titânio Alumínio (TiAlN), Nitreto de Cromo Alumínio (AlCrN) e Nitreto de Cromo (CrN).

2.5 INTEGRIDADE SUPERFICIAL

Uma superfície usinada é resultado de um processo que envolve deformações plásticas, rupturas, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e reações químicas (FELHŐ; KARPUSCHEWSKI; KUNDRÁK, 2015). Desta forma, utiliza-se o termo integridade superficial para descrever a qualidade micro e macro estrutural de uma superfície, entretanto, na usinagem a integridade superficial é analisada principalmente através da verificação da textura superficial ou sua forma geométrica (MACHADO et al., 2015).

Para (THOMAS, 1999), a rugosidade é o resultado de variações do relevo tais como: ranhuras, sulcos, estrias, escamas e crateras que podem ser encontradas na superfície de um material usinado por operações de desbaste ou acabamento.

A rugosidade de uma superfície surge de finas irregularidades ou erros microgeométricos, oriundos do procedimento de usinagem (GRIFFITHS, 2001). Estas irregularidades devem ser evitadas, pois causam falhas nos componentes mecânicos por representarem erros de fabricação.

Alguns parâmetros segundo a Norma ABNT NBR ISO 4287 (2002), levam em consideração dados que ajudam a avaliar a rugosidade superficial, indicando se

as irregularidades são formadas de picos ou vales (MACHADO et al., 2015). Na Tabela 1 apresenta-se os parâmetros mais usuais na usinagem.

Tabela 1 - Parâmetros de Rugosidade Superficial

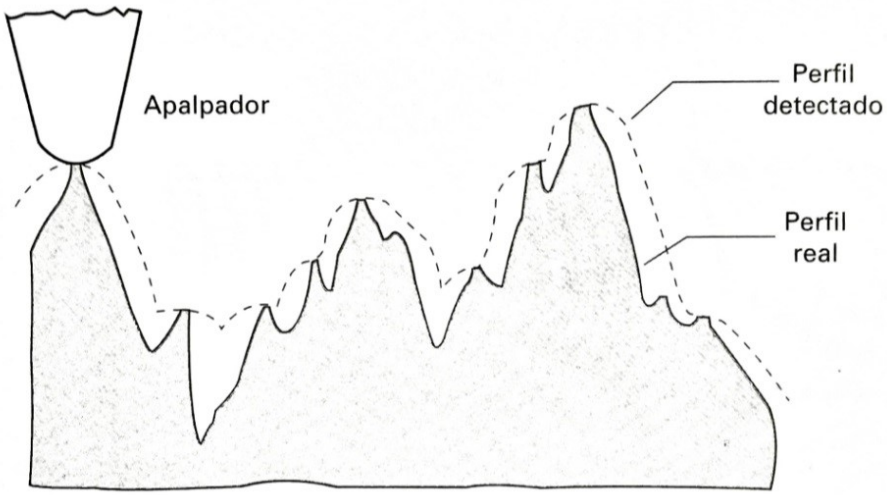
Símbolo	Nome	Descrição
R_a	Desvio aritmético médio	Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas.
R_q	Desvio médio quadrático	Raiz quadrada da média dos valores das ordenadas.
R_t	Altura total do perfil	Soma da maior altura de pico e profundidade do vale.
R_z	Altura máxima do perfil	Soma da altura máxima dos picos e a maior das profundidades dos vales.

Fonte: Adaptado de Machado et al., 2015.

A rugosidade superficial é influenciada pelo tipo do material da peça, tipo da ferramenta de corte, nível de desagaste e principalmente pelos parâmetros de corte. Dos parâmetros de corte, o avanço influencia significativamente na rugosidade, a altura dos picos e profundidade dos vales tem tendência de aumento em proporção quadrática ao avanço. Em baixas velocidades de corte, o aparecimento de aresta postiça de corte, também pode piorar a rugosidade superficial (MACHADO et al., 2015).

A medição da rugosidade pode ser realizada com um rugosímetro, um instrumento de medição por contato entre um apalpador de diamante com a peça. Esse apalpador percorre um comprimento de avaliação previamente especificado na superfície. As alterações de elevação e profundidade captadas pelo aparelho, são convertidas em sinais elétricos, processados, filtrados (por conta do raio de ponta do apalpador como mostrado na Figura 5) e transformados em gráficos (MACHADO et al., 2015).

Figura 6 - Diferenciação Entre o Perfil Real e o Detectado



Fonte: Adaptado de Machado et al. (2015)

2.6 FLUIDOS DE CORTE

O processo de usinagem é precedido de esforços mecânicos, os quais interferem negativamente no produto final. Essas condições foram relatadas em 1894 por Frederick Winslow Taylor, que conseguiu aumentar em 33% a velocidade de corte garantindo a permanência da integridade da ferramenta com a aplicação de água na região de corte. Desde então, muitas pesquisas foram desenvolvidas resultando em avanços científicos e tecnológicos com relação a tipos de fluídos de corte e métodos de aplicação.

Comprovadamente o uso de fluidos de corte na usinagem, pode trazer diversos benefícios ao processo, como por exemplo aumentar a velocidade de corte sem prejudicar a vida da ferramenta, entre outros benefícios e funções. Em condições de usinagem com baixa velocidade de corte, a lubrificação tem bastante importância para redução do atrito e evitar a formação de aresta postiça de corte. Em altas velocidades, por se ter uma temperatura mais elevada, a importância recai sobre a refrigeração da ferramenta (MACHADO et al., 2015).

Atualmente agregou-se outras funções principais aos fluídos de corte, como: Lubrificar a interface ferramenta cavaco e as superfícies de saída em baixa velocidade de corte diminuindo assim o atrito e a geração de calor; Retirar o calor gerado pelo atrito das superfícies e pelo cisalhamento do material, geralmente promovido pela usinagem em altas velocidades de corte; Proteger a superfície usinada e a máquina ferramenta contra a oxidação; Remoção de cavaco; Aumento da vida da ferramenta através de propriedades lubri-refrigerantes; Redução das forças de corte, consequentemente redução da potência de usinagem.

As funções dos fluídos de corte apresentam-se concomitante em todos os processos de usinagem, no entanto, para cada processo e parâmetros utilizados, há a priorização de uma ou mais funções.

A eficiência da função lubrificante depende das habilidades dos fluídos em penetrar nas regiões de usinagem, principalmente entre o cavaco e a ferramenta, com o objetivo de formar um filme de lubrificante e diminuir o contato entre as saliências, ou seja, as irregularidades superficiais em forma de picos e vales.

Entende-se que o fluído de corte penetra na interface ferramenta cavaco por capilaridade, um princípio de lubrificação que depende do método de aplicação, da viscosidade e o quão rugosa a superfície apresenta-se. Como consequência, um

sistema eficiente de lubrificação reduz a geração de calor atribuída ao atrito, assim como diminui os esforços de usinagem, consumo de energia, aderência de partículas no gume de corte e consequentemente reduz a interferência superficial e dimensional (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Os fluidos de corte são definidos como materiais líquidos, gasosos ou sólidos aplicados na interface ferramenta peça durante o processo de usinagem. Embora não exista uma padronização para os fluidos de corte, eles podem ser classificados de diversas formas, sendo as três principais, óleos, emulsões e soluções. O fluído de corte integral é definido como óleo graxo de origem vegetal e animal, ou óleo mineral, os quais são utilizados conforme o fornecido sem a necessidade de misturá-lo em água (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Os fluídos de corte emulsionáveis são conhecidos como óleos solúveis em água, estes têm por definição óleos minerais como agentes emulsificadores (SILLIMAN, 1992). Ao serem misturados em água formam um composto bifásico, sendo uma emulsão independente do teor do óleo empregado (RUNGE e DUARTE, 1990).

Os fluídos de corte solúveis são soluções compostos monofásicos de óleos dissolvidos completamente na água através de reações químicas formando uma fase única, a qual elimina a necessidade da adição de elementos emulsificantes. Todos os tipos de fluídos de corte são compostos de sais orgânicos e inorgânicos, aditivos de lubricidade, biocidas, bactericidas, inibidores de corrosão, aditivos EP, e aditivos antiespumantes (BARADIE, 1996).

E existem algumas formas de aplicar os fluidos de corte ao processo, basicamente por três métodos de aplicação, sendo:

Sistema de baixa pressão;

Atomização (MQL) (de 1 a 7bar);

Sistema de alta pressão (até 163bar).

Estes métodos afetam diretamente a lubrificação, refrigeração e remoção de cavaco, sendo de extrema importância para a eficiência dos fluídos de corte. Entretanto, o método de aplicação mais usual é jorro a baixa pressão, pois trata-se de um método simples e demanda poucos elementos para aplicação (MACHADO et al., 2015).

A correta aplicação dos fluidos de corte pode aumentar a produtividade e reduzir os custos devido ao uso de maiores velocidades, maiores taxas de remoção

de material e grandes profundidades de corte. Neste caso, o fluido torna-se parte fundamental para o processos de fabricação por remoção de cavaco para as peças, máquinas ferramentas, e ferramentas de corte (TRENT; WRIGHT, 2000).

2.7 AVARIAS E DESGASTE DA FERRAMENTA

Avarias, desgaste e deformação plástica são os três fatores principais pelos quais uma ferramenta pode perder sua eficácia na usinagem. Como descrito por Machado et al. (2015) avaria seria um fenômeno que ocorre de maneira repentina e inesperada, levando a destruição total ou perda de quantidade considerável da aresta de corte.

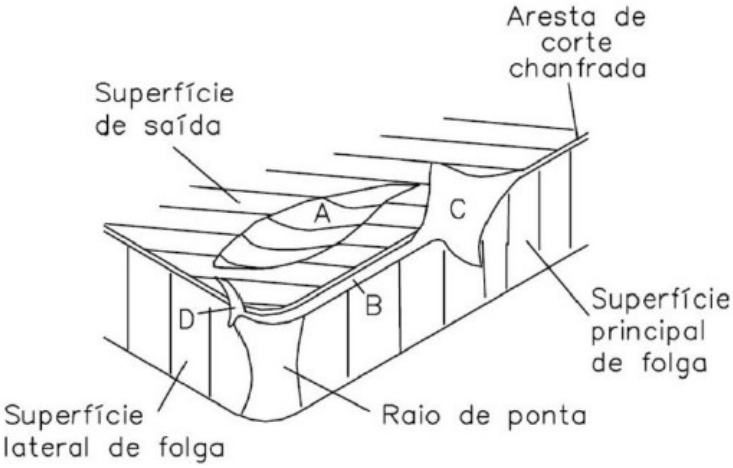
Outros eventos na operação de usinagem como interrupções repentinas durante o corte, espaço insuficiente para o cavaco e falhas de fabricação na ferramenta contribuem para o surgimento das trincas, lascamento podendo evoluir para uma quebras (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Estas avarias podem ser minimizadas quando adota-se ângulos de corte adequados e estratégias de usinagem que minimizam os choques mecânicos e térmicos inerentes (SANDVIK, 2017).

O desgaste é definido como mudanças da forma original da ferramenta durante o corte com perda gradual de material. Também, a norma ISO 3685 (1993), define o desgaste da ferramenta como sendo mudanças geométricas que ocorrem gradativamente nas superfícies de corte, através da perda gradual de massa ou deformação plástica. O desgaste surge nas arestas principal e secundária de corte, na superfície principal e secundária de folga e superfície de saída do cavaco. Estes desgastes são ocasionados pela adesão, difusão, abrasão e oxidação, os quais são considerados mecanismos causadores de desgaste (TRENT; WRIGHT, 2000).

Por fim, define-se deformação como alteração da ferramenta por deslocamento de material. Sendo avarias, desgastes e deformação plástica as causas para o fim da vida de uma ferramenta.

Os desgastes nas ferramentas de corte ocorrem em áreas específicas da ferramenta, como se pode observar na Figura 06. São elas, desgaste de cratera (A), desgaste de flanco (B) e desgaste de entalhe (C e D) (MACHADO et al., 2015).

Figura 7 - Áreas de Avarias na Ferramenta



Fonte: Adaptado de Machado et al. (2015)

2.8 AÇOS DE BAIXA LIGA

São definidos como aços de baixa liga, os aços com quantidade de elementos de liga inferior a 5%, e com finalidade de aumentar a temperabilidade e a resistência ao revenido. Tipicamente utilizando elementos como cromo, molibdênio, níquel, manganês e silício. São os aços de baixa liga os aços ligados mais utilizados (CARUSO, 2001).

2.8.1 Aço SAE 8620

O aço SAE 8620 é utilizado em componentes mecânicos como pinos guia, anéis de engrenagens, eixos, virabrequins, etc. Um aço para cementação e ligado principalmente com níquel, cromo e molibdênio, para ter boa temperabilidade. Tem dureza de até 260 HB quando normalizado, sua composição pode ser observada na Figura 09 (GGD, 2019).

Tabela 2 - Composição Aço 8620

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
% Mínima	0.17	0.10	0.60	0.35	0.35	0.15
% Máxima	0.23	0.40	0.95	0.75	0.75	0.25

Fonte: Adaptado de GGD Metals (2019)

3 METODOLOGIA

3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para os procedimentos experimentais deste trabalho utilizou-se como forma inicial de análise a remoção de cavacos com parâmetros previamente escolhidos com planejamento fatorial 2k, em um torno CNC com dinamômetro para aquisição dos dados de forças envolvidas no processo de torneamento com o inserto romboidal na posição da aresta obsoleta.

A análise foi realizada com dois suportes da ferramenta romboidal para o torneamento, distintos entre si pela diferença de angulo de inclinação do posicionamento da ferramenta, sendo um comercial e outro fabricado com a alteração do ângulo de inclinação.

Inicialmente foi realizada a medição do ângulo no suporte comercial, obtendo através de leitura em projetor de perfil, um ângulo de aproximadamente -10°. Para o segundo suporte, foi proposto a fabricação de um suporte com menor ângulo de inclinação, neste caso, escolheu o ângulo de -5°, respeitando a folga mínima da cunha da ferramenta na usinagem.

A fabricação do suporte iniciou com a averiguação das dimensões do inserto, realização de um esboço manual, posteriormente realizou-se a modelagem no Solid Edge Acadêmico e fabricação no centro de usinagem VEKER CVK800, máquina de 3 eixos do Laboratório de Usinagem CNC da UTFPR – Pato Branco. O material definido para a fabricação do suporte foi o aço SAE 4140.

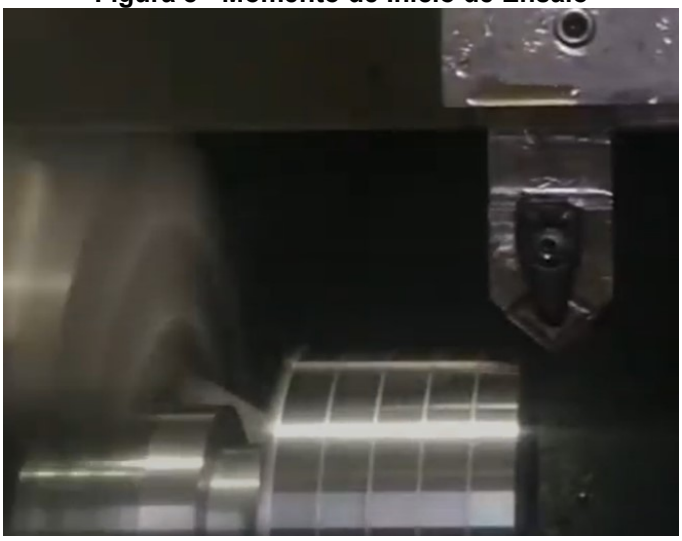
Com o suporte comercial devidamente preparado, e o suporte fabricado, foram então definidos parâmetros para os ensaios de dinamometria, os quais foram realizados no aço SAE 8620 após a preparação do corpo de prova com diâmetro de 75mm e 45mm de comprimento, dividido em partes de 9mm cada.

Os ensaios de dinamometria foram realizados no Laboratório de Usinagem da PUC - Curitiba, após a preparação do programa e da máquina CNC. Os ensaios foram iniciados com o suporte comercial, utilizando uma estratégia teste mono variável, ou seja, apenas a variável de corte é alterada em cada ensaio. Entretanto, em todos os experimentos adotou variações na velocidade de corte, avanço, ausência ou presença de fluido de corte e a variação do ângulo de inclinação. Apenas a

profundidade de corte não sofreu alterações, assim adotou para todos os ensaios o valor de 1mm.

As velocidades de corte no teste foram definidas de acordo com o especificado pelo fabricante, sendo: 350 e 265m/min. O avanço é outra variável de corte que também influencia na usinagem, neste caso, definiu para os ensaios avanços de 0.125 e 0.25mm/rot. Para todas as variáveis de corte definida realizou réplicas dos ensaios para maior confiabilidade dos resultados.

Figura 8 - Momento de Início de Ensaio



Fonte: Autoria Própria (2019)

A sequência de torneamento pode ser descrita como:

1 Posicionou o corpo de prova de aço SAE 8620 nas castanhas do torno CNC;
2 Fixou o suporte com a ferramenta de corte na célula de carga instalada na torre do equipamento;
3 Realizou o ensaio aplicando as velocidades de corte com o avanço fixo, cada uma em uma parte do corpo de prova;
4 Após o término do passe, realizou a verificação da rugosidade superficial, conforme descrito nesta etapa do trabalho;
5 Repetiu os ensaios aplicando o outro avanço definido inicialmente.

Após a coleta dos dados da usinagem utilizando o suporte comercial, é repedido os ensaios com o suporte fabricado aplicando a mesma metodologia, sequência e parâmetros de corte. Apenas utilizou uma matéria prima nova para evitar interferências nos resultados.

3.2 SUPORTES

O suporte comercial utilizado de fabricante desconhecido, utilizar é destinado para inserto romboidal na posição de uso da aresta obsoleta e posicionando a ferramenta na posição neutra (Figura 8).

O suporte tem ângulo de inclinação do inserto de -10°, aferido em projetor de perfil, que está muito próximo ao limite de -11°definido em norma ABNT NBR 6162/1989. Este suporte é supostamente fabricado em aço 4140.

Figura 9 - Suporte Comercial

Fonte: Autoria Própria (2019)

O suporte fabricado para a comparação com o suporte comercial foi fabricado em aço SAE 4140 (Figura 9). Adotou o ângulo de inclinação de -5°, respeitando assim o ângulo necessário de folga da cunha da ferramenta de 5° entre a cunha de corte e a matéria prima usinada. Este suporte foi projetado para receber um inserto de metal duro do tipo romboidal CNMG120408RH, posicionado na aresta obsoleta. O suporte tem dimensões laterais de 25x25mm, assim como o suporte comercial.

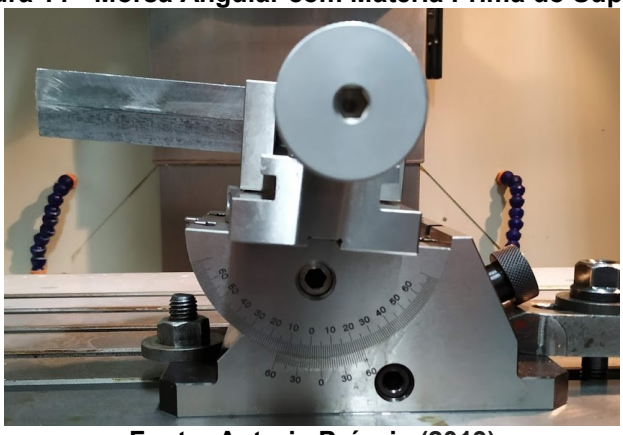
Figura 10 - Suporte Fabricado

Fonte: Autoria Própria (2019)

3.3 MORSA ANGULAR DE PRECISÃO

Devido a limitações do centro de usinagem e por ter disponível apenas fresas de topo reto para a fabricação do suporte, utilizou uma morsa angular de precisão (Figura 9) para posicionar o plano de trabalho do centro de usinagem a face superior do suporte onde posiciona-se o inserto, definindo assim a inclinação de -5° no suporte.

Figura 11 - Morsa Angular com Matéria Prima do Suporte

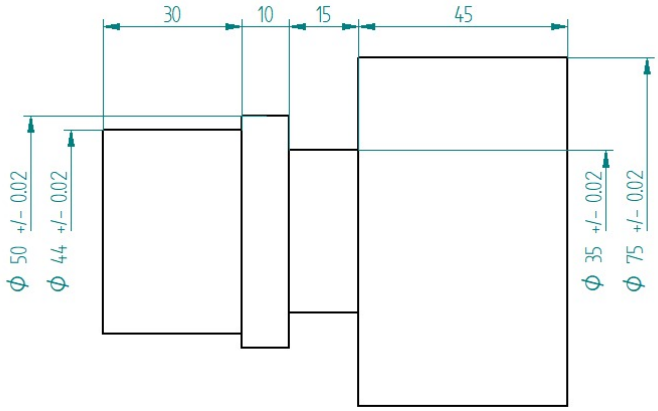


Fonte: Autoria Própria (2019)

3.4 MATÉRIA PRIMA PARA ENSAIO

Para o ensaio dinamométrico realizados no torno CNC do Laboratório de Usinagem da PUC-PR, fabricou-se corpos de prova do aço SAE 8620, por ser um aço utilizado nas empresas na fabricação de eixos para componentes de turbinas, onde algumas operações são realizadas com ferramentas romboidais na posição da aresta obsoleta.

Figura 12 - Detalhamento do Corpo de Prova



Fonte: Autoria Própria (2019)

O corpo de prova foi fabricado com geometria adequada para a correta fixação nas castanhas no torno CNC da PUCPR, conforme ilustração da Figura 10. O corpo de prova tem as dimensões conforme o demonstrado na Figura 10.

Foram fabricados dois corpos de prova para os ensaios, a sua fabricação se deu nos tornos convencionais do Laboratório de Usinagem da UTFPR – Campus Pato Branco em um torno convencional Romi Tormax 20.

3.5 CÉLULA DE CARGA

O torno CNC apresenta em sua torre um dinamômetro KLISTLER (Figura 16) acoplado em sistema de aquisição de dados respectivamente. Inicialmente foi necessário ajustar a taxa de aquisição dos sinais durante os ensaios.

Figura 13 - Placa de Descrição da Célula de Carga

Fonte: PUC Curitiba (2019)

Este tipo de dinamômetro é fabricado com célula de carga com capacidade de realizar leituras em três eixos, sendo os eixos X, Y e Z. Este equipamento foi ajustado para medir a força passiva (Fx) derivada da profundidade de corte, força de avanço (Fy) dada pelo movimento de avanço da ferramenta e força de corte (Fz) dada como resultado da velocidade de corte na configuração em que a célula se encontra instalada (Figura 17).

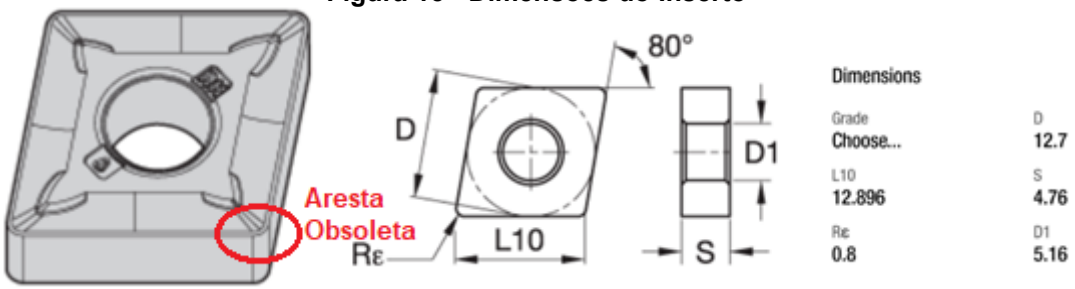
Figura 14 - Suporte Acoplado a Célula de Carga

Fonte: PUC Curitiba (2019)

3.6 INSERTOS

Os insertos utilizados para o experimento são do tipo romboidais da marca WIDIA, do modelo CNMG120408RH, tem ângulo de ponta de 80°, 4.76 mm de espessura, raio de ponta de 0.8 mm e diâmetro da circunferência inscrita no inserto de 12.7mm.

Figura 15 - Dimensões do Inserto

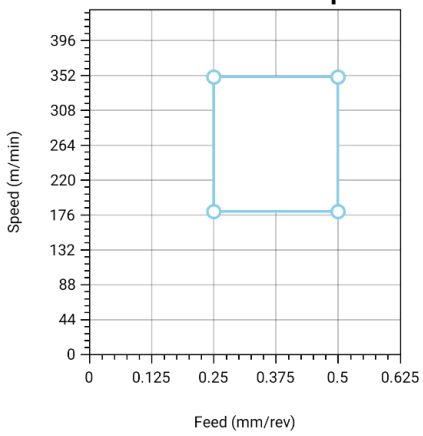


Fonte: Adaptado de *WIDIA Machining Central App* (2019)

Para o seguinte inserto serão definidas faixas de trabalho onde será fixado um valor de profundidade de corte (Ap) único e um valor de avanço também único, e para obter diferentes taxas de remoção de material, apenas a velocidade de corte será variada, com o intuito de se gerar assim menos variáveis que venham a influenciar as análises.

Na Figura 22 se pode ver um gráfico com uma área de atuação indicada pelo fabricante para a ferramenta em questão na usinagem de metais com dureza menor que 260 Hb. Caso do 8620 normalizado que será utilizado como o material a ser usinado. Esse gráfico mostra a faixa de avanço em milímetros por revolução, da mínima a máxima, e também indica a velocidade de corte, em metros por minuto em que o inserto pode trabalhar para as velocidades de avanço em questão.

Figura 16 - Faixa de Velocidade de Corte por Avanço do Inserto



Fonte: Adaptado de *WIDIA Machining Central App* (2019)

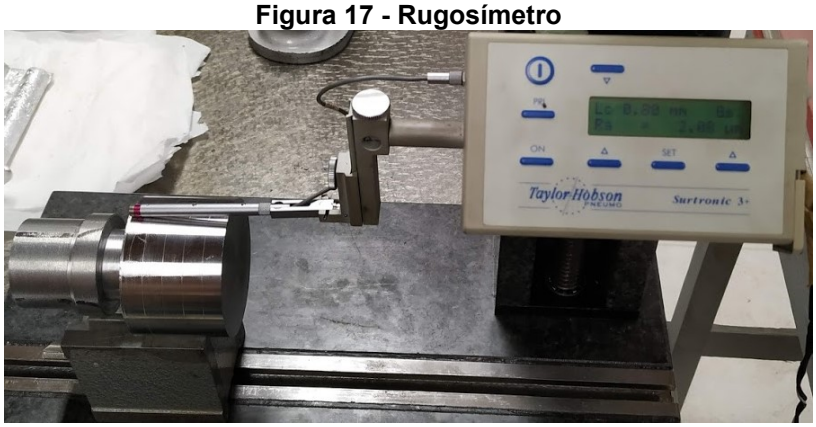
3.7 Fluido de Corte

O fluido sintético Mobilcut 321 da marca Mobil foi utilizado nos ensaios realizados com lubri-refrigeção na proporção de 1:20. Segundo a fabricante, este fluído de corte é biestável, livre de óleos minerais, desenvolvido para procedimentos de alta performance como retificas e usinagem leve, aumentando a vida útil do ferramental utilizado.

3.8 Rugosímetro

Para medir a rugosidade superficial resultante de cada procedimento experimental foi utilizado o Rugosímetro da marca Taylor Hobson, do modelo Surtronic 3+ (Figura 20) localizado também no laboratório de Usinagem da PUC-PR.

Figura 17 - Rugosímetro



Fonte: Autoria Própria (2019)

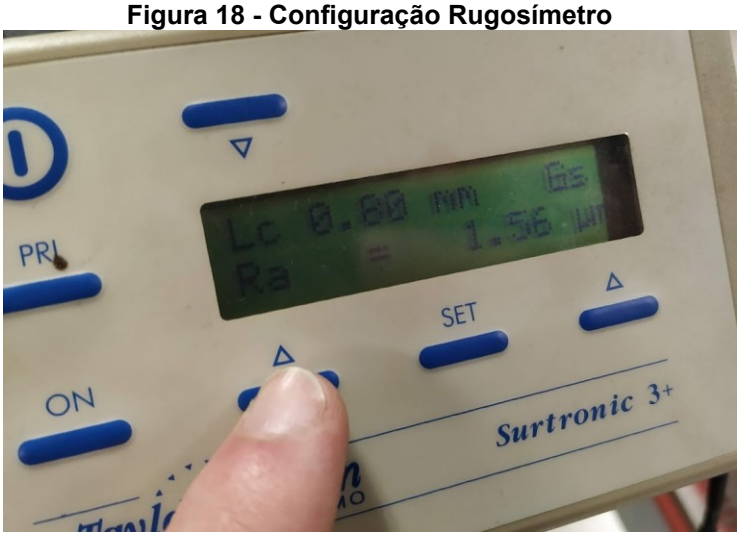
Trata-se de um Rugosímetro acoplado em uma torre com regulagem de altura, para que a ponta do apalpador realize corretamente a leitura da superfície do corpo de prova.

Para medir a rugosidade, foi posicionado o corpo de prova na base magnética do rugosímetro, ajustou-se a altura do apalpador sobre a superfície usinada e comprimento de amostragem em 0.8mm (*cut-off*).

As medições de R_a ou rugosidade aritmética principal, foram realizadas em todas as superfícies na qual aplicou as variações dos avanços e velocidades de corte definidos para o trabalho, corte a seco ou com fluído de corte e a utilização dos suportes comercial (com ângulo de -10°) e fabricado (ângulo de -5°). Para maior confiabilidade dos resultados, realizou três medições de rugosidade para cada

condição de corte equidistantes entre si em 120° ao longo da circunferência do corpo de prova.

Figura 18 - Configuração Rugosímetro



Fonte: Autoria Própria (2019)

Em seguida, quando foram realizados os ensaios monovariáveis com os três diferentes avanços e todas as rugosidades foram medidas, com o mesmo suporte é repetido todo o procedimento, desta vez com a utilização de fluido de corte durante a usinagem. Novamente se repetem todos os processos e então o mesmo é feito com o suporte fabricado com ângulo de inclinação de -5°.

4 RESULTADOS

Os experimentos realizados neste trabalho resultaram em uma gama de variáveis a serem analisadas, principalmente a força resultante de usinagem e a rugosidade superficial. A força resultante de usinagem é formada pela soma vetorial resultante das três componentes com valores mensurados durante a dinamometria e as rugosidades foram mensuradas através do uso de rugosímetro de mesa. Existem outras análises que podem ser feitas a partir de resultados qualitativos e não apenas quantitativos, como por exemplo a vibração mecânica durante a usinagem e o desgaste e avarias nas ferramentas de corte.

As comparações quantitativas, de forças de usinagem e rugosidade foram realizadas com o método fatorial 2k, definiu para compor a matriz fatorial 2k, as velocidades de 350 e 265 m/min, por representarem os extremos das medidas onde temos resultados passiveis de análise.

Então assim todos os fatores estão determinados em dois níveis para a análise fatorial 2k, esses fatores são, primeiramente o ângulo de inclinação, -5° e -10° definidos pela inclinação de cada um dos dois suportes, velocidade de corte de 350m/min e 265m/min, definidos pela análise e ensaios de pré-testes, avanços de 0.125mm/rot e 0.25mm/rot, esse definido pela análise da rugosidade superficial. Por fim, adotou no planejamento o uso ou não de fluido de corte.

Com a definição das variáveis da matriz de planejamento, foi elaborada a tabela de combinações. Esta tabela com todos os fatores e seus devidos níveis, bem como todos os resultados quantitativos obtidos para cara combinação, encontra-se no Apêndice A deste trabalho. Nesta tabela a força de usinagem foi obtida através da soma vetorial das médias como valores das forças de corte, força de avanço e força passiva, obtidas na dinamometria.

4.1 FLUÍDO DE CORTE

Na primeira análise dos resultados, foi identificada a influência do corte com e sem o uso de fluído de corte. Para isso foram escolhidos e analisados entre si os experimentos onde ocorreu apenas a variação de fluído de corte. Comparando os seguintes experimentos e resultados.

A Tabela 4 indica a diferença de força de usinagem e rugosidade para todas as combinações onde temos apenas variação do uso de fluído de corte em cada experimento, dessa forma pode-se observar um padrão, onde tanto a força de usinagem como a rugosidade foram maiores nos experimentos onde adotou-se fluído de corte.

Tabela 3 - Comparação de Uso de Fluído

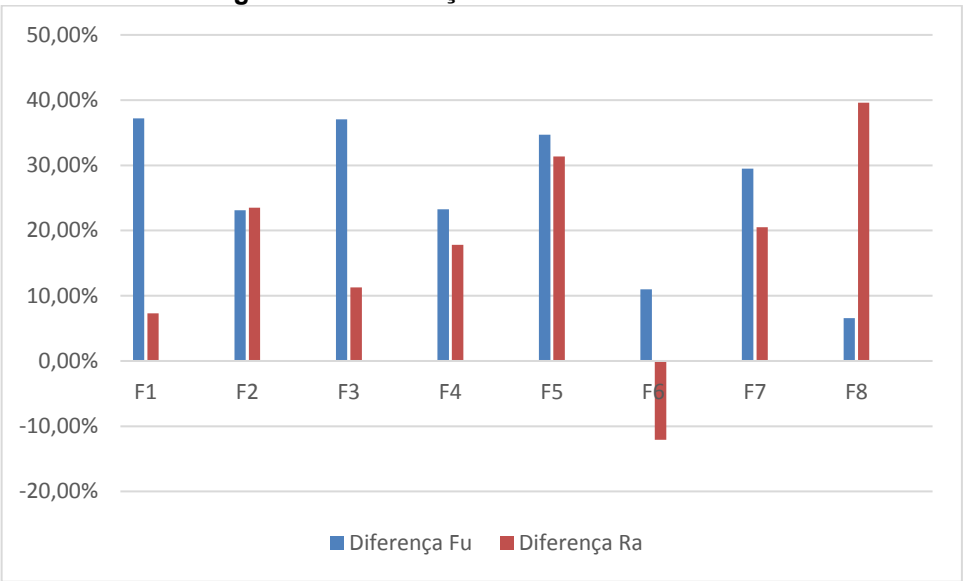
Combinação	Experimento	Fluído	λ	Vc	F	Fu (N)	Diferença Fu	Ra (µm)	Diferença Ra
F1	1	Com	-5	350	0,25	1052,36	37,18%	2,74	7,30%
	9	Sem				661,06		2,54	
F2	2	Com	-10	350	0,25	849,20	23,11%	2,04	23,53%
	10	Sem				652,91		1,56	
F3	3	Com	-5	265	0,25	1103,63	37,05%	2,84	11,27%
	11	Sem				694,72		2,52	
F4	4	Com	-10	265	0,25	862,37	23,27%	2,02	17,82%
	12	Sem				661,70		1,66	
F5	5	Com	-5	350	0,125	707,12	34,72%	1,02	31,37%
	13	Sem				461,63		0,70	
F6	6	Com	-10	350	0,125	557,82	10,97%	0,58	-12,07%
	14	Sem				496,62		0,65	
F7	7	Com	-5	265	0,125	752,82	29,51%	0,78	20,51%
	15	Sem				530,64		0,62	
F8	8	Com	-10	265	0,125	567,35	6,58%	1,06	39,62%
	16	Sem				530,00		0,64	

Fonte: Autoria Própria (2020)

No menor caso de diferença na força de usinagem (Fu), na combinação F8 a diferença atingiu os 37,35N, uma redução de 6,58% do experimento 8 para o 16. Porém em F1, a diferença foi de 391,3N a mais com o uso de fluído de corte, representando uma redução de 37,18% do ensaio 1 para o ensaio 9.

Na Figura 19, é possível visualizar as diferenças de forças de usinagem e rugosidades, ambas obtidas na comparação com o uso de fluído de corte. Quando analisada a rugosidade superficial, percebe-se um aumento nos valores obtidos nas combinações, exceto na combinação F6, onde temos inclinação de -10º, Vc de 350m/min e 0.125mm/rot de avanço. Na combinação de parâmetros F8 ocorreu uma variação de até 39,62%.

Figura 19 - Diferenças com Fluído de Corte



Fonte: Autoria própria (2020)

Essa variação, indica um aumento da força de corte e rugosidade nos casos em análise, resultado da utilização do fluído de corte, explicado pela redução da temperatura de corte resultante do processo de usinagem. No corte sem o uso de fluido, as altas temperaturas diminuem a resistência ao cisalhamento do material, consequentemente, reduzindo as forças de usinagem, porem essa maior temperatura irá prejudicar a ponta da ferramenta, bem como sua vida útil.

4.2 AVANÇO

Seguindo o procedimento anterior, agora analisando os experimentos que variam entre si apenas o avanço temos a Tabela 5. A partir destes dados, pode-se observar que os valores de maior Fu e Ra são todos correspondentes aos procedimentos com maiores avanços. Com suas diferenças indicadas na Figura 20.

Observa-se na Figura 20 a influência do avanço nas forças de usinagem, todos os maiores avanços tiveram como resultado um aumento considerável na força de corte, chegando a maior diferença com redução de 34,31% na combinação A2, apenas por reduzir o avanço.

Nas combinações A1, A3, A4 e A5 os valores foram parecidos para diferenças de Fu. Destaque para as menores diferenças correspondentes as últimas 3 comparações (A6, A7 e A8), provavelmente tiveram menores valores por se tratar

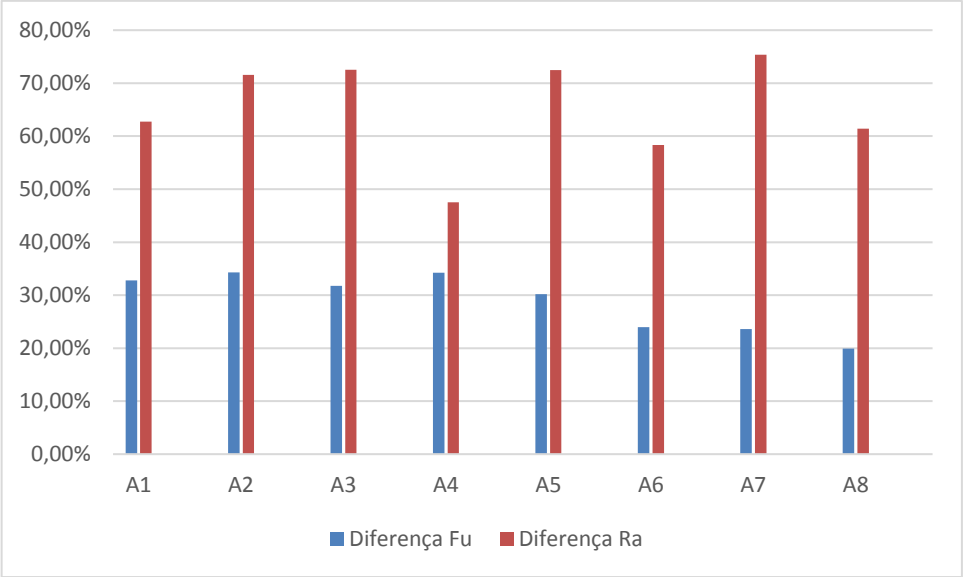
de experimentos onde não se utilizou fluído de corte, ressaltando novamente a influência do uso de fluído no processo de usinagem.

Tabela 4 – Comparação de Avanços

Combinação	Experimento	F	λ	Vc	Fluído	Fu (N)	Diferença Fu	Ra (µm)	Diferença Ra
A1	1	0,25	-5	350	Com	1052,36	32,81%	2,74	62,77%
	5	0,125				707,12		1,02	
A2	2	0,25	-10	350	Com	849,20	34,31%	2,04	71,57%
	6	0,125				557,82		0,58	
A3	3	0,25	-5	265	Com	1103,63	31,79%	2,84	72,54%
	7	0,125				752,82		0,78	
A4	4	0,25	-10	265	Com	862,37	34,21%	2,02	47,52%
	8	0,125				567,35		1,06	
A5	9	0,25	-5	350	Sem	661,06	30,17%	2,54	72,44%
	13	0,125				461,63		0,70	
A6	10	0,25	-10	350	Sem	652,91	23,94%	1,56	58,33%
	14	0,125				496,62		0,65	
A7	11	0,25	-5	265	Sem	694,72	23,62%	2,52	75,40%
	15	0,125				530,64		0,62	
A8	12	0,25	-10	265	Sem	661,70	19,90%	1,66	61,45%
	16	0,125				530,00		0,64	

Fonte: Autoria Própria (2020)

Figura 20 - Diferenças com Avanço



Fonte: Autoria Própria (2020)

A explicação ao fenômeno quantificado no experimento de dinamometria, onde se comprovam maiores forças com maior avanço, se dá pelo fato do maior avanço aumentar a pressão de corte no sentido axial no processo de torneamento,

isso influência não apenas na força de avanço, mas todas as forças de corte. Esse fator pode a longo prazo interferir na rigidez da máquina ferramenta.

Quanto a rugosidade, os aumentos são influenciados pelo avanço e raio de ponta da ferramenta. O raio de ponta é sempre o mesmo em todos os casos, 0.8mm, porém ele influencia por ser um raio pequeno, com os avanços utilizados de 0.125 e 0.25 mm/rot, onde com o segundo avanço sendo o dobro do primeiro, a usinagem deixa maiores cristas que a ferramenta não consegue tirar por conta do raio de ponta.

Se nota na Figura 20 reduções nos valores de diferença de R_a entre 70% e 75% nas comparações A2, A3, A5 e A7, resultados da utilização de 50% do avanço inicial, indicando que para se obter bons acabamentos, avanços baixos são essenciais com ferramentas de pequeno raio de ponta.

4.3 VELOCIADE DE CORTE

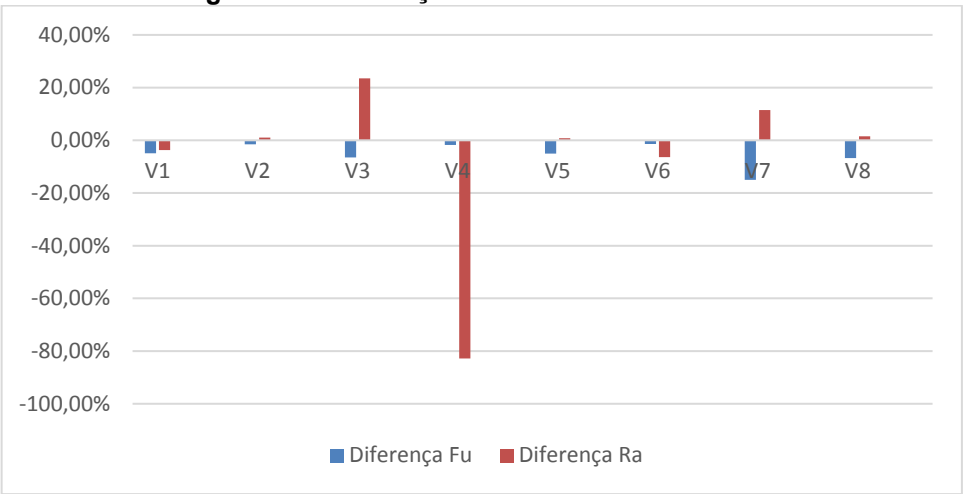
Como é possível observar na Tabela 7, todos os experimentos comparados tiveram uma redução na Fu, conforme a velocidade de corte V_c aumentou.

Tabela 5 – Comparação de Velocidade de Corte

Combinação	Experimento	Vc	λ	F	Fluído	Fu (N)	Diferença Fu	Ra (µm)	Diferença Ra
V1	1	350,00	-5	0,25	Com	1052,36	-4,87%	2,74	-3,65%
	3	265,00				1103,63		2,84	
V2	2	350,00	-10	0,25	Com	849,20	-1,55%	2,04	0,98%
	4	265,00				862,37		2,02	
V3	5	350,00	-5	0,125	Com	707,12	-6,46%	1,02	23,53%
	7	265,00				752,82		0,78	
V4	6	350,00	-10	0,125	Com	557,82	-1,71%	0,58	-82,76%
	8	265,00				567,35		1,06	
V5	9	350,00	-5	0,25	Sem	661,06	-5,09%	2,54	0,79%
	11	265,00				694,72		2,52	
V6	10	350,00	-10	0,25	Sem	652,91	-1,35%	1,56	-6,41%
	12	265,00				661,70		1,66	
V7	13	350,00	-5	0,125	Sem	461,63	-14,95%	0,70	11,43%
	15	265,00				530,64		0,62	
V8	14	350,00	-10	0,125	Sem	496,62	-6,72%	0,65	1,54%
	16	265,00				530,00		0,64	

Fonte: Autoria Própria (2020)

Figura 21 - Diferenças com Velocidade de corte



Fonte: Autoria Própria (2020)

As pequenas diferenças nas forças, em comparação com as diferenças analisadas anteriormente mostram que a velocidade de corte é um fator com uma interferência menor, mas que deve ser levada em consideração, pois pôde-se obter uma diferença de Fu de aproximadamente 14.95%, como é o caso da combinação V7 (Figura 21). Importante ressaltar que os valores percentuais negativos de diferenças indicam um aumento das forças.

Ao analisar os valores de rugosidade (Ra), pode-se notar pequenas alterações ocasionada pelo aumento de Vc, no entanto, ocorreu um aumento de 82,76% em V4, uma variação de 48µm. Essa variação levanta a suspeita de interferência de fatores como impurezas no material usinado e na região analisada.

Com isso pode-se dizer que embora em um dos casos tenha ocorrido diferença significativa de Ra, isso não é um padrão, então a velocidade de corte não pode ser considerada fator que influenciou nos valores de Ra neste experimento.

Quanto a Vc, pode-se concluir que quando necessário for, diminuir a força de usinagem, deve-se procurar aumentar a Vc, sempre respeitando os limites estipulados pelo fabricante.

4.4 ÂNGULO DE INCLINAÇÃO

A partir dos dados da Tabela 8, quando analisamos as forças de usinagem nota-se um aumento de Fu com o menor ângulo de inclinação (-10º), no entanto as 4 primeiras combinações de experimentos (λ1, λ2, λ3 e λ4) com fluído de corte, apresentaram um padrão diferente das 4 ultimas combinações de experimentos sem

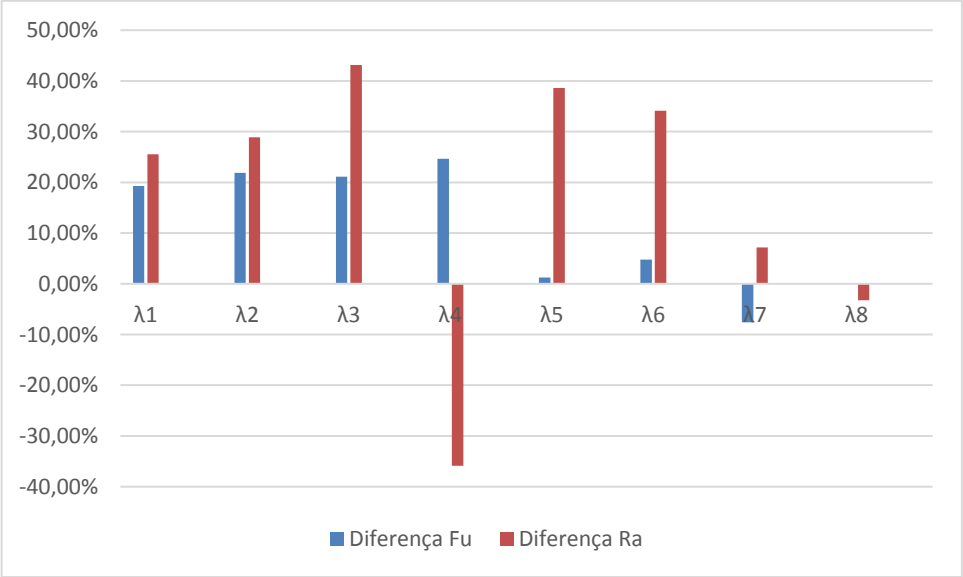
fluído de corte (λ5, λ6, λ7 e λ8). Isso é mais um indicativo da importância e influência do uso ou não de fluído de corte.

Tabela 6 - Comparação de Ângulo de Inclinação

Combinação	Experimento	λ	Vc	F	Fluído	Fu (N)	Diferença Fu	Ra (µm)	Diferença Ra
λ1	1	-5	350	0,25	Com	1052,36	19,30%	2,74	25,55%
	2	-10				849,20		2,04	
λ2	3	-5	265	0,25	Com	1103,63	21,86%	2,84	28,87%
	4	-10				862,37		2,02	
λ3	5	-5	350	0,125	Com	707,12	21,11%	1,02	43,14%
	6	-10				557,82		0,58	
λ4	7	-5	265	0,125	Com	752,82	24,64%	0,78	-35,90%
	8	-10				567,35		1,06	
λ5	9	-5	350	0,25	Sem	661,06	1,23%	2,54	38,58%
	10	-10				652,91		1,56	
λ6	11	-5	265	0,25	Sem	694,72	4,75%	2,52	34,13%
	12	-10				661,70		1,66	
λ7	13	-5	350	0,125	Sem	461,63	-7,58%	0,70	7,14%
	14	-10				496,62		0,65	
λ8	15	-5	265	0,125	Sem	530,64	0,12%	0,62	-3,23%
	16	-10				530,00		0,64	

Fonte: Autoria Própria (2020)

Figura 22 - Diferenças com Ângulo de Inclinação



Fonte: Autoria Própria (2020)

Fazendo uma análise de forma independente e correlacionando as quatro primeiras combinações (λ1 até λ4) e as quatro ultimas (λ5 até λ8), percebe-se que com a presença de fluído de corte e ângulo de inclinação menor (-10º) aumenta-se as forças de usinagem proporcionalmente aos aumentos sem fluído de corte. Essa

influência mostra que em situações onde o material se encontra com maior rigidez, um ângulo de inclinação da ferramenta mais negativo seria mais adequado.

Levando em conta a rugosidade, nota-se que existem diferenças próximas nas combinações λ1 e λ2, bem como λ5 e λ6, e casos com grande redução de Ra, (chegando a 43,14%), embora em λ4 tenha ocorrido um aumento, o qual no gráfico da Figura 22 foi indicado pela porcentagem de diferença negativa. Um fator que pode estar relacionado a piores rugosidades é o fato de que com um ângulo de inclinação de -5º se tem um ângulo de folga de flanco de 5º (por se tratar de uma ferramenta sem ângulo de folga), causando um atrito que prejudicaria a rugosidade, porém não foi possível realizar um ensaio de tribologia para averiguar essa possibilidade.

Essas rugosidades também podem estar relacionadas a posição do uso do inserto na aresta obsoleta, que faz a geometria da ferramenta ficar com ângulo de ponta de 100 graus, e esse fator aliado a inclinação, não são suficientes para um valor de Ra aceitável para acabamento, fazendo com que essa ferramenta seja direcionada apenas para desbastes.

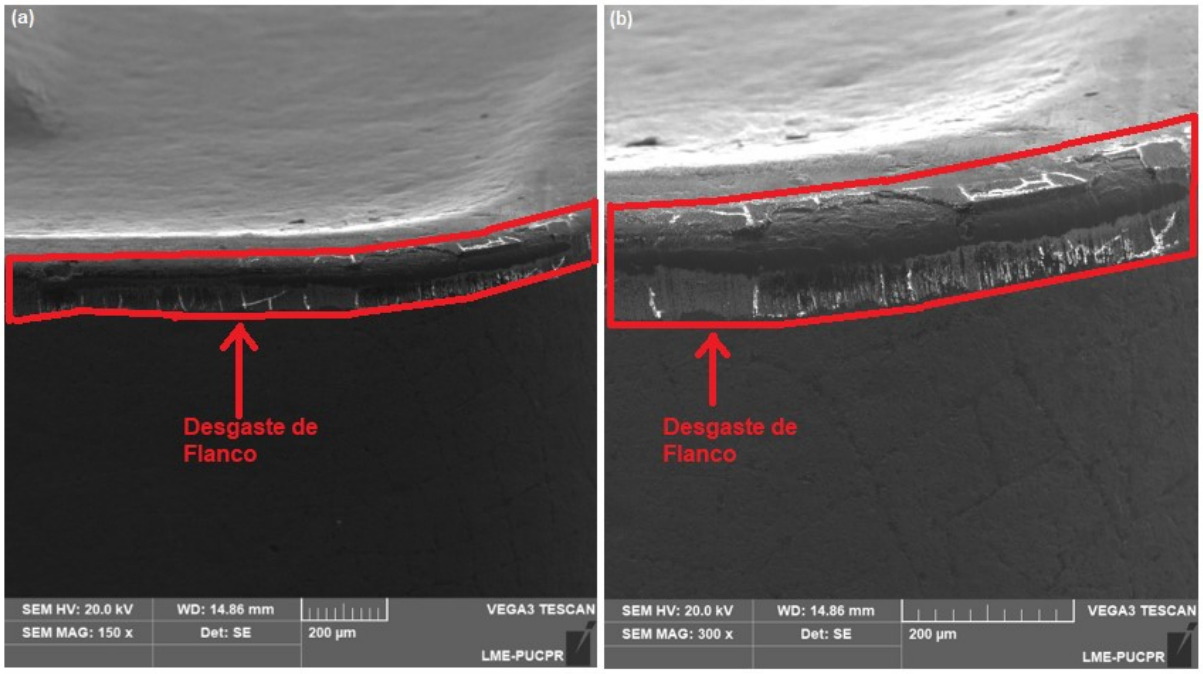
4.4.1 Avarias e Desgaste de Ferramenta

O uso da ferramenta romboidal na aresta obsoleta com as variações de inclinação apresenta elevada resistência da ponta da ferramenta, isso pois o ângulo de folga da cunha se altera. Em casos com ângulos de inclinação mais negativo, o ângulo de cunha aumenta, por consequência, a aresta de corte está mais suscetível a fraturas frágeis, como um lascamento.

Após os ensaios as duas ferramentas, como foram utilizadas nos experimentos apenas duas ferramentas, uma para cada ângulo de inclinação, passando pela mesma quantidade de ensaios, foram analisadas por MEV, resultando nas imagens da Figura 23, onde pode-se observar a cunha cortante da ferramenta utilizada nas usinagens, um inserto com ângulo de -5 graus. Nota-se que a superfície principal de folga apresentou avarias, ficando o desgaste localizado na aresta de corte e ponta da ferramenta. Trata-se de um desgaste de flanco, característico do atrito causado pelo posicionamento da ferramenta e pelo baixo ângulo de inclinação.

Pela escala do MEV, o desgaste apresentou comprimento de 120µm, representando um comprimento de desgaste equivalente a aproximadamente 6% do raio de ponta da ferramenta. Este caso é considerado um desgaste pequeno.

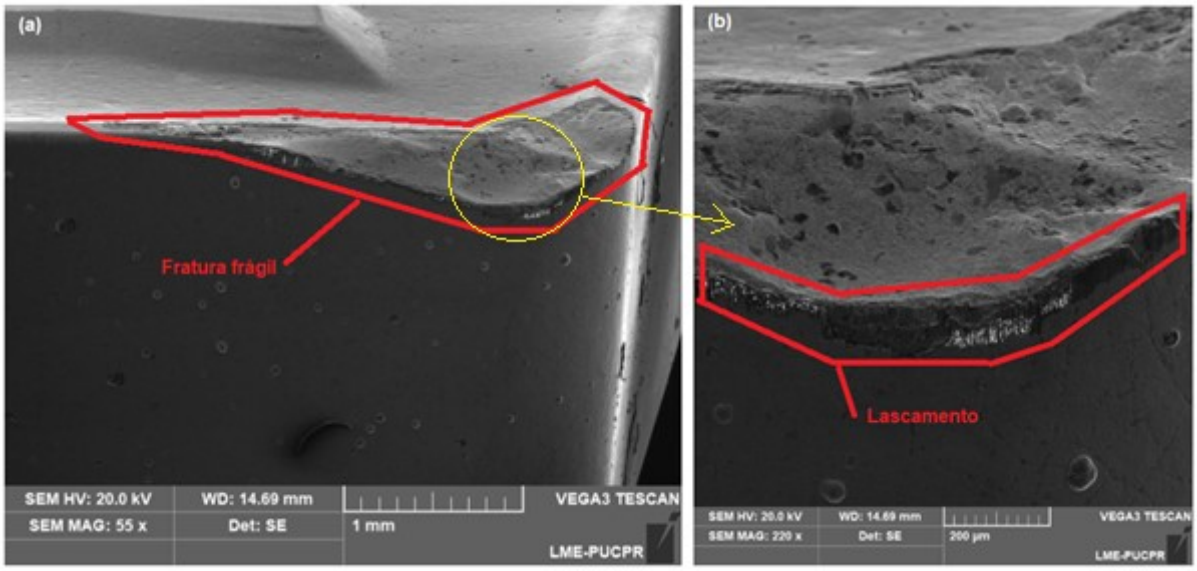
Figura 23 - MEV Ferramenta -5 graus: (a) desgaste de flanco zoom 150x, (b) desgaste de flanco zoom 300 x



Fonte: Autoria Própria (2019)

Na Figura 24a pode-se observar a formação de cratera após a fratura, também, na Figura 24b, pode-se observar a região de fratura localizada na parte inferior do raio de ponta da ferramenta, onde é perceptível um certo lascamento.

Figura 24 – MEV ferramenta de -10 graus: (a) Fratura frágil inserto romboidal, (b) lascamento região do raio da ferramenta.



Fonte: Autoria Própria (2019)

Na ferramenta utilizada no procedimento com ângulo de inclinação de -10 graus (Figura 24), ocorreu uma fratura na ferramenta no último ensaio realizado, especificadamente na saída da ferramenta da peça.

A fratura apresenta 2.5mm de comprimento, perpendicular a aresta de corte, sendo por esse motivo considerada uma falha catastrófica, segundo critérios de fim de vida recomendados pela Norma ISSO 3685 (1977). O ângulo de inclinação em ferramentas pode sempre variar de -11 a +11 graus, nesse caso um ângulo de -10 graus é um ângulo bastante negativo, isso pode ter influenciado a falha, pois a ponta da ferramenta fica mais suscetível a forças que podem provocar a fratura frágil.

5 CONCLUSÕES

A partir dos ensaios experimentais realizados, a análises dos dados com a utilização do método de análise de experimentos fatorial 2k, foi possível identificar a influência de cada fator separadamente com as seguintes afirmações.

- O fluído de corte tem papel fundamental na eficiência da usinagem, principalmente quando a ferramenta aquece devido a longos períodos de usinagem, entretanto, seu uso não é necessário em situações onde a usinagem não produz calor em excesso.
- As variações das taxas de avanço influenciam principalmente a rugosidade superficial, sendo que quando menores rugosidades forem necessárias, menores devem ser os avanços aplicados. Em operações de desbaste avanços maiores são comumente adotados, entretanto, o aumento do avanço, influencia as componentes da força de usinagem.
- A rugosidade não sofreu influência significativa da velocidade de corte, no entanto esta variável foi a única que quando aumentada causou uma redução nas forças de usinagem, devido à elevação da temperatura e consequentemente, redução da resistência ao cisalhamento do material.
- O ângulo de -10 graus se mostrou mais favorável quanto as forças e rugosidades durante a usinagem, resultados estes superiores ao inserto com -5 graus. No entanto o suporte com ângulo mais negativo torna-se frágil, como pode-se constatar neste trabalho, onde o inserto na posição de -10 graus sofreu uma fratura frágil, uma falha catastrófica enquanto que o inserto posicionado a -5 graus teve apenas um pequeno desgaste por abrasão.

REFERÊNCIAS

MACHADO, Alisson Rocha et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3. ed. Uberlândia: Blucher, 2015. 407 p.

REIS, Alexandre Martins. **Influência do Ângulo de Posição Secundário da Ferramenta, Raio de Ponta e Lubrificação na Usinagem em Presença de Aresta Postiça de Corte**. 2000. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2000.

KIBBE, Richard R. et al. **Machine Tool Pratices**. 7. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2003. 816 p.

CARUSO. **Informações Gerais Sobre Aços**. São Paulo: Cefet - Sp, 2001.

CARPINETTI, Luiz C. R.. **Planejamento e Análise de Experimentos**. 2009. 222 f. Departamento de Engenharia de Produção, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

WIDIA. **WIDIA Machining Central App**. 2019. Disponível em: <https://www.widia.com/en/featured/WidiaMobileApp.html?s_kwcid=AL!8748!3!291665655772!b!!g!!widia&gclid=Cj0KCQjwxYLoBRCxARIsAEf16-tHUOQZw3UbesGDTDki01h2yAUDhObuj0Hh4IbkjlRaQdkLq1-l-lYaAv1CEALw_wcB#>. Acesso em: 10 mar. 2019.

GGD. **Aço 8620**. GGD Metals. Disponível em: https://ggdmetals.com.br/wp-content/uploads/2015/07/A%C3%87O-8620.pdf. Acesso em: 10 mar. 2019.

DEDAVID, Berenice Anina; GOMES, Carmem Isse; MACHADO, Giovanna. **Microscopia Eletrônica de Varredura: aplicações e preparação de amostras**. Porto Alegre: Edipucrs, 2007. 60 p.

ALI, M. H. et al. **FEM to predict the effect of feed rate on surface roughness with cutting force during face milling of titanium alloy**. HBRC Journal, v. 9, n. 3, p. 263–269, 1 dez. 2013.

BOBZIN, K. **High-performance coatings for cutting tools**. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, v. 18, n. 2016, p. 1–9, 2017.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 8. ed. São Paulo, Brasil: Artliber Editora Ltda, 2013.

FELHŐ, C.; KARPUSCHEWSKI, B.; KUNDRÁK, J. **Surface Roughness Modelling in Face Milling**. Procedia CIRP, v. 31, p. 136–141, 1 jan. 2015.

FERRARESI, D. **Usinagem dos metais: Fundamentos da usinagem dos metais**. 1. ed. São Paulo - SP: Editora Edgard Blucher, 1977. v. 4

GRIFFITHS, B. **Manufacturing surface technology: surface integrity & functional performance**. London: Penton Press: Penton, 2001.

GÜNAY, M. et al. **Experimental investigation of the effect of cutting tool rake angle on main cutting force**. Journal of Materials Processing Technology, v. 166, n. 1, p. 44–49, 15 jul. 2005.

LU, L. et al. **Microstructure and cutting performance of CrTiAlN coating for high-speed dry milling**. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, v. 24, n. 6, p. 1800–1806, 1 jun. 2014.

LU, T. et al. **Advances in Sustainable Manufacturing**. Advances in Sustainable Manufacturing, 2011.

QIAN, L.; HOSSAN, M. R. **Effect on cutting force in turning hardened tool steels with cubic boron nitride inserts**. Journal of Materials Processing Technology, v. 191, n. 1–3, p. 274–278, 1 ago. 2007.

RIBEIRO, J. L. S.; ABRÃO, A. M.; SALES, W. F. **Forças de usinagem no fresamento de aços para matrizes**. Simpósio de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, n. Novembro, 2015.

SAGLAM, H.; YALDIZ, S.; UNSACAR, F. **The effect of tool geometry and cutting speed on main cutting force and tool tip temperature**. Materials & Design, v. 28, n. 1, p. 101–111, 1 jan. 2007.

SKERLOS, S. J. et al. **A Review of Engineering Research in Sustainable Manufacturing**. Journal of Manufacturing Science and Engineering, v. 135, n. 4, p. 041013, 2013.

THOMAS, T. R. **Rough Surfaces**. 2. ed. Göteborg, Suécia: Imperial College Press, 1999.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal cutting**. 4. ed. London: Butterworth-Heinemann, 2000.

APÊNDICE A – TABELA COMPLETA DE COMBINAÇÃO DE VARIÁVEIS E RESULTADOS OBTIDOS A PARTIR DE ENSAIOS DINAMOMÉTRICOS

Número da Combinação	Variáveis				Resultados				
	Ângulo (graus)	Vc (m/min)	F (mm/rot)	Fluído	Fc (N)	Ff (N)	Fp (N)	Fu (N)	Ra (µm)
1	-5	350	0,25	Com	674,40	593,30	548,30	1052,36	2,74
2	-10	350	0,25	Com	587,60	490,20	368,20	849,20	2,04
3	-5	265	0,25	Com	696,10	630,20	579,90	1103,63	2,84
4	-10	265	0,25	Com	592,00	508,10	367,50	862,37	2,02
5	-5	350	0,125	Com	412,30	428,00	383,20	707,12	1,02
6	-10	350	0,125	Com	385,70	214,40	340,40	557,32	0,58
7	-5	265	0,125	Com	428,00	466,80	407,00	752,82	0,78
8	-10	265	0,125	Com	399,20	231,00	330,40	567,35	1,06
9	-5	350	0,25	Sem	552,60	187,50	310,60	661,06	2,54
10	-10	350	0,25	Sem	545,20	181,70	309,90	652,91	1,56
11	-5	265	0,25	Sem	567,60	224,60	331,70	694,72	2,52
12	-10	265	0,25	Sem	544,80	210,80	310,80	661,70	1,66
13	-5	350	0,125	Sem	353,90	170,00	242,30	461,36	0,7
14	-10	350	0,125	Sem	350,20	244,30	253,60	496,62	0,65
15	-5	265	0,125	Sem	397,20	215,70	278,00	530,64	0,62
16	-10	265	0,125	Sem	381,70	251,00	268,70	530,00	0,64