

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

TOBIAS DUTRA DOS SANTOS

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE FERRAMENTA DA LINHA *STANDARD* E
FERRAMENTA ESPECIAL NO FRESAMENTO DE AÇO INOX**

CAXIAS DO SUL

2021

TOBIAS DUTRA DOS SANTOS

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE FERRAMENTA DA LINHA *STANDARD* E
FERRAMENTA ESPECIAL NO FRESAMENTO DE AÇO INOX**

Trabalho de Conclusão de Curso II
(MEC0291AA) apresentado à Universidade
de Caxias do Sul como requisito parcial à
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia
Mecânica.

Área de concentração: Processos de
Fabricação – Ferramentas.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Fassini
Michels.

CAXIAS DO SUL

2021

TOBIAS DUTRA DOS SANTOS

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE FERRAMENTA DA LINHA *STANDARD* E
FERRAMENTA ESPECIAL NO FRESAMENTO DE AÇO INOX**

Trabalho da disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Processos de Fabricação – Ferramentas.

Aprovado em: 24 / 06 / 2021

Banca Examinadora

Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Ms. Rafael Dallegrave Conrado
Universidade de Caxias do Sul

Dedico este trabalho à minha família, em especial a meu pai Leonel e minha mãe Rogéria, que sempre me proporcionaram as melhores oportunidades possíveis, também à minha esposa Tarciana, pelo companheirismo e apoio ao longo da vida acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador deste trabalho, professor Dr. Alexandre Fassini Michels, pelas instruções e apoio ao longo da realização do estudo.

À empresa WMTools, especialmente Sr. Wilson e Marcelo, que disponibilizaram materiais e recursos para que os testes pudessem se concretizar e por todo apoio financeiro ao longo do curso.

Ao técnico de laboratório Gaston Rossa, pelo apoio e disponibilidade durante a realização dos ensaios e medições.

A todos aqueles que ajudaram, de maneira indireta ou indireta, com dicas ou material de apoio, meu muito obrigado.

RESUMO

Devido à concorrência cada vez mais acirrada no mercado de fornecimento de ferramentas para usinagem, tornou-se indispensável a evolução e o aprimoramento constante atrelados às novas tecnologias de manufatura. Custo benefício e vida útil são controlados minuciosamente por clientes de ferramentas especiais, as quais tem um valor agregado maior do que ferramentas simples de catálogo. Este trabalho tem como objetivo fazer um comparativo entre uma ferramenta *standard* e uma ferramenta especial no fresamento de desbaste do aço inox 420, aplicando na ferramenta especial hélices desiguais entre seus canais, divisão desigual, e algumas mudanças pontuais de geometria. O método utilizado foi o fresamento de canto a 90 graus, no sentido concordante com movimentos passantes pelo corpo de prova. As ferramentas foram testadas em três condições diferentes de usinagem, com paradas a cada 5,55 metros lineares usinados para medição da marca de desgaste de flanco. O critério estabelecido para fim de vida foi de $v_b máx = 0,2 \text{ mm}$. Na condição recomendada pelo catálogo do fabricante tiveram mesmo desempenho, em uma condição severa de usinagem os dois modelos sofreram lascamento precoce, no entanto em uma condição intermediária a ferramenta especial teve diferença expressiva em sua vida útil em relação a ferramenta *standard*. Concluiu-se que uma combinação de fatores resultou em um acréscimo na estabilidade da ferramenta proposta no trabalho, a qual se mostrou efetiva para o processo.

Palavras-chave: Fresamento, Ferramenta especial, Hélices desiguais, Inox 420, Vida útil.

ABSTRACT

Due to the increasingly fierce competition in the market for the supply of machining tools, the evolution and constant improvement linked to new manufacturing technologies has become indispensable. Cost-effectiveness and service life are closely controlled by special tool customers, which have a higher added value than simple catalog tools. This work aims to make a comparison between a standard tool and a special tool in rough milling of 420 stainless steel, applying unequal helices between its grooves, unequal division, and some specific geometry changes in the special tool. The method used was corner milling at 90 degrees, in the concordant direction with passing movements through the test body. The tools were tested under three different machining conditions, with stops every 5,55 linear meters of material removed to measure the flank wear mark. The established criterion for end of life was $v_b máx = 0,2 \text{ mm}$. In the condition recommended by the manufacturer's catalog they had the same performance, in a severe machining condition the two models suffered early chipping, however in an intermediate condition the special tool had a significant difference in its useful life in relation to the standard tool. It was concluded that a combination of factors resulted in an increase in the stability of the tool proposed at work, which proved to be effective for the process.

Keywords: Milling, Special Tool, Unequal Helix, Stainless steel 420, Service Life.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos processos de fabricação	17
Figura 2 – Processos de fresamento exemplificados em imagem	18
Figura 3 – Fresamento concordante x Fresamento discordante	19
Figura 4 – Diferença de fase entre a onda presente e a anterior.....	22
Figura 5 – Ferramenta com divisão desigual e hélice desigual	23
Figura 6 – Gráfico comparativo entre ferramenta normal e otimizada	24
Figura 7 – Resultados de modelagem computacional	25
Figura 8 – Lascamento de gume em pastilha de fresamento	26
Figura 9 – Desgaste de flanco em pastilha de fresamento.....	27
Figura 10 – Cratera em pastilha de fresamento	27
Figura 11 – Tipos de desgaste em função da velocidade de corte.....	29
Figura 12 – Formação de aresta postiça	29
Figura 13 – Ondulação de superfície no fresamento tangencial.....	31
Figura 14 – Parâmetros de Rugosidade	32
Figura 15 – Fluxograma do processo	33
Figura 16 – Fresamento tangencial (canto 90°).....	34
Figura 17 - Sequência de operações dentro de um ciclo de ensaio	35
Figura 18 – Imagem de catálogo WMTOOLS.	36
Figura 19 – Diferenças entre os modelos de ferramenta.	37
Figura 20 - Ferramenta no projetor de perfil	37
Figura 21 - Representação tridimensional do corpo de prova.	39
Figura 22 - Gravação a laser nas costas do gume.....	40
Figura 23 - Fixação ER-16.	41
Figura 24 - Formação de desgaste de flanco.	42
Figura 25 - Início / Fim da fresa STD	42
Figura 26 – Início / Fim Fresa Especial.....	43
Figura 27 - Desgaste STD x Desgaste Especial.	43
Figura 28 - Material aderido nos canais das ferramentas.	44
Figura 29 - Lascamento das ferramentas após 1,33 metros usinados.....	45
Figura 30 - Lascamento das Fresas STD a 130 m/min.....	46
Figura 31 - Evolução de desgaste da fresa Especial 1	47

Figura 32 - Fim de Vida por Entupimento de Canais.....	48
Figura 33 - Fim de vida das ferramentas Especial 2 e 3.....	49
Figura 34 - Gráfico de desgaste por volume usinado	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados de corte experimentais	34
Tabela 2 - Elementos Químicos do Inox 420	38
Tabela 3 - Rugosidade média para os dois modelos de fresa	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2d	Duas dimensões (bidimensional)
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
FIERGS	Federação das Indústrias do Estado do Rio Grande do Sul
MTG	Manual Técnico Geral da Sandvik Coromant
NBR	Norma Brasileira
PIB	Produto Interno Bruto
rpm	Rotações por minuto
TEF	<i>Tooth Engagement Factor</i>
STD	Ferramenta Standard

LISTA DE SÍMBOLOS

φ	Ângulo de contato do dente (°)
a_p	Profundidade axial de usinagem (mm)
a_e	Profundidade radial de usinagem (mm)
v_f	Velocidade de avanço (mm/min)
v_c	Velocidade de corte (m/min)
z	Número de dentes
D	Diâmetro de corte da ferramenta (mm)
n	Rotação da ferramenta (rpm)
f	Avanço (mm/volta)
f_z	Avanço por dente (mm/faca)
ΔH	Variação do ângulo da hélice
v_b	Largura da marca de desgaste no flanco (mm)
$v_{bmáx}$	Largura máxima da marca de desgaste no flanco (mm)
k_t	Profundidade da cratera (mm)
k	Faixa entre o gume e início da cratera (mm)
R_a	Rugosidade média aritmética (μm)
R_z	Rugosidade média (μm)
$R_{zmáx}$	Rugosidade máxima (μm)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	JUSTIFICATIVA	15
1.2	OBJETIVOS	15
1.2.1	Objetivo geral	15
1.2.2	Objetivos específicos.....	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	USINAGEM	16
2.1.1	Classificação dos processos de usinagem	16
2.2	PROCESSO DE FRESAMENTO	17
2.2.1	Classificação do fresamento.....	18
2.2.2	Direção do corte	19
2.2.3	Parâmetros de corte.....	20
2.3	PROBLEMA DE VIBRAÇÃO NO PROCESSO DE FRESAMENTO.....	21
2.4	DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA ESPECIAL.....	23
2.5	USINABILIDADE	25
2.5.1	Vida útil da ferramenta.....	25
2.5.1.1	Critérios para fim de vida da ferramenta	28
2.5.2	Mecanismos de desgastes nas ferramentas.....	28
2.5.2.1	Adesão	29
2.5.2.2	Abrasão	30
2.5.2.3	Difusão	30
2.5.2.3	Oxidação	30
2.5.3	Parâmetros de rugosidade	30
3	MÉTODO E MATERIAIS.....	33
3.1	PROCEDIMENTOS.....	33
3.2	FERRAMENTAS	35
3.3	EQUIPAMENTOS.....	38
3.4	MATERIAL	38
4	RESULTADOS.....	40

4.1	PRÉ-TESTE	40
4.2	CONDIÇÃO INICIAL.....	41
4.2.1	Rugosidade Atingida.....	44
4.3	CONDIÇÃO AVANÇADA	45
4.4	CONDIÇÃO INTERMEDIÁRIA	46
4.4.1	Dados Comparativos – Condição Intermediária.....	48
5	CONCLUSÃO	50
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	52
	REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

O setor metal mecânico ocupa uma parcela muito significativa dentre todas as indústrias no Rio Grande do Sul, segundo Dallacorte (2019), dados da Federação das Indústrias do Estado do Rio Grande do Sul (FIERGS) indicam que 15,5% do Produto Interno Bruto (PIB) gaúcho é oriundo deste nicho de mercado, o qual fornece produtos para abastecer as indústrias bélica, automotiva, aeroespacial, entre outras.

Dentre os tipos de processos realizados na indústria do metal, a conformação mecânica e a usinagem abrangem a maioria deles, pois de acordo com Ferraresi (1970), são as duas grandes classes de operações com o metal. A usinagem consiste em um processo de remoção de material por meio de diversos sub-processos, sendo os mais comuns o torneamento, a furação, e o fresamento, o qual será a ênfase deste trabalho. Por sua vez as operações de conformação não removem material, e sim, visam conferir à peça a forma, as dimensões, o acabamento específico, ou qualquer combinação destes três por intermédio de deformação plástica, conforme Ferraresi (1970).

Ao passar dos anos veio o crescente aumento da necessidade por ferramentas de corte. Apesar dos poucos dados disponíveis relativos a este mercado específico, o consumo de ferramentas de corte no país, em meados de 2010, atingiu a marca de R\$ 700 a R\$ 750 milhões de reais de acordo com a Borges (2011). Já, em âmbito mundial o consumo atingiu a casa dos 13 bilhões de dólares. Planejando fazer parte deste setor, no ano de 2010 surgiu a empresa WMTtools, a qual sou colaborador desde o ano de 2012 e que tem como ramo de atividade a produção de ferramentas especiais para o setor da usinagem.

De uma maneira geral, as ferramentas *standard* são produzidas em larga escala com o objetivo de atender mais de um tipo de material a usinar (aço, ferro fundido, aço inox) sem ter as características ideais para um material em específico. Por outro lado, uma ferramenta denominada especial é desenvolvida de acordo com as necessidades do produto do cliente, sejam elas necessidades dimensionais, como variações de diâmetro ao longo de um determinado comprimento, perfis, ou necessidades de desempenho. No caso deste estudo a ferramenta se enquadra como especial por possuir ângulos construtivos específicos para esta aplicação, definidos com base no tipo de material, método de usinagem, parâmetros utilizados e desempenho esperado.

Enfim, o presente trabalho tem por objetivo realizar um comparativo entre uma fresa topo reto, quatro cortes, diâmetro de seis milímetros (ferramenta *standard*) com uma ferramenta de dimensões iguais, porém com o acréscimo de hélices desiguais na construção de seus canais.

Para tanto foi considerado o desempenho superior de ferramentas com conceito acima mencionado, conforme indicado por Sandvik (2010).

1.1 JUSTIFICATIVA

Com a concorrência cada vez mais acirrada no mercado de ferramentas de usinagem, torna-se indispensável estar em constante aprimoramento de processos, custos, e principalmente do produto final, visando assim entregar para o cliente o melhor custo-benefício que ele possa ter, conciliando tempo de produção com vida útil de ferramenta.

Justifica-se este trabalho, buscando comprovar a melhora na usinagem com a ferramenta modificada, com o apoio no referencial teórico e realizando uma revisão conceitual. Apesar de alguns fabricantes relatarem maior desempenho, não existem muitos estudos reportados na literatura a respeito, o que motivou o desenvolvimento do estudo.

1.2 OBJETIVOS

Para a realização deste estudo foi definido o objetivo geral e para o alcance deste objetivo foram determinados os objetivos específicos, os quais estão descritos nos próximos itens.

1.2.1 Objetivo geral

Comparar uma ferramenta *standard* com uma ferramenta especial, aplicando um conceito de hélices desiguais entre si e comparando o desempenho no fresamento de desbaste do aço inox 420.

1.2.2 Objetivos específicos

Para a obtenção do objetivo geral, neste trabalho foram determinados os seguintes objetivos específicos:

- a) realizar os testes comparativos entre as ferramentas com apoio do referencial teórico;
- b) avaliar a qualidade superficial gerada na usinagem por meio de perfilometria;
- c) acompanhar a evolução dos mecanismos de desgastes por intermédio de microscopia óptica;
- d) estabelecer uma análise e um comparativo dos resultados obtidos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é desenvolvido o referencial teórico iniciando com a abordagem sobre o processo fabril da usinagem, indicando os seus conceitos e sua classificação. Em seguida é exposto sobre o processo fabril de fresamento apresentando a sua classificação, a direção do corte e os parâmetros de corte.

Na sequência do capítulo é mencionado o problema de vibração no processo de fresamento; bem como o desenvolvimento da ferramenta especial; e, também, a usinabilidade demonstrando a vida da ferramenta, os mecanismos de desgastes nas ferramentas e; os parâmetros de rugosidade.

2.1 USINAGEM

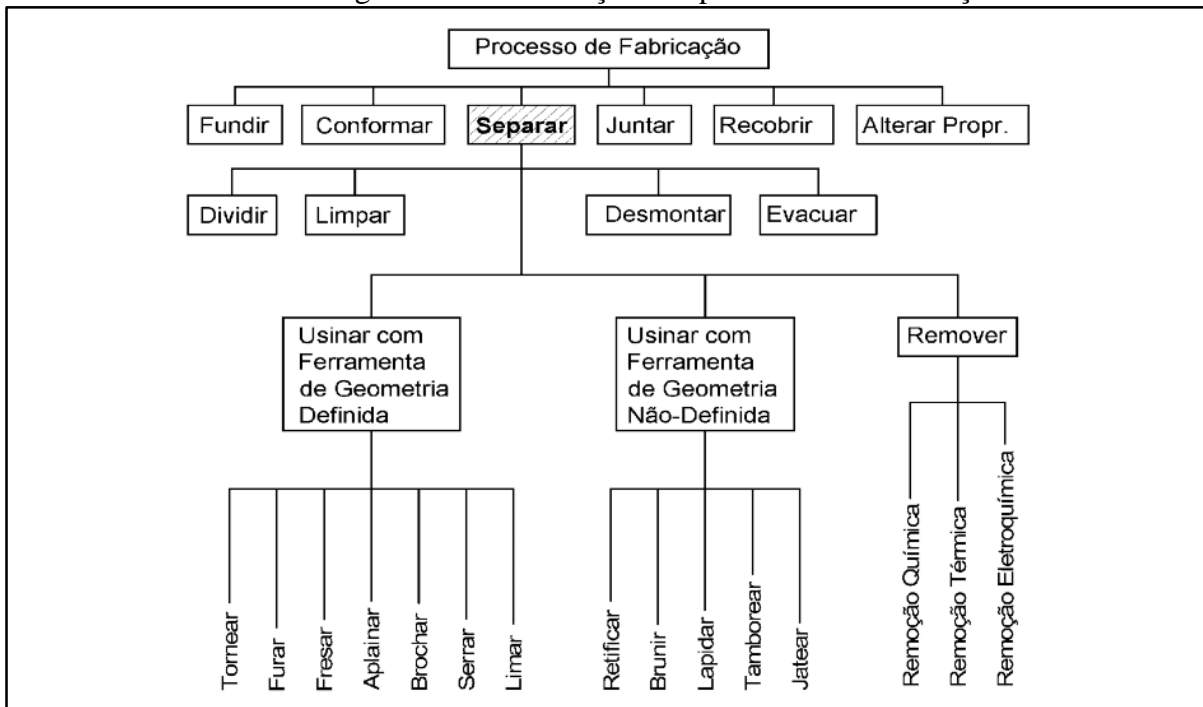
Segundo Ferraresi (1970), pode-se identificar como usinagem qualquer processo fabril que, ao conferir a uma peça determinada forma, acabamento, ou dimensão, produz cavaco. Por sua vez, o cavaco nada mais é que a porção de material da peça, removida pela ferramenta de corte, e caracterizada por apresentar forma irregular.

De acordo com o que afirmam Diniz, Marcondes e Coppini (2014), estão envolvidos com o processo de formação do cavaco os aspectos econômicos, a segurança do operador, a utilização correta da máquina-ferramenta, entre outros.

2.1.1 Classificação dos processos de usinagem

Conforme citado por Zeilmann (2018), adaptado de König (2002), é possível separar os processos de usinagem em processos com ferramenta de geometria definida, e processos com ferramenta de geometria não-definida. Na Figura 1, fica claro quais são os processos de usinagem que pertencem a cada tipo citado anteriormente.

Figura 1 – Classificação dos processos de fabricação



Fonte: Adaptado de Zeilmann (2018)

2.2 PROCESSO DE FRESAMENTO

O fresamento apresenta o seu movimento de corte proporcionado pela rotação da fresa ao redor do seu próprio eixo, esta, por sua vez, trata-se de uma ferramenta provida de arestas cortantes, tanto no sentido longitudinal, quanto axial (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

De acordo com o Manual Técnico Geral da Sandvik Coromant (MTG) (2010), o processo fabril de fresamento é considerado o método de usinagem mais flexível, pois possibilita usinar quase qualquer formato. Porém, toda essa flexibilidade ocasiona diversas variáveis a serem controladas neste processo, o que torna a sua otimização um desafio constante. A escolha da ferramenta ideal para o tipo de fresamento dependerá da relação entre a profundidade e a largura do rasgo e, também, do tipo de máquina-ferramenta disponível (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

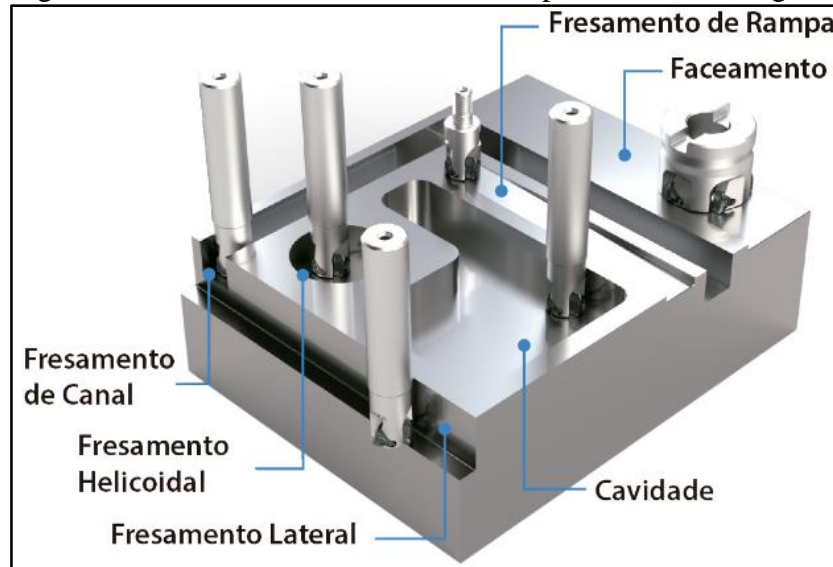
Conforme o que indica o MTG (2010), o número de métodos de fresamento expandiu juntamente com o desenvolvimento de novos *softwares* e de máquinas contemporâneas, surgindo operações como:

- a) tornofresamento;
- b) fresamento de rosca;

- c) usinagem em rampa circular;
- d) fresamento trocoidal.

Antes disso, a operação de fresamento costumava ser dividida apenas em faceamento, fresamento de cantos a 90°, canais e perfis. Na Figura 2 estão exemplificados os processos de fresamento mais comuns, com enorme aplicação na indústria de metal mecânica.

Figura 2 – Processos de fresamento exemplificados em imagem



Fonte: Kyocera Ferramentas (2020)

2.2.1 Classificação do fresamento

Conforme Diniz, Marcondes e Coppini (2014), o fresamento pode ser classificado, de forma básica, segundo a posição do eixo-árvores ou conforme a disposição de seus dentes ativos. Levando em consideração a primeira forma citada, os autores indicam que, o fresamento pode ser horizontal, vertical, ou inclinado de acordo com a posição do eixo (quando o eixo-árvores está na posição horizontal, o fresamento é horizontal). Ao considerar a disposição dos dentes ativos da fresa, o processo pode ser classificado como tangencial ou frontal da seguinte maneira:

- a) fresamento tangencial: as operações onde os dentes ativos se encontram na superfície cilíndrica da ferramenta e o eixo da fresa é paralelo à superfície usinada. As ferramentas são denominadas de fresas cilíndricas ou tangenciais;
- b) fresamento frontal: os dentes ativos se encontram na superfície frontal da ferramenta (topo) e o eixo da fresa é perpendicular à superfície usinada. As ferramentas são denominadas de fresas de topo ou fresas frontais.

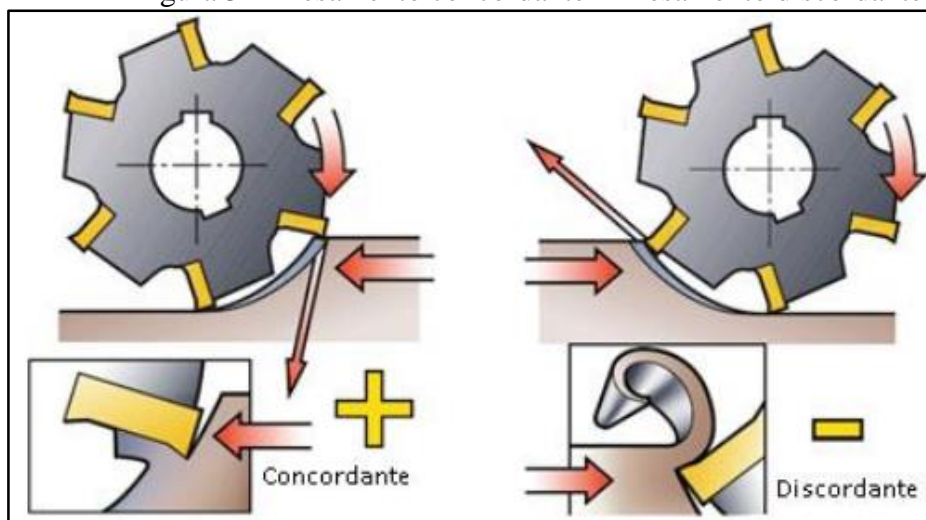
A Norma Brasileira (NBR) 6175:2015 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2015) também divide o fresamento em tangencial e frontal, porém completa informando que há casos que os dois tipos de fresamento podem aparecer juntos, podendo haver ou não predominância de um sobre outro. Menciona também que o fresamento frontal pode ser considerado um fresamento composto (ABNT, 2015).

2.2.2 Direção do corte

De acordo com a relação entre o movimento de avanço e o movimento de rotação da fresa, é definido se o fresamento é concordante ou discordante. Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2014), o fresamento discordante é aquele em que o ângulo ϕ parte de zero a um valor máximo (sentido de avanço é contrário ao movimento rotatório da fresa). Já, no fresamento concordante, o ângulo começa no seu valor máximo e decresce até zero (sentido de avanço é o mesmo sentido da rotação da fresa).

O ângulo ϕ citado anteriormente trata-se da abertura entre uma linha radial da fresa que passa pelo ponto de contato aresta-peça e uma outra linha radial que passa pelo ponto onde a espessura do cavaco formado é igual a zero (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014). Na Figura 3, é demonstrado o fresamento concordante, o discordante, e a seção de formação do cavaco.

Figura 3 – Fresamento concordante x Fresamento discordante



Fonte: Sandvik Coromant (2010)

Desse modo, quando a máquina-ferramenta, o dispositivo de fixação, e a peça possibilitam, o fresamento concordante é sempre preferível (MTG, 2010). Em contrapartida, o fresamento discordante é preferível quando ocorrem grandes variações na folga e, também, na

usinagem de ligas resistentes ao calor com pastilhas de cerâmica. Isto se deve ao fato da cerâmica ser sensível aos impactos na entrada da peça (MTG, 2010).

2.2.3 Parâmetros de corte

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2014), dentre os principais fatores que devem ser levados em consideração nas condições de usinagem do fresamento estão:

- a) profundidade de usinagem (a_p);
- b) penetração de trabalho (a_e);
- c) velocidade de avanço (v_f);
- d) velocidade de corte (v_c);
- e) número de dentes (z).

Como explicam König e Klocke (1997), a velocidade de corte (v_c) e a velocidade de avanço (v_f) são grandezas de influência direta na qualidade superficial da superfície a ser usinada. Diniz, Marcondes e Coppini (2014) complementam afirmando que, a velocidade de corte é consequente do deslocamento da ferramenta sobre a peça, mais especificamente a velocidade tangencial instantânea decorrente da rotação da ferramenta. A Equação 1, para o cálculo da velocidade de corte, é a seguinte:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (1)$$

onde: v_c é a velocidade de corte (m/min);

D é o diâmetro da ferramenta (mm);

n é a rotação da ferramenta (rpm).

Diniz, Marcondes e Coppini (2014) citam que, a velocidade de avanço é uma resultante do avanço pela rotação da ferramenta, sendo calculada pela Equação 2:

$$v_f = f \cdot n \quad (2)$$

onde: v_f é a velocidade de avanço (mm/min);

f : o avanço (mm/volta);

n é a rotação da ferramenta (rpm).

No caso do fresamento, onde se trabalha com ferramentas de mais de um gume, é utilizado o avanço por faca (f_z) ao invés do avanço por volta. O cálculo do avanço relativo ao número de dentes pode ser definido pela Equação 3:

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n \quad (3)$$

onde: f_z é o avanço por dente (mm/faca);
 z é o número de facas da ferramenta;
 n é a rotação da ferramenta (rpm).

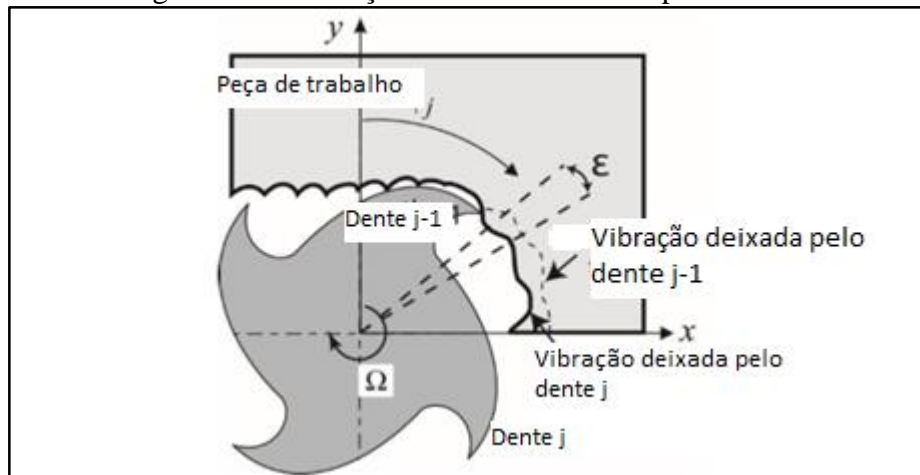
2.3 PROBLEMA DE VIBRAÇÃO NO PROCESSO DE FRESAMENTO

Por ser um processo com inúmeras variáveis, o fresamento apresenta também inúmeras possibilidades de melhorias. Conforme Otto (2017), as vibrações durante o fresamento aceleram o desgaste da ferramenta e geram um acabamento superficial precário. Dombovari (2011) afirma que os processos como o torneamento e o fresamento estão sujeitos à vibração pelo efeito regenerativo.

No entendimento de Sant'Anna, Gomes e Borille (2011), existem dois tipos de vibração atuantes no fresamento: as vibrações forçadas e as vibrações regenerativas. As vibrações forçadas são causadas pelo impacto do dente da ferramenta na peça, enquanto que, as vibrações regenerativas, segundo Altintas (2000), citado por Sant'Anna, Gomes e Borille (2011) resultam do mecanismo de auto excitação na geração da espessura do cavaco. Essa auto excitação, por sua vez, pode ser amenizada com o emprego de técnicas na construção da ferramenta.

A passagem de um gume sobre a peça resulta em uma superfície ondulada que será removida pelo gume subsequente, que também deixa uma superfície ondulada devido às vibrações estruturais. De acordo com a diferença de fase entre essas duas ondulações, a vibração pode ser amplificada ou atenuada (SANT'ANNA; GOMES; BORILLE, 2011). Na Figura 4 pode-se compreender com mais clareza o que foi explicado anteriormente.

Figura 4 – Diferença de fase entre a onda presente e a anterior.



Fonte: Adaptado de Comak e Budak (2017)

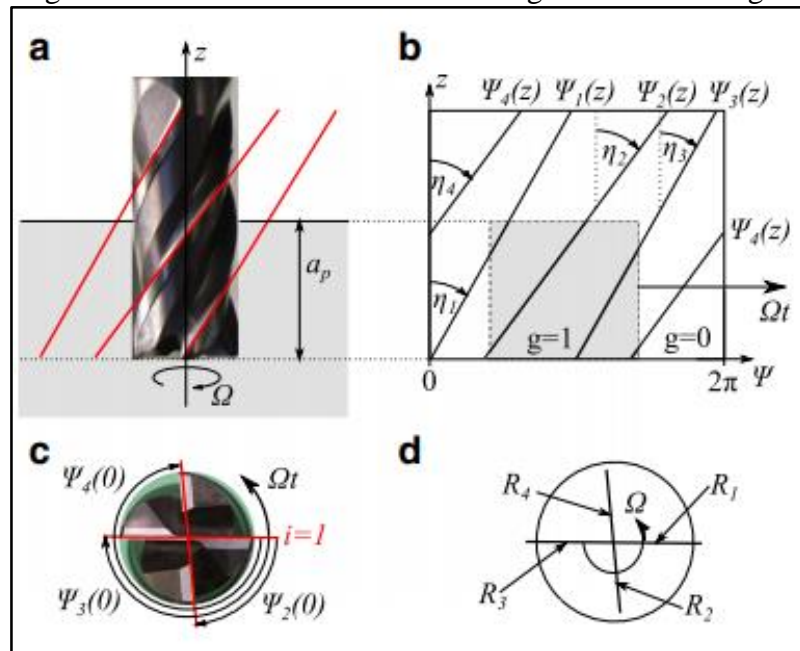
Em um estudo sobre o efeito do ângulo de hélice variável realizado por Dombovari e Stepan (2011) foi verificado que, ao utilizar esta técnica, ao invés de ocorrer um *delay* constante e específico entre uma faca de corte e outra, ocorre um intervalo de *delays* definidos por uma função de distribuição de peso da ferramenta.

Além do ângulo de hélice variável, Otto (2017) afirma que, uma possibilidade de melhoramento da profundidade estável de corte no fresamento é a utilização de fresas com divisão desigual entre os seus canais. Song e Zhao (2011) também citam que, as fresas com divisão desigual entre os seus canais devem ser utilizadas sempre que possível, de preferência com diferença de 3° a 5° .

Otto (2017), assim como Dombovari e Stepan (2011), entende que os múltiplos *delays* das ferramentas com hélices desiguais conseguem estabilizar o processo. Essas técnicas diversas evitam a auto excitação gerada pelo efeito regenerativo.

Na Figura 5, em ‘a’ tem-se a vista lateral de uma ferramenta de hélice variável, em ‘b’ uma vista $2d$ dos gumes da ferramenta e a sua disposição. Em ‘c’ uma vista de topo da ferramenta com hélice variável, e em ‘d’ o batimento devido à diferente disposição radial das facas de corte.

Figura 5 – Ferramenta com divisão desigual e hélice desigual



Fonte: Dombovari e Stepan (2011)

2.4 DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA ESPECIAL

A própria Sandvik Coromant menciona em seu manual técnico, o aumento de estabilidade no fresamento ao se utilizar ferramentas com hélices desiguais entre si. Buscando compreender este fenômeno, Song e Zhao (2011) investigaram a relação geométrica estática entre a ferramenta de corte e a peça no processo, a qual foi denominada pelos autores de fator de engajamento do dente (*Tooth Engagement Factor* (TEF))¹. De acordo com Song e Zhao (2011), o ângulo de intersecção entre os dois dentes subsequentes, no caso de hélices variáveis, depende da profundidade de corte.

Song e Zhao (2011) afirmam ainda que, quanto maior for o valor do TEF, maior será a estabilidade do processo. Por meio dos cálculos realizados, os autores identificaram que, o TEF pode ser incrementado das seguintes maneiras:

- a) aumentando a profundidade de corte;
- b) elevando o número de facas da ferramenta;
- c) aumentando o ângulo da hélice;
- d) aplicando o conceito de hélice desigual.

As fresas com maior ângulo de hélice e maior número de facas devem ser escolhidas quando a ordem é obter uma grande estabilidade no fresamento (SONG; ZHAO, 2011). As

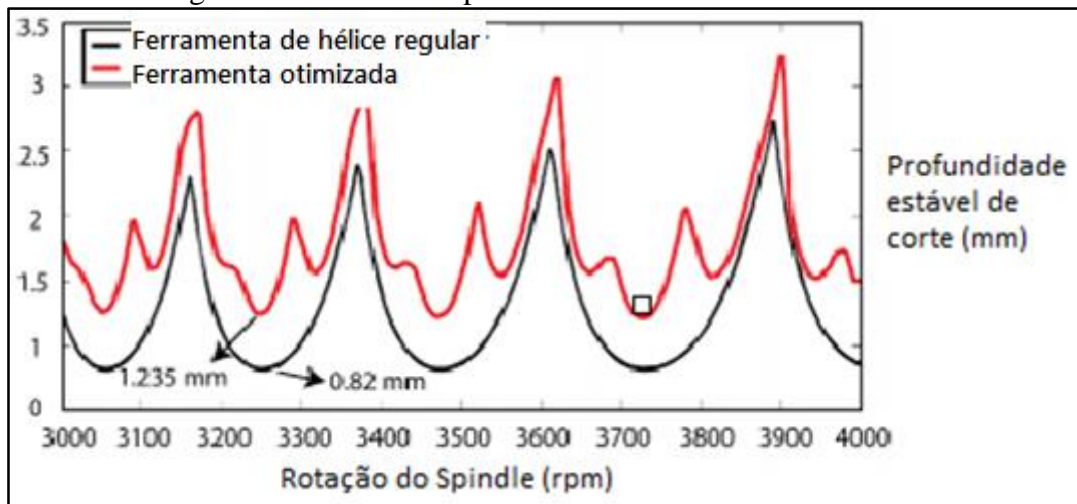
¹ *Tooth Engagement Factor* traduzido para o português como fator de engajamento do dente.

ferramentas com hélice desigual aumentam a estabilidade do processo de forma mais significativa em rotações de *spindle* (fusos) menores, devido à sua massa desbalanceada, não podem ser utilizadas em rotações maiores que 14000 rpm (SONG; ZHAO, 2011).

Ao encontro das afirmações anteriores, Comak e Budak (2017) traçaram comparativos entre uma ferramenta com hélice regular e outra com otimização por meio de hélices desiguais, indicado uma maior diferença em rotações próximas a 3000 rpm do que em rotações de 4000 rpm.

Na Figura 6, pode-se notar que, a curva da ferramenta otimizada atinge picos maiores de profundidade de corte estável, aumentando em 50% este valor na rotação de 3250 rpm.

Figura 6 – Gráfico comparativo entre ferramenta normal e otimizada

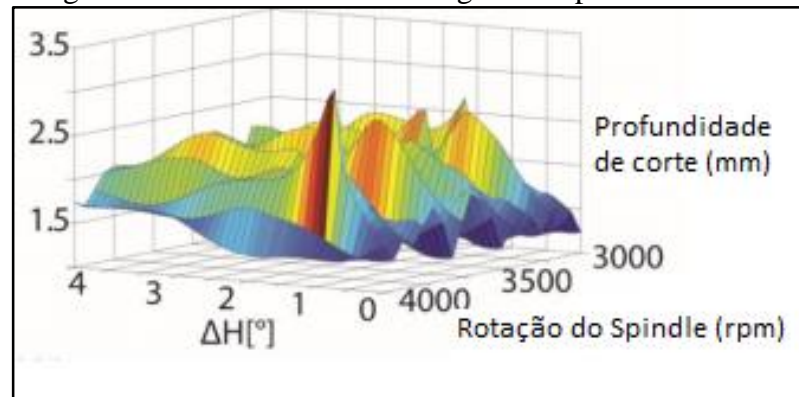


Fonte: Adaptado de Comak e Budak (2017)

Por sua vez, Comak e Budak (2017) modelaram a dinâmica do fresamento com a hélice desigual sem a utilização do fator de engajamento do dente, e sim por meio de uma equação de balanceamento da massa, rigidez, e amortecimento da ferramenta em relação às variações de rotação do *spindle* e das vibrações do sistema.

Por intermédio do uso de modelagem computacional, os autores realizaram uma simulação variando a velocidade do *spindle* de 3000 a 4000 rpm, variando o ângulo de hélice (ΔH) entre uma faca e outra de 0° a 10° . Na Figura 7 são demonstrados os resultados obtidos no estudo de Comak e Budak (2017).

Figura 7 – Resultados de modelagem computacional



Fonte: Adaptado de Comak e Budak (2017)

Como verificado na Figura 7, a profundidade de corte estável foi maximizada em 3900 rpm e com uma variação de ângulo de hélice de 1° entre uma faca e outra (COMAK; BUDAK, 2017).

2.5 USINABILIDADE

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2014), os critérios mais comuns na análise da usinabilidade compreendem: a vida útil da ferramenta; o acabamento superficial; a formação do cavaco; e as forças de usinagem. Ferraresi (1970) define o conceito de usinabilidade como uma grandeza tecnológica, que expressa por meio de um valor numérico comparativo (índice ou porcentagem) um conjunto de propriedades de usinagem do metal, em relação a outro tomado como padrão.

Ferraresi (1970) complementa afirmando que, essas propriedades de usinagem do metal expressam o seu efeito sobre as grandezas mensuráveis inerentes ao processo de usinagem dos metais, tais como: a vida útil da ferramenta; a força de usinagem; o acabamento superficial; a temperatura de corte; a produtividade; e a forma do cavaco, indo ao encontro ao que indicaram Diniz, Marcondes e Coppini (2014).

2.5.1 Vida útil da ferramenta

Ferraresi (1970) define a vida útil da ferramenta como o tempo que a mesma trabalha de forma efetiva até perder sua capacidade de corte, dentro de um critério pré-estabelecido. Diniz, Marcondes e Coppini (2014) caracterizam o desgaste da ferramenta como uma perda

contínua de material na ferramenta devido à ação do corte. Stemmer (2005) complementa indicando que, a falha de uma ferramenta de corte pode ocorrer por meio de três formas:

- a) lascamento: ocorre devido às solicitações mecânicas ou térmicas do gume, a Figura 8 exemplifica um lascamento de aresta; e as suas principais causas são:
- ângulo de cunha ou de quina muito pequenos;
 - mau acabamento do gume;
 - ferramenta muito dura e pouco tenaz para a solicitação;
 - cortes interrompidos ou impactos;
 - inclusões duras no material da peça;
 - dimensões excessivas do cavaco;
 - vibrações de qualquer origem;
 - resfriamento brusco de pastilhas quentes, na afiação ou usinagem.

Figura 8 – Lascamento de gume em pastilha de fresamento



Fonte: Sandvik Coromant (2010)

- b) desgaste no flanco: forma uma marca de desgaste, que por sua vez é uma faixa desgastada no flanco da ferramenta, sendo que a sua largura é o que determina o grau de desgaste (STEMMER, 2005). Na Figura 9 é possível ter um melhor entendimento do desgaste no flanco.

Figura 9 – Desgaste de flanco em pastilha de fresamento



Fonte: Sandvik Coromant (2010)

- c) desgaste na face: forma uma cratera, isto é, uma concavidade na superfície de saída da ferramenta devido ao atrito da mesma com o cavaco (STEMMER, 2005). A Figura 10 apresenta a cratera que é formada na face da ferramenta.

Figura 10 – Cratera em pastilha de fresamento



Fonte: Sandvik Coromant (2010)

Dentre os desgastes nas ferramentas citados por Stemmer (2005), segundo Sandvik Coromant (2010), o desgaste de flanco é o mais preferível, pois oferece vida útil da ferramenta previsível e estável ao longo do processo de usinagem.

2.5.1.1 Critérios para fim de vida da ferramenta

Stemmer (2005) cita alguns critérios utilizados na prática e nos ensaios de laboratório para determinar o ponto representativo de fim de vida da ferramenta. Estes critérios são:

- a) falha completa da ferramenta: inabilita o uso, ocorrendo por queima, lascamento ou quebra;
- b) falha preliminar da ferramenta: acusada pelo aparecimento de superfície usinada altamente polida e faíscamento intenso, cujo critério é muito utilizado no emprego de ferramentas de aço rápido;
- c) largura da marca de desgaste no flanco (v_b): é o critério mais utilizado na indústria, pois ao alcançar uma largura de desgaste na ordem de 0,8 a 2 mm as ferramentas de metal duro perdem a eficiência de corte;
- d) vibrações intensas da peça ou ferramenta: são os ruídos fortes por vibrações da máquina;
- e) profundidade da cratera (k_t) ou da faixa (k): com a profundidade da cratera ou estreitamento da faixa k , a integridade do gume fica ameaçada;
- f) deficiência do acabamento superficial;
- g) formação de rebarbas na usinagem;
- h) variação brusca na forma dos cavacos;
- i) alteração no dimensional da peça;
- j) aumento da força de corte, torque, ou potência;
- k) aumento da força de avanço;
- l) aumento da temperatura do gume.

Os últimos três critérios, em particular, são mais utilizados em laboratórios com o emprego de equipamentos como por exemplo o dinamômetro.

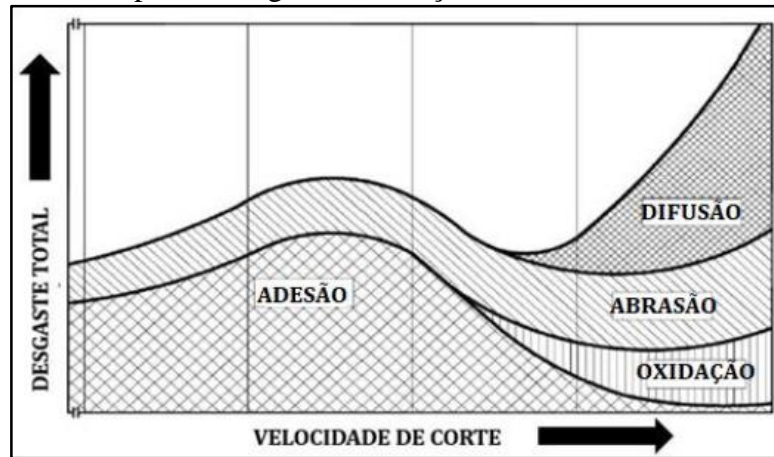
2.5.2 Mecanismos de desgastes nas ferramentas

Conforme esclarecem Diniz, Marcondes e Coppini (2014), os principais fenômenos causadores de desgastes nas ferramentas são:

- a) gume postiço de corte;
- b) abrasão mecânica;
- c) difusão;
- d) oxidação.

A velocidade de corte afeta diretamente todos esses tipos de desgastes, conforme pode-se observar na Figura 11.

Figura 11 – Tipos de desgaste em função da velocidade de corte

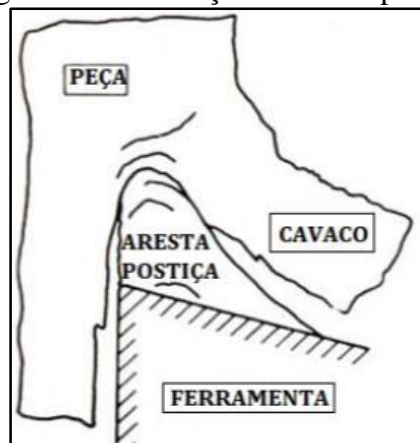


Fonte: Flámia (2019)

2.5.2.1 Adesão

Segundo Stemmer (2005), a adesão se deve à ação das altas temperaturas e pressões presentes na zona de corte, juntamente com o fato de que a superfície interior do cavaco apresenta-se limpa e quimicamente muito ativa. As partículas do material se mantêm em contato com a ferramenta por tempo suficiente para se soldarem, sofrerem encruamento e gerar uma nova aresta de corte anexa ao gume (STEMMER, 2005). Na Figura 12 o fenômeno pode ser observado.

Figura 12 – Formação de aresta postiça



Fonte: Flámia (2019)

2.5.2.2 Abrasão

A abrasão ocorre devido ao atrito entre a face da ferramenta e a peça, e é considerada a forma de desgaste mais comum entre as ferramentas (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014). Esta forma de desgaste tem relação direta com o número de inclusões e de partículas duras no aço, como por exemplo, os carbonetos e os óxidos (STEMMER, 2005).

2.5.2.3 Difusão

O processo de difusão é um fenômeno microscópico ativado pela temperatura na zona de corte. A difusão se apresenta como um processo característico de altas velocidades, responsável pelos desgastes da cratera. A difusão do estado sólido consiste na transferência de átomos de um metal a outro, sendo dependente da temperatura; da duração do contato; e da afinidade física química dos dois metais envolvidos (SÁ, 2010).

Stemmer (2005) complementa afirmando que, nas ferramentas de aço carbono e de aço rápido, este mecanismo de desgaste não apresenta relevância, visto que antes de acontecer a difusão primeiramente ocorre o amolecimento da ferramenta. Já, no caso do metal duro, poderá ocorrer na faixa entre 700° C a 1300° C (STEMMER, 2005).

2.5.2.3 Oxidação

Como explicam Diniz, Marcondes e Coppini (2014), o somatório das altas temperaturas dos cavacos com o ar ambiente, e a presença de água nos fluídos refrigerantes causam a oxidação na maioria dos metais.

Stemmer (2005) complementa afirmando que as experiências demonstram que, na usinagem com metal duro em altas velocidades, o desgaste é menor em uma atmosfera neutra do que na presença de ar.

2.5.3 Parâmetros de rugosidade

Diniz, Marcondes e Coppini (2014) afirmam que, o fresamento tangencial produz uma superfície ondulada, conforme pode-se verificar na Figura 13. A rugosidade máxima teórica é calculada a partir do diâmetro da fresa e do avanço por dente, conforme Equação 4 apresentada na sequência:

$$R_{max\text{teor}} = \frac{f_z^2}{4D} \quad (4)$$

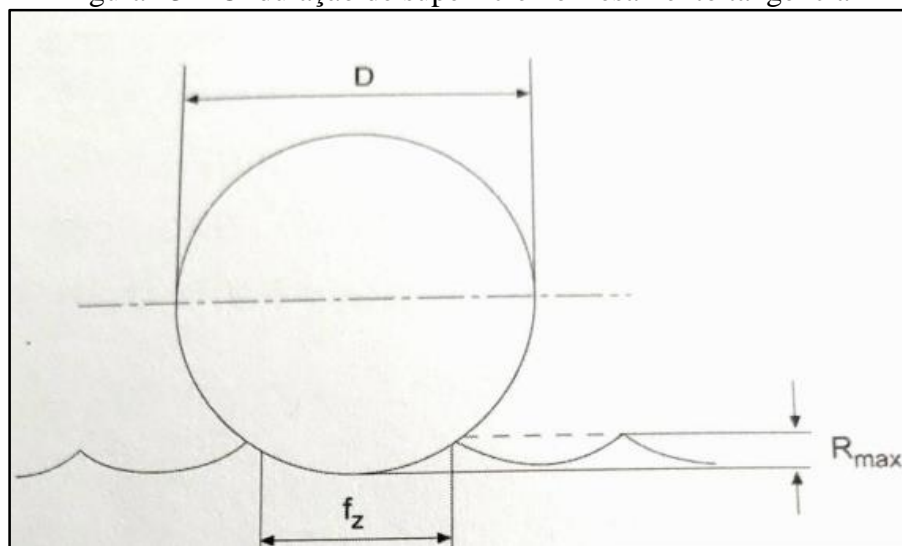
onde: $R_{max\text{teor}}$ é a rugosidade máxima teórica da superfície usinada;

f_z é o avanço por faca da ferramenta de corte;

D é o diâmetro de corte da ferramenta.

A Figura 13 demonstra a ondulação de superfície no fresamento tangencial conforme indicado por Diniz, Marcondes e Coppini (2014).

Figura 13 – Ondulação de superfície no fresamento tangencial

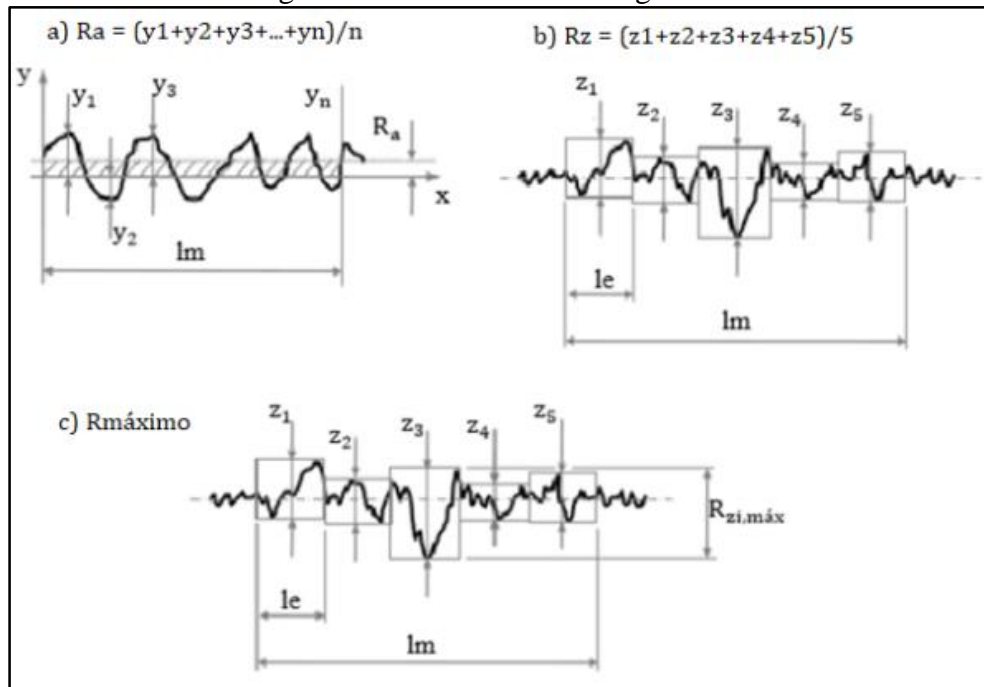


Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini (2014)

A rugosidade média aritmética entre os valores medidos pelo aparelho, em relação a uma linha média dentro do comprimento medido é denominada de R_a . Já, a rugosidade média aritmética dos valores absolutos dos pontos de maior distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo, dentro de um comprimento definido, é conhecida como R_z .

Por sua vez, a rugosidade $R_{z\text{máximo}}$ compreende um valor único, que representa a distância vertical entre o maior pico e o vale mais profundo dentro do comprimento analisado. (SÁ, 2010). Na Figura 14 estão exemplificados os parâmetros de rugosidade citados anteriormente.

Figura 14 – Parâmetros de Rugosidade

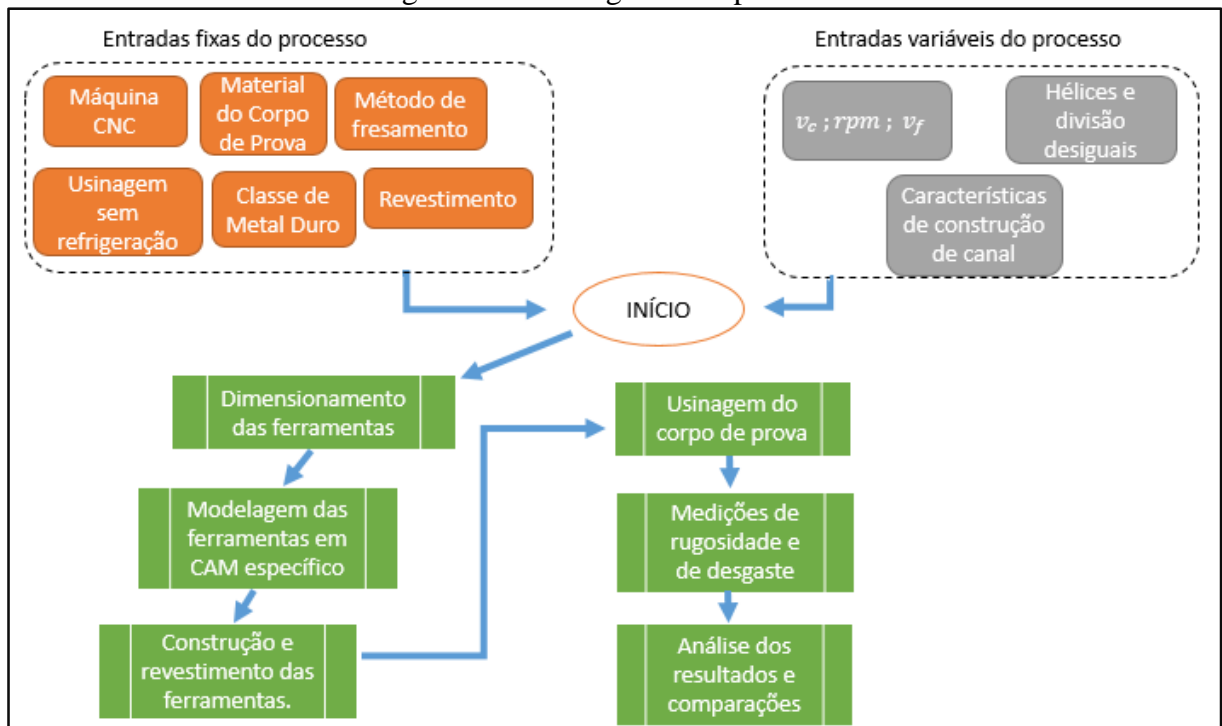


Fonte: Schwaizer (2018)

3 MÉTODO E MATERIAIS

Neste capítulo foi traçado todo o planejamento dos testes e das análises realizados ao longo do trabalho, incluindo o material do corpo de prova, o projeto das ferramentas, e as variações do processo. Para um melhor entendimento, foi elaborado um fluxograma com as entradas, as etapas, e as saídas do processo, como apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Fluxograma do processo



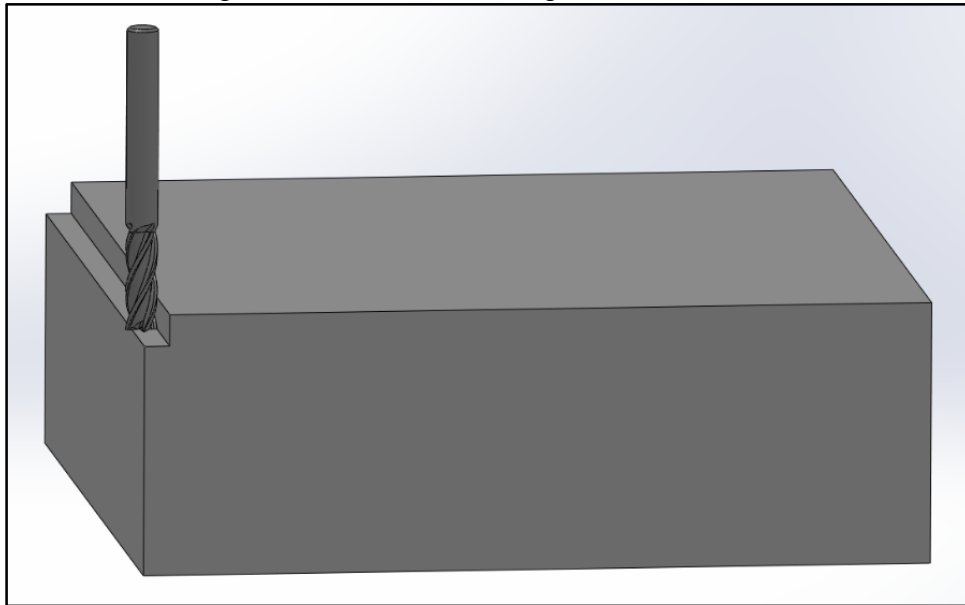
Fonte: O autor (2020)

3.1 PROCEDIMENTOS

O método de fresamento escolhido para este estudo foi o fresamento de canto a 90° , que, de acordo com a NBR 6175:2015, pode ser classificado como fresamento composto devido à atuação simultânea dos dentes frontais da fresa e os dentes laterais (ABNT, 2015).

O movimento utilizado foi o fresamento concordante, e os dois modelos de fresas realizaram as usinagens passantes ao longo do corpo de prova, utilizando dados de corte otimizados. A Figura 16 ilustra como foi a atuação da ferramenta durante os ensaios.

Figura 16 – Fresamento tangencial (canto 90°)



Fonte: O autor (2020)

Os dados de corte a serem utilizados foram extraídos com o auxílio de uma ferramenta do site da Sandvik Coromant, o “*Coroplus ToolGuide*”, que consiste na simulação da aplicação desejada, de forma minuciosa, e sugestão de dados por parte da plataforma do site.

Tabela 1 – Dados de corte experimentais

Parâmetro	Dados
a_e	1 mm
a_p	6 mm
f_z	0,05 mm/faca
v_c	150 m/min
RPM	7957

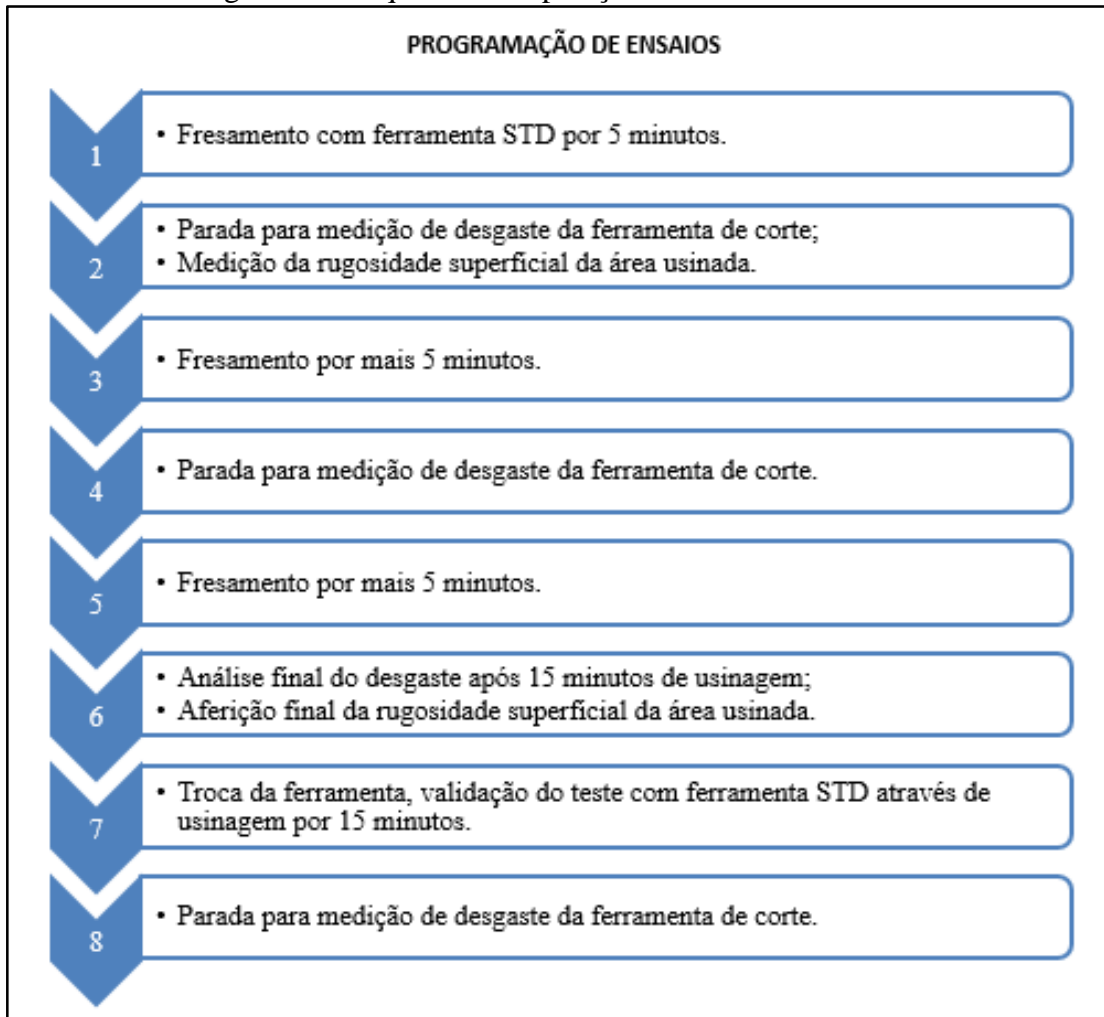
Fonte: O autor (2020)

O planejamento consistia em realizar pausas a cada ciclo de 5 minutos de usinagem pela superfície do corpo de prova, retirando a ferramenta para a análise dos mecanismos de desgaste através de microscopia óptica. A rugosidade superficial foi aferida após a primeira passagem de cada tipo de ferramenta e após a última passagem da fresa antes da sua retirada da máquina.

A fim de manter o fresamento concordante, ao transpassar o corpo de prova a ferramenta afasta no sentido axial e retorna ao ponto inicial em avanço rápido antes de

incrementar lateralmente para uma nova usinagem. O fim de vida da ferramenta, por sua vez, consolida-se quando o $v_{bmáx}$ atinge valores maiores ou iguais a 0,2 mm. A Figura 17 mostra de forma sequencial os subprocessos realizados com cada ferramenta testada.

Figura 17 - Sequência de operações dentro de um ciclo de ensaio



Fonte: O autor (2020)

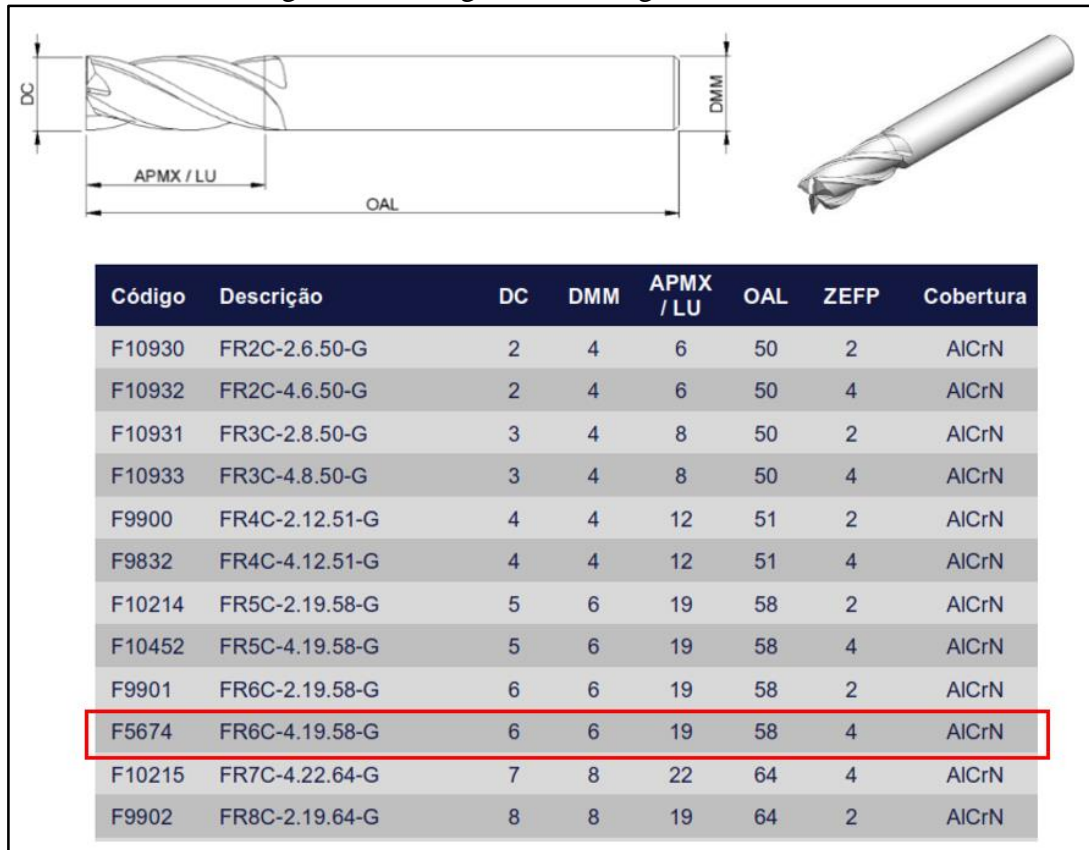
Após o fim deste processo de oito etapas, é realizada a troca da ferramenta, montando então a fresa especial para que o processo se repita. Com a fresa especial será realizada a réplica e a tréplica do ensaio.

3.2 FERRAMENTAS

Para a realização dos ensaios, foram utilizados dois modelos de ferramentas a fim de serem comparados entre si. O primeiro modelo compreende uma ferramenta *standard* pertencente ao catálogo da empresa WMTools, indicada pelo fornecedor para uso geral. Na

Figura 18 pode-se observar uma representação bidimensional da ferramenta com as suas respectivas dimensões.

Figura 18 – Imagem de catálogo WMTOOLS.

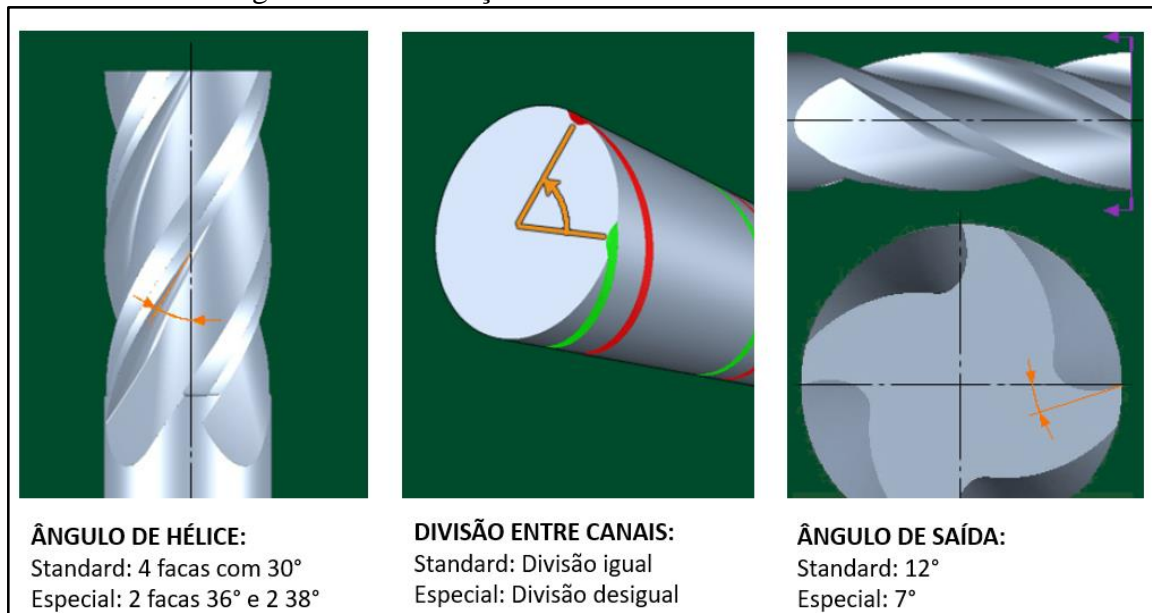


Fonte: Adaptado de WMTOOLS (2020)

O segundo modelo de ferramenta foi desenvolvido dentro dos mesmos moldes de fabricação, ou seja, com diâmetro de corte de 6 mm; comprimento útil de 19 mm; comprimento total de 58 mm; haste diâmetro 6 mm; e quatro facas de corte. Porém, deve-se ressaltar que o modelo *standard* possui divisão igual de canais, e hélices iguais entre si com valor de 30°.

Já, o modelo especial possui divisão desigual entre os seus canais, hélices desiguais (duas com 36° e duas com 38°), e ângulo de saída de cavacos 5° menor visando o reforço da aresta de corte. A Figura 18 ilustra de maneira mais didática quais serão os fatores modificados para a fresa especial.

Figura 19 – Diferenças entre os modelos de ferramenta.



Fonte: O autor (2020)

Os dois modelos possuem tratamento de aresta realizado na máquina OTEC, que consiste em um arraste da ferramenta de corte em uma mídia de grãos abrasivos chamada HSC 1/300. Segundo o fabricante da máquina após 10 minutos de arraste o gume sofre arredondamento de 10 μm a 20 μm , o qual pode ser identificado através do brilho existente na Figura 20. O revestimento aplicado é o mesmo nos dois modelos, trata-se da cobertura AlCrN, que, por sua vez, é composta de alumínio, cromo e níquel. A classe de metal duro de ambas é a K40UF.

Figura 20 - Ferramenta no projetor de perfil



Fonte: O autor (2021)

3.3 EQUIPAMENTOS

A máquina utilizada para a realização dos ensaios consiste em um centro de usinagem modelo LG 500 – Hartford, a qual se encontra no Laboratório de Novas Tecnologias de Produção da Universidade de Caxias do Sul, sendo que os principais dados e as características da máquina são:

- a) potência de 10 kW;
- b) rotação máxima de 10.000 RPM;
- c) 3 eixos de atuação.

A medição de rugosidade foi realizada com auxílio de um rugosímetro SJ-301, que possui uma ponteira diamante com raio igual a 5 μm .

3.4 MATERIAL

O material utilizado nos ensaios de fresamento para este estudo compreende um bloco de aço inoxidável AISI² 420, fornecido no estado de recozido com dureza de 220 HB, equivalente a 18 HRC. Essa liga metálica pertence a um grupo de aços inoxidáveis martensíticos, que são amplamente utilizados na fabricação de materiais simples de cutelaria como exemplos, tesouras, armas e facas (MEGALIGAS, 2020). Na Tabela 2 estão representados os principais elementos químicos que compõem o material.

Tabela 2 - Elementos Químicos do Inox 420

Elemento	Carbono (C)	Manganês (Mn)	Fósforo (P)	Enxofre (S)	Silício (S)	Cromo (Cr)	Níquel (Ni)
Teor máximo (%)		1,00	0,040	0,030	1,00	14,00	0,75
Teor mínimo (%)	0,15					12,00	

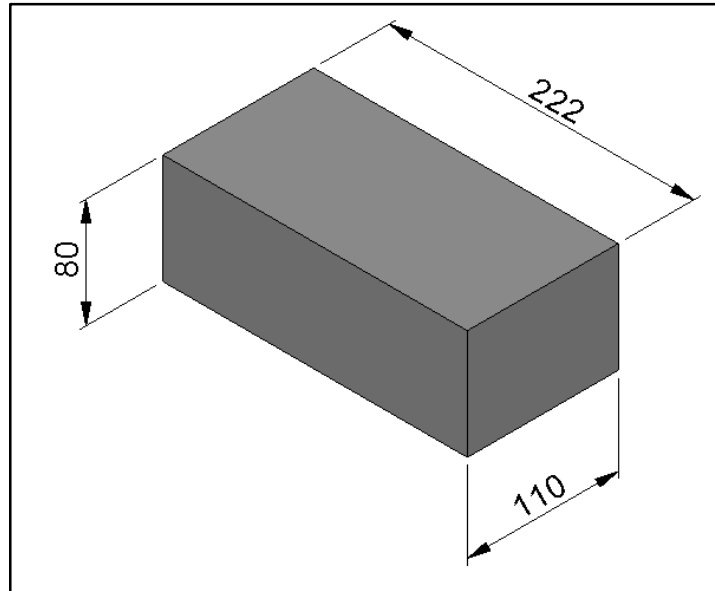
Fonte: O autor (2021)

Além de produtos de cutelaria, as ligas metálicas como AISI 420 também são empregadas para a fabricação de instrumentos cirúrgicos, moldes plásticos, peças de turbinas a

² AISI: American Iron and Steel Institute

gás e a vapor, bombas, e peças de válvulas e eixos. (MEGALIGAS, 2020). A Figura 20 representa o corpo de prova e suas respectivas dimensões.

Figura 21 - Representação tridimensional do corpo de prova.

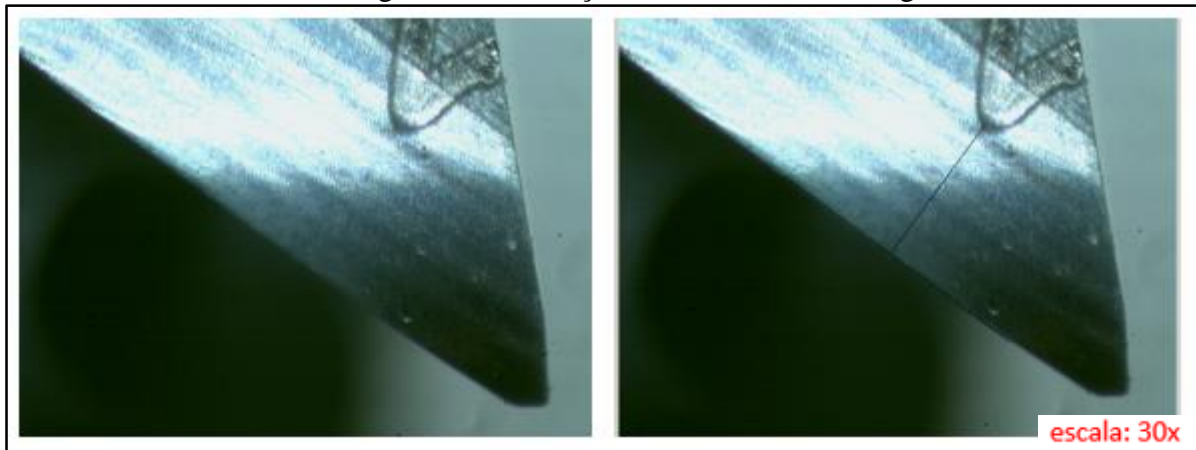


Fonte: O autor (2021)

4 RESULTADOS

No presente capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de fresamento. Antes do ensaio as ferramentas passaram por um processo de gravação a laser identificando um de seus gumes, conforme mostra a Figura 21.

Figura 22 - Gravação a laser nas costas do gume.



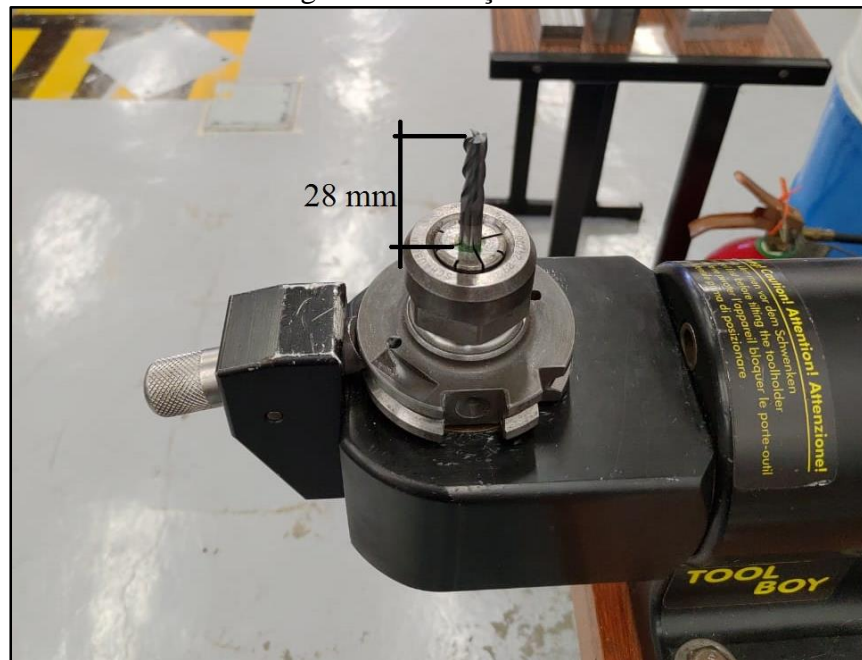
Fonte: O autor (2021)

Dessa maneira se tornou possível acompanhar a evolução do desgaste sempre na mesma face, e também acompanhar o recuo do gume caso este viesse a acontecer.

4.1 PRÉ-TESTE

Com o intuito de direcionar de forma mais assertiva os ensaios, foi proposta a realização de um pré-teste com a ferramenta STD. Os dados utilizados, conforme já citados anteriormente, foram $A_e = 1 \text{ mm}$, $A_p = 6 \text{ mm}$, $v_c = 150 \text{ m/min}$, $f_z = 0,05 \text{ mm/faca}$, $v_f = 1591,5 \text{ mm/min}$ e $7957,75 \text{ rpm}$. A ferramenta foi fixada com um sistema de fixação mecânico utilizando pinça ER-16, mantendo o mesmo comprimento em balanço para todas as ferramentas, de 28 mm. A Figura 22 ilustra o sistema de fixação mencionado.

Figura 23 - Fixação ER-16.



Fonte: O autor (2021)

Foi realizada a aferição do batimento da ferramenta antes da usinagem com o auxílio de um relógio comparador, constatando-se uma diferença de 0,03 mm entre os picos. Após um minuto de contato com a peça a ferramenta foi retirada para análise e foi constatado o lascamento de todos os gumes, mostrando a severidade da condição proposta.

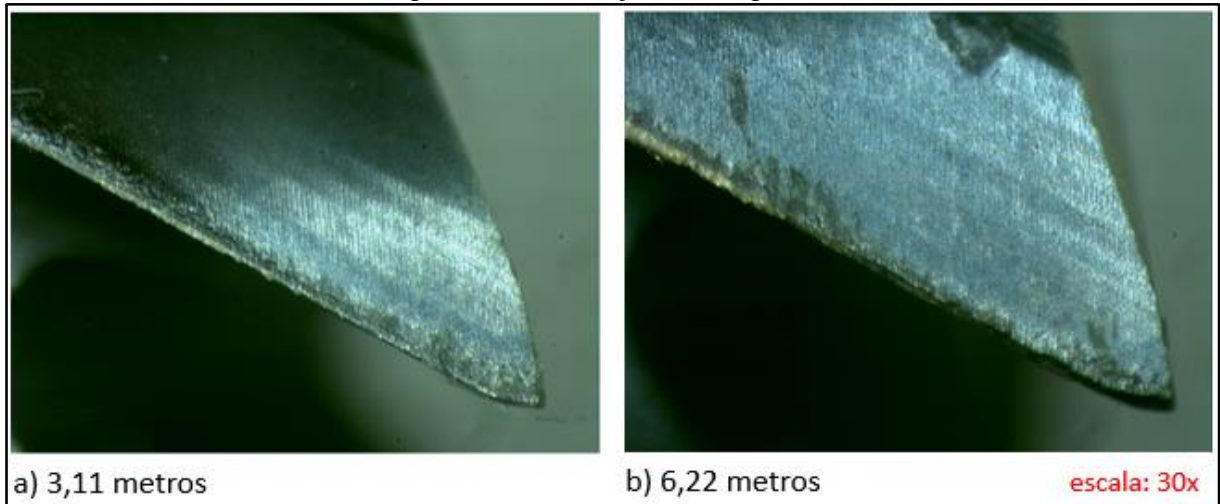
A fim de preservar as ferramentas em busca de resultados conclusivos, após o pré-teste os dados foram reduzidos para $v_c = 100 \text{ m/min}$, $f_z = 0,035 \text{ mm/faca}$, $v_f = 742,7 \text{ mm/min}$ e 5305 rpm . Vale ressaltar que a profundidade axial e lateral de usinagem foram mantidas ao longo de todo o ensaio.

Após o resultado do pré-teste, o planejamento feito anteriormente de manter a ferramenta em contato com a peça por 5 minutos foi abolido, e as decisões passaram a ser tomadas de acordo com o comportamento das ferramentas em cada uma das condições de usinagem citadas a seguir.

4.2 CONDIÇÃO INICIAL

Na velocidade de corte de 100 m/min os testes se iniciaram com a ferramenta de catálogo, usinando 3,11 metros lineares entre cada pausa para medição e acompanhamento de desgaste. A Figura 23 representa a formação do desgaste na fresa já nos primeiros ciclos de teste.

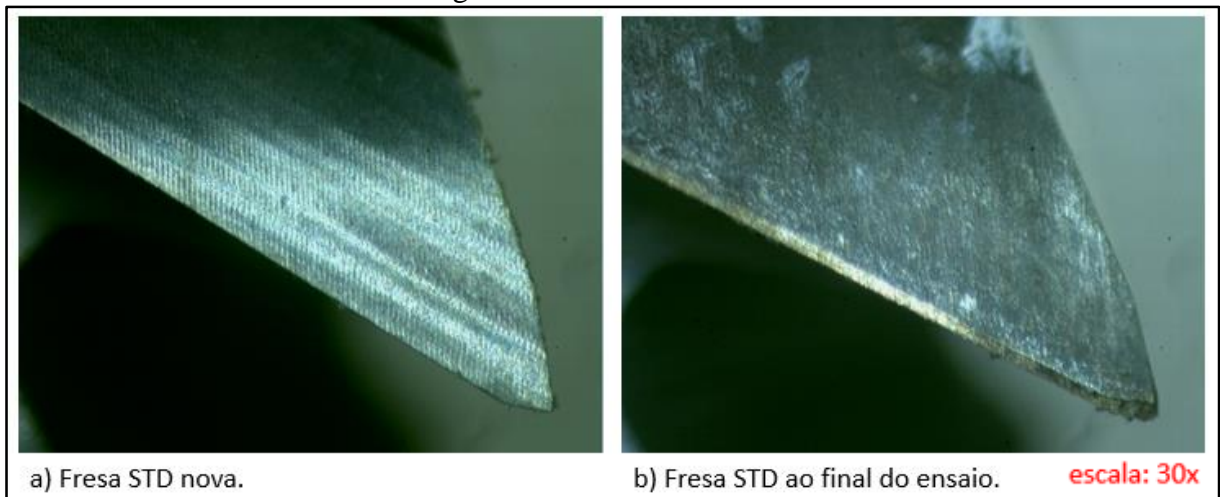
Figura 24 - Formação de desgaste de flanco.



Fonte: O autor (2021)

É possível perceber um desgaste por abrasão no flanco, e algumas irregularidades no gume já após 6,22 metros usinados, dando indícios de que a fresa resistiria a um curto período de tempo até atingir seu fim de vida. No entanto, ao final do ajuste do gume o desgaste estabilizou e não apresentou maiores variações ao longo da usinagem. Na figura 24 pode-se observar em “a” o antes e em “b” o depois da fresa STD.

Figura 25 - Início / Fim da fresa STD

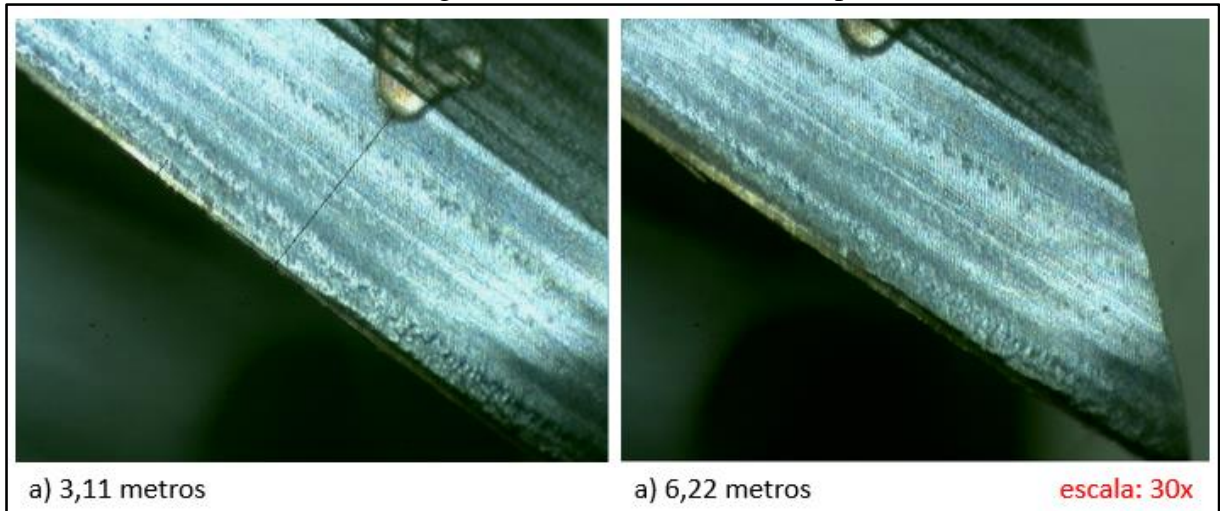


Fonte: O autor (2021)

Ao totalizar 19,98 metros lineares removidos a ferramenta foi desmontada para que o comportamento da fresa especial pudesse ser observado nestas mesmas condições. A ferramenta foi fixada com o mesmo sistema anterior, e verificado o batimento radial entre os

gumes , o qual ficou 0,01 mm entre os picos. Abaixo, na Figura 25, estão dispostas as imagens da fresa especial após 3,11 e 6,22 metros lineares usinados.

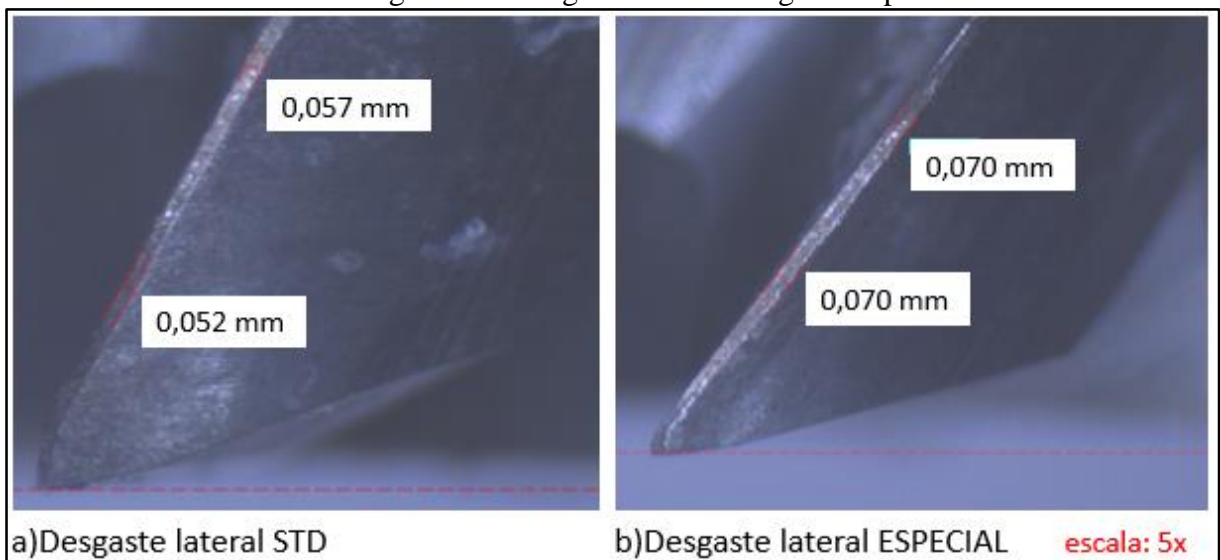
Figura 26 – Início / Fim Fresa Especial.



Fonte: O autor (2021)

O comportamento durante a usinagem se mostrou repetitivo para a ferramenta especial em relação a ferramenta STD nestas condições de usinagem, sofrendo alguns pequenos micro lascamentos no gume até ajustar o corte ao material usinado. Ao atingir o mesmo volume removido pela ferramenta standard o experimento foi interrompido. A Figura 26, que projeta a lateral das ferramentas com o topo virado para baixo, mostra em “a” o desgaste de flanco da fresa STD e em “b” o desgaste de flanco da fresa especial.

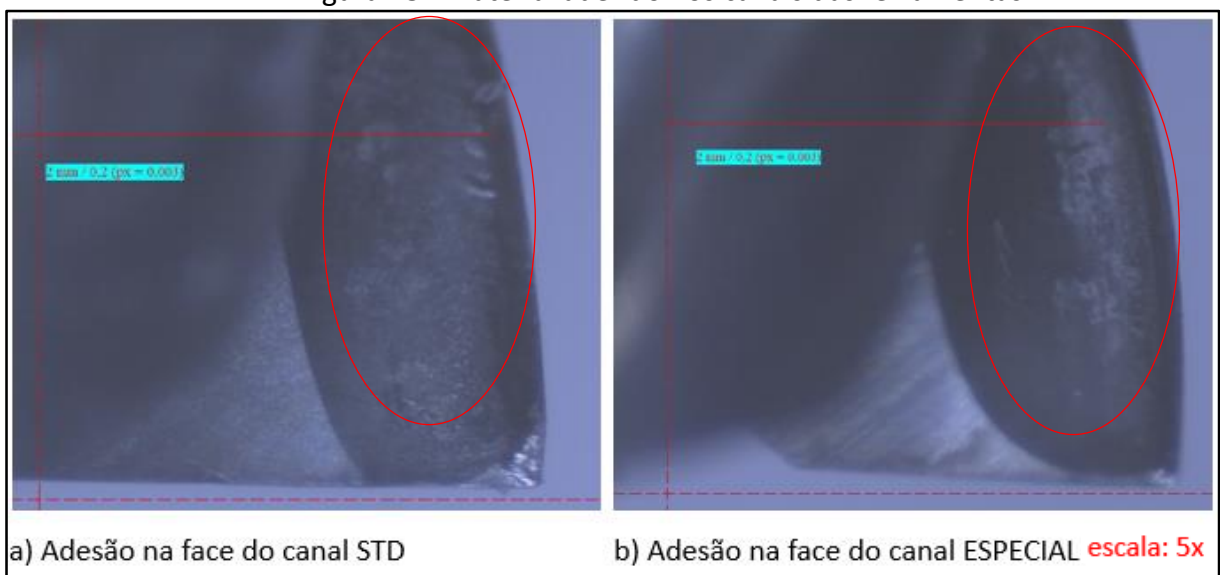
Figura 27 - Desgaste STD x Desgaste Especial.



Fonte: O autor (2021)

Conforme pode-se notar na figura acima, ao fim dos ensaios com $v_c = 100 \text{ m/min}$ a ferramenta STD apresentou desgaste de flanco na lateral de aproximadamente $0,055 \text{ mm}$, enquanto a ferramenta especial apresentou desgaste de $0,070 \text{ mm}$ removendo o mesmo volume de material. Na Figura 27, onde são projetadas as superfícies de saída de cavaco das ferramentas, é possível observar a adesão de material nos canais das duas ferramentas, mostrando que o aço inox 420 apesar de ser do tipo martensítico possui alta ductilidade e forma um cavaco pastoso de difícil expulsão.

Figura 28 - Material aderido nos canais das ferramentas.



Fonte: O autor (2021)

Não foi constatado recuo de gume em nenhuma das duas ferramentas. Após notar que não haveria tempo hábil para levar as ferramentas ao fim de vida nestas condições de usinagem, foi adotada uma mudança de estratégia para o prosseguimento dos ensaios.

4.2.1 Rugosidade Atingida

Para fins comparativos, foi aferida a rugosidade superficial em ambos os modelos de fresa, após a primeira e última passada pelo corpo de prova. Em cada ponto a medição foi feita três vezes, a fim de apresentar um valor médio de Rugosidade média (Ra). A Tabela 3 mostra de forma clara os valores obtidos.

Tabela 3 - Rugosidade média para os dois modelos de fresa

Tipo de Fresa	Ra início (μm)	Ra fim (μm)
Standard	0,75	0,56
Especial	1,00	0,55

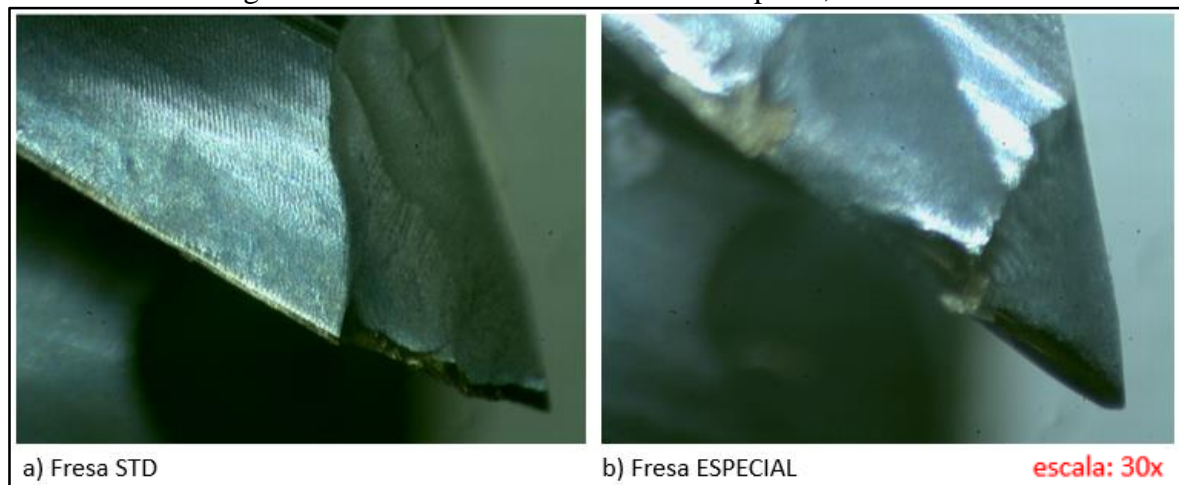
Fonte: O autor (2021)

Como podemos perceber, o acabamento da superfície ficou melhor após a formação do desgaste de flanco nas ferramentas. Isso mostrou que para estas condições de usinagem (material e parâmetros de corte) um tratamento de aresta mais agressivo na ferramenta seria interessante, ou até mesmo uma margem cilíndrica de 0,05 mm ajudaria a garantir um melhor acabamento superficial desde o início.

4.3 CONDIÇÃO AVANÇADA

Como o pré-teste foi realizado apenas com a ferramenta STD, optou-se por repetir os dados agressivos de 150 m/min com a ferramenta especial. Os resultados podemos observar na Figura 28 abaixo.

Figura 29 - Lascamento das ferramentas após 1,33 metros usinados.



Fonte: O autor (2021)

Nenhum dos dois modelos resistiu às condições agressivas de usinagem. Após 1,33 metros lineares usinados o lascamento da aresta de corte ocorreu antes mesmo da redução de ruído que caracteriza o ajuste do gume do corte.

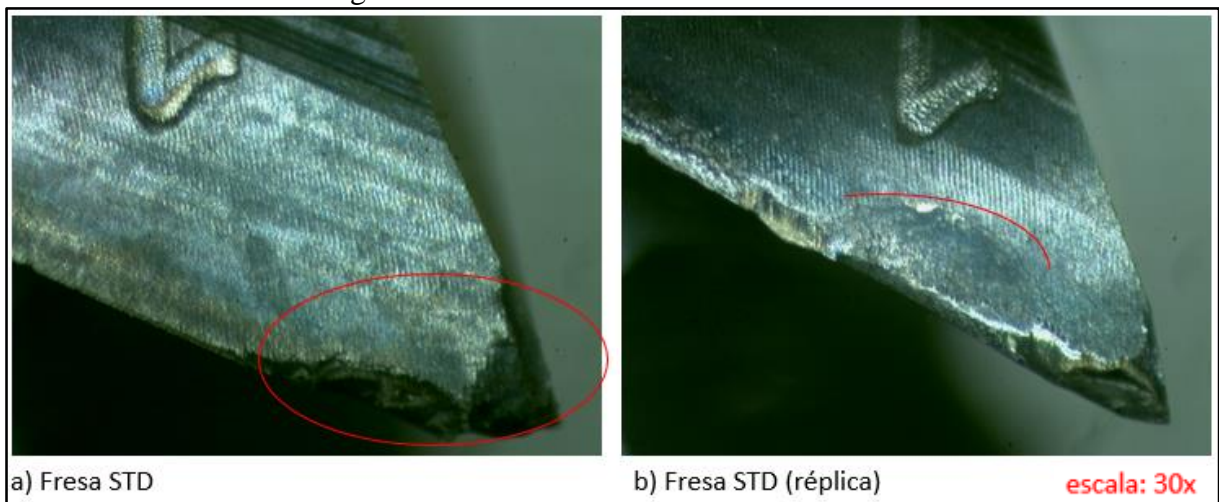
4.4 CONDIÇÃO INTERMEDIÁRIA

A fim de encontrar uma condição em que houvessem diferenças expressivas entre os dois modelos de ferramenta, os parâmetros foram novamente modificados para valores intermediários em relação aos utilizados anteriormente. A profundidade axial e lateral de usinagem foram mantidas em 6 mm e 1 mm, respectivamente, os outros dados foram: $v_c = 130 \text{ m/min}$, $f_z = 0,04 \text{ mm/faca}$, 6896,7 RPM, e $v_f = 1103,5 \text{ m/min}$.

Uma terceira ferramenta STD foi montada, tendo o batimento entre os seus gumes aferido e constatado em 0,03 mm. Foram removidos, assim como nas outras, 1,33 metros lineares equivalentes a 6 passadas pelo corpo de prova e então a ferramenta foi retirada para análise. Em mais esta condição constatou-se o lascamento precoce do gume da ferramenta, caracterizando seu fim de vida.

Para eliminar a hipótese de que este lascamento poderia ter ocorrido por acaso, uma quarta ferramenta igual a terceira foi montada e o processo foi repetido, gerando exatamente o mesmo resultado e levando mais uma ferramenta ao seu final de vida. Na Figura 29 pode-se observar o resultado das duas ferramentas STD após 1,33 metros usinados na condição denominada intermediária. A primeira fresa teve lascamento na quina do gume, enquanto a segunda lascou na quina e também no flanco.

Figura 30 - Lascamento das Fresas STD a 130 m/min

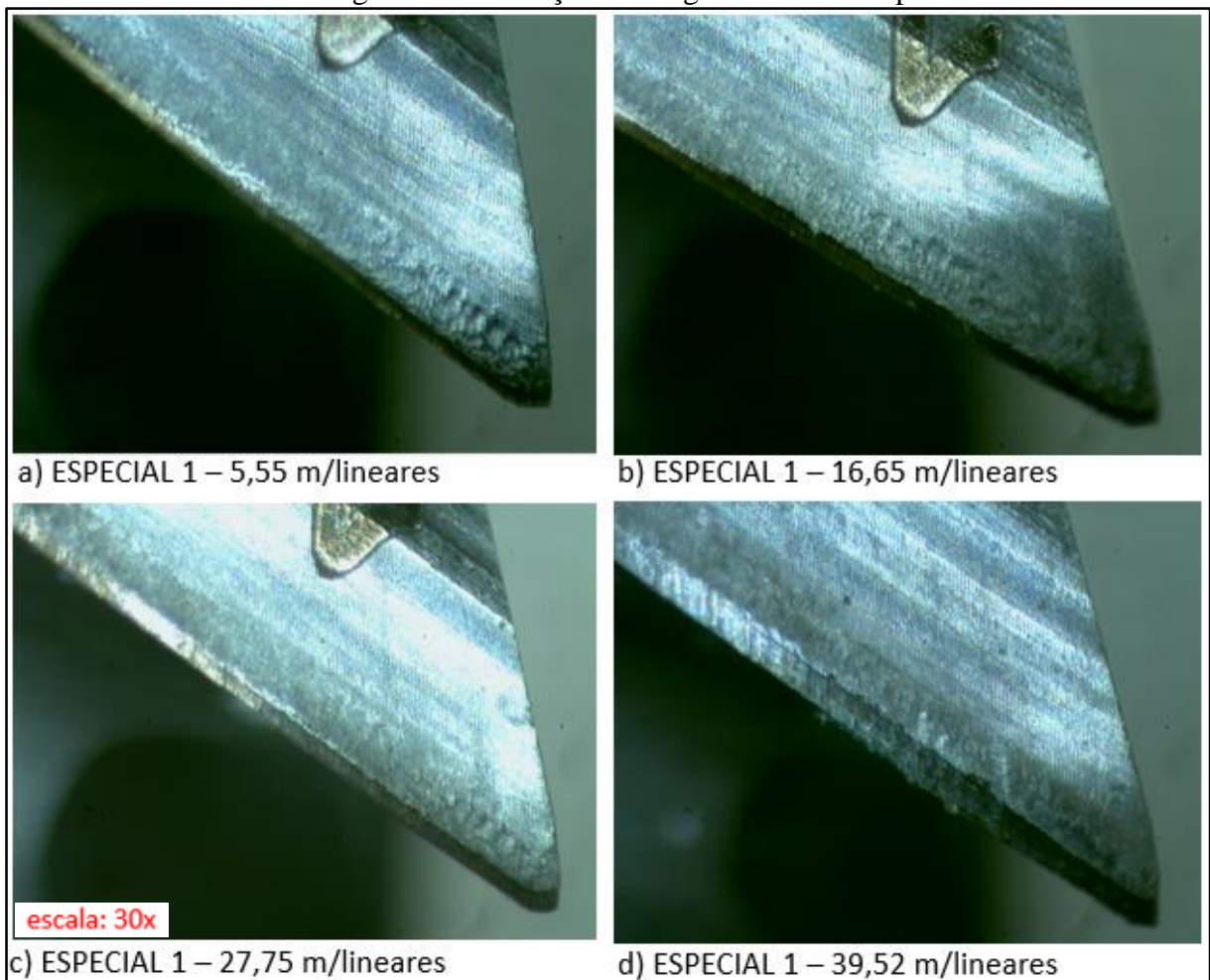


Fonte: O autor (2021)

Partindo desta situação, restaram as ferramentas especiais para aplicar na velocidade de 130 m/min. A primeira delas, denominada ESPECIAL 1, foi então fixada nas mesmas condições utilizadas até então e seu batimento máximo aferido entre as quatro facas foi de 0,01 mm.

Após os 1,33 metros usinados que caracterizaram o fim de vida das ferramentas STD, o ensaio foi pausado e a ferramenta removida para análise apenas visual, como não foi constatado lascamento de nenhum gume foi dado continuidade a usinagem com paradas a cada 5,55 metros lineares usinados. A Figura 30 representa, em sequência, a evolução de desgaste da ferramenta especial.

Figura 31 - Evolução de desgaste da fresa Especial 1



Fonte: O autor (2021)

O fim de vida havia sido estipulado ao atingir desgaste de flanco igual a 0,2 mm, no entanto ao atingir a marca de 0,15 mm a ferramenta foi perdendo a capacidade de expulsar o cavaco, ficando com a coloração avermelhada durante a usinagem. Ao chegar nestas condições

uma possível afinidade entre o inox e o revestimento, combinada com o empacotamento dos cavacos aquecidos, resultou em uma adesão do material nos canais impossibilitando o prosseguimento da usinagem. A Figura 31 demonstra o que foi mencionado nas últimas linhas.

Figura 32 - Fim de Vida por Entupimento de Canais



Fonte: O autor (2021)

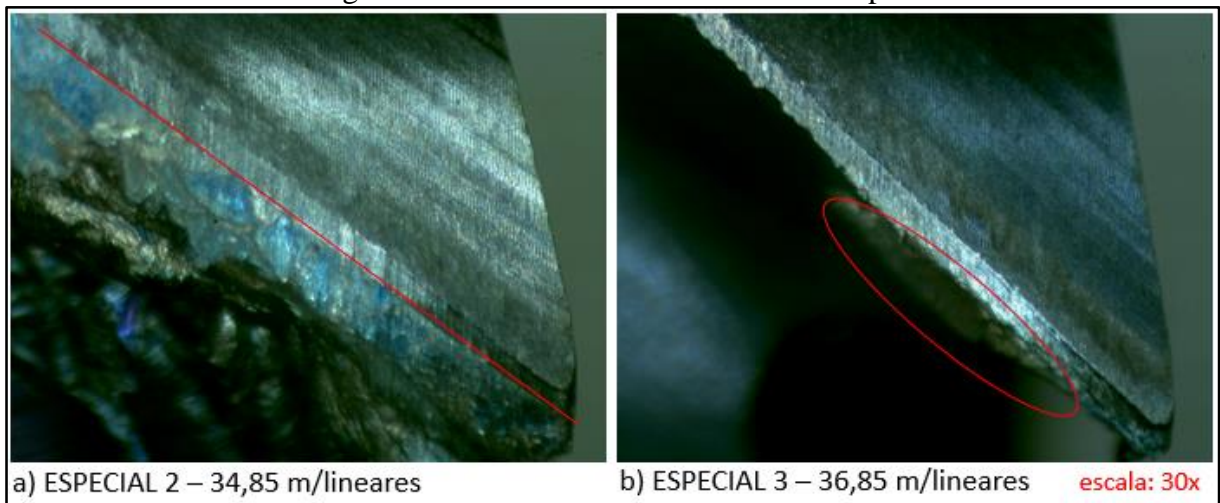
4.4.1 Dados Comparativos – Condição Intermediária

Para consolidar o processo realizado, foi feita a réplica do teste com a ferramenta denominada Especial 2, idêntica a ferramenta Especial 1. Após a réplica, para aproveitar o material ainda disponível do corpo de prova, realizou-se um terceiro ensaio com a fresa denominada Especial 3.

A fresa Especial 3 possui características construtivas idênticas as duas anteriores, porém seu revestimento é diferente, enquanto as duas primeiras possuem cobertura AlCrN (alumínio, cromo, e níquel) ela possui cobertura TiAlN (titânio, alumínio, e níquel). A empresa fornecedora do serviço de revestimentos, afirma que a cobertura TiAlN é aplicada para uso geral, enquanto a cobertura AlCrN é indicada para fresamento a altas velocidades de rotação.

Os ensaios seguiram o mesmo fluxo de paradas já realizados anteriormente, as ferramentas tiveram seu desgaste de flanco medido a cada 5,55 metros lineares pelo material, até sofrerem adesão e entupimento de canais, conforme aconteceu com o modelo Especial 1. Na Figura 32, em “a” é possível analisar a ferramenta Especial 2, na qual não sobrou nenhuma faca sem material aderido e a linha vermelha foi utilizada como fronteira entre o antigo gume e o gume posição formado. Em “b” observa-se o único gume da fresa Especial 3 que não ficou completamente preenchido pelo cavaco empacotado e aderido.

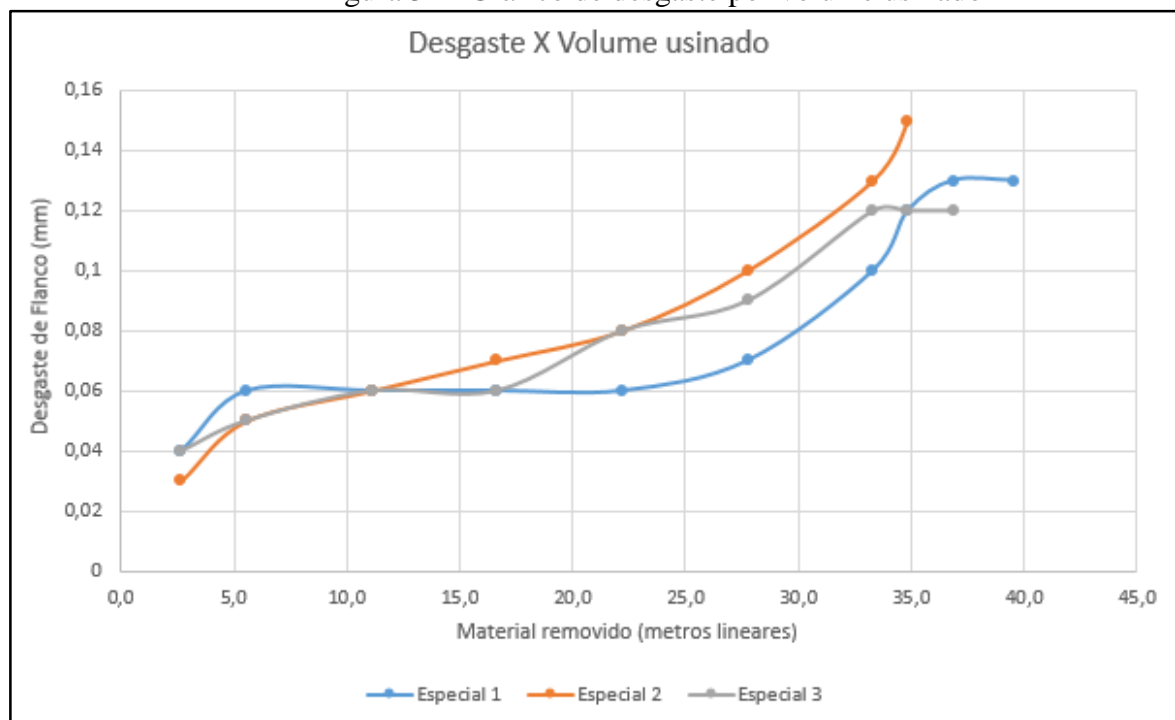
Figura 33 - Fim de vida das ferramentas Especial 2 e 3



Fonte: O autor (2021)

Neste caso, a diferença no revestimento não alterou de forma representativa o resultado final. Na Figura 33 é demonstrado um gráfico que possui curvas individuais para cada modelo de fresa especial testado, sendo que o eixo vertical representa a evolução do desgaste de flanco enquanto o eixo horizontal representa a vida das ferramentas em metros lineares usinados. A fresa Especial 1 percorreu 39,5 metros antes do fim de vida, a Especial 2 34,9 metros, e a Especial 3 36,9 metros.

Figura 34 - Gráfico de desgaste por volume usinado



Fonte: O autor (2021)

5 CONCLUSÃO

Primeiramente, deve-se afirmar que, de maneira geral não houve recuo de gume em nenhuma das situações testadas. Nos casos em que a usinagem prosseguiu sem lascamento, foi possível observar a incidência de desgaste por abrasão nos primeiros 2,66 metros lineares de material removido. Após a formação de um desgaste de flanco inicial de 0,04 mm o gume estabilizou, mantendo assim uma evolução esperada do v_b provocada por abrasão combinada a deformação plástica na aresta de corte.

A condição inicial de usinagem, que compreende a velocidade de corte de 100 m/min, coincide com os dados recomendados no catálogo do fabricante da fresa STD. Justamente nesta faixa de avanço não houveram diferenças significativas entre os dois modelos de ferramentas, mostrando que os dados recomendados funcionam bem para o processo, todavia não fornecem diferenças expressivas, as quais eram esperadas neste trabalho.

Apesar disso foi possível observar, de forma qualitativa, que a ferramenta especial teve uma maior adesão de material usinado na sua face de corte do que a fresa STD. Isso se justifica pela diferença existente entre o ângulo de saída dos cavacos das duas ferramentas, pois a especial possui 7° enquanto a STD possui 12°. Para o inox 420 (18 HRC), que possui menor dureza em comparação a materiais como o P20 (31 HRC) ou H13 (45 HRC), o ângulo de saída mais positivo mostrou-se mais eficiente na remoção do cavaco nos parâmetros comumente utilizados.

Este fato foi ao encontro do que diz o Manual Técnico Geral da Sandvik Coromant MTG (2010), o qual recomenda ângulo de saída positivo entre 9° e 12° para desbaste geral de materiais com dureza inferior a 28 HRC.

Na condição mais avançada de usinagem ($v_c = 150 \text{ m/min}$), infelizmente nenhum dos dois modelos conseguiu ultrapassar os primeiros 1,33 metros lineares usinados no pré-teste. Conforme o estudo realizado por Song e Zhao (2011), ferramentas com hélice desigual não devem ser utilizadas em rotações muito altas devido a sua massa desbalanceada. Comak e Budak (2017) em sua pesquisa, também precisaram aplicar diversas rotações de spindle até encontrar pontos de estabilidade para a ferramenta com hélices desiguais, mostrando que este tipo de aplicação não segue uma função linear onde estabilidade e rpm do fuso variam de forma direta e proporcional.

Por fim na condição intermediária, caracterizada pela velocidade de corte de 130 m/min, não foi possível estabelecer de forma quantitativa o quão melhor a ferramenta especial foi em

relação a ferramenta STD. No entanto, através da réplica do ensaio ficou comprovado que as diferenças aplicadas na geometria surtiram efeito no desempenho da fresa especial.

Conforme esperado, a combinação de hélices desiguais e divisão desigual resultaram em um acréscimo na estabilidade da usinagem, o que possibilitou que a ferramenta superasse os primeiros 1,33 metros lineares de material removido e formasse o desgaste de flanco esperado em uma aplicação deste tipo. Vale ressaltar também que o ângulo de hélice maior (STD - 30° , especial 36° e 38°) aumenta o fator de engajamento do dente (TEF), conforme afirmaram Song e Zhao (2011).

É importante ressaltar o possível efeito do batimento radial nos resultados do estudo. Segundo guia de aplicação da Sandvik Coromant, para cada dez micrometro em acréscimo do batimento radial, ocorre uma redução de 50% da vida da ferramenta. Todas as ferramentas modelo STD testadas, tiveram seu batimento verificado e constatado entre 0,02 mm e 0,03 mm. As ferramentas especiais por sua vez tiveram valores de batimento radial constatados entre 0 e 0,01 mm através do uso de relógio comparador centesimal.

Partindo desta premissa, uma vida muito menor das ferramentas STD em relação as especiais seria justificada pelo batimento radial. Porém na condição inicial ($v_c = 100 \text{ m/min}$) onde os dois modelos trabalharam de forma similar esse fator não se demonstrou impactante para ensaios relativamente mais curtos como o deste estudo. A lição que fica é que o batimento radial deve ser sempre evitado, tanto na construção das ferramentas quanto na aplicação das mesmas.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Foi possível concluir através deste estudo que, para cada processo metal-mecânico da indústria existe uma gama de variáveis a serem trabalhadas, possibilitando também inúmeras melhorias a serem feitas. Cabe a nós o aprofundamento e desenvolvimento para a obtenção das melhores condições para o processo. Deixo como sugestão os seguintes tópicos para pesquisas que possam complementar este trabalho:

- a) Repetir o ensaio de fresamento na condição intermediária ($v_c = 130 \text{ m/min}$), porém utilizando refrigeração no processo e analisar os resultados obtidos;
- b) Realizar um tratamento de aresta mais agressivo na ferramenta de corte, a fim de observar mudanças tanto na qualidade superficial quanto na vida útil da mesma;
- c) Comparar a ferramenta especial deste trabalho com outra de dimensões iguais porém com perfil de desbaste na sua aresta de corte lateral;
- d) Desenvolver uma ferramenta especial específica para fresamento de material endurecido.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6175:2015 - Usinagem – Processos Mecânicos**. Rio de Janeiro: ABNT, 07/2015. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=337411>. Acesso em: 14 set. 2020.
- BORGES, Antonio. Qual o tamanho do mercado brasileiro? **Revista Usinagem Tech**. n. 6, nov./dez./2011. Disponível em: <https://pt.calameo.com/read/000632255f80ce5acfc29>. Acesso em 15 set. 2020.
- COMAK, Alptunc; BUDAK, Erhan. *Modeling dynamics and stability of variable pitch and helix milling tools for development of a design method to maximize chatter stability*. **Precision Engineering**, v. 47, p. 459-468, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141635916302549>. Acesso em: 14 set. 2020.
- DALLACORTE, Fabiano. **Tendências do setor metalmeccânico para as pequenas indústrias 2019/2020**. Publicado em: 13 maio 2019. Disponível em: <https://sebraers.com.br/metalmeccanico/tendencias-do-setor-metalmeccanico-para-as-pequenas-industrias/>. Acesso em: 14 set. 2020.
- DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo: Artliber, 2014.
- DOMBOVARI, Zoltan; STEPAN, Gabor. *The effect of harmonic helix angle variation on milling stability*. In: **Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE 2011)**, Washington, DC, USA, ago. 28-31, 2011.
- DUSTRE. **Ligas especiais, 416**, 2020. Disponível em: <https://dustre.com.br/produtos-ligas-especiais/416-2/>. Acesso em: 21 de nov. 2020.
- FERRARESI, Dino. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Afiliada, 1970.
- FLAMIA, Júlio. **Comparação entre ferramentas de metal duro de classes diferentes para fresamento de aço AISI H13**. 2019. 66 f. Trabalho de Conclusão (Engenharia Mecânica). Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ucs.br/xmlui/handle/11338/5753;jsessionid=B8EFE6B8E85F6844A3969AA901BDFAE8> Acesso em: 03 out. 2020.
- KÖNIG, Wilfried; KLOCKE, Fritz. **Fertigungsverfahren: drehen, bohren, fräsen**. Aachen, Alemanha: Springer Verlag, 1997.
- KYOCERA BRASIL. **MEV: fresamento de alto desempenho**, 2020. Página inicial. Disponível em: <https://www.kyocera-componentes.com.br/pages/mev.php>. Acesso em: 03 out. 2020.
- OTTO, Andreas. *Stability of milling with non-uniform pitch and variable helix tools*. **Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 89: p. 2613-2625, 2017.
- SÁ, Vinícius Maia de. **Avaliação do desgaste da ferramenta de metal duro revestida com tin no fresamento do aço ABNT4140 temperado e revenido, utilizando duas fresas de**

diâmetros diferentes. 2010. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica).- Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010. Disponível em: http://www.biblioteca.pucminas.br/teses/EngMecanica_SaVM_1.pdf. Acesso em: 03 out. 2020.

SANT'ANNA, Diego Rodrigues; GOMES, Jefferson de Oliveira; BORILLE, Anderson Vicente. **Análise de vibrações em processos de usinagem**. In: XVIII CRREm, 21-24 2011. Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas. Disponível em: <https://abcm.org.br/anais/creem/2011/tfp/02.pdf>. Acesso em: 17 out. 2020.

SANDVIK COROMANT. **Fresamento concordante vs fresamento discordante**, 2010. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/pages/up-milling-vs-down-milling.aspx>. Acesso em 03 out. 2020.

_____. **Desgaste das arestas de corte**, 2010. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/pages/wear-on-cutting-edges.aspx>. Acesso em: 24 out. 2020.

_____. **Manual técnico geral, torneamento – fresamento – furação – mandrilamento – sistemas de fixação**. Suécia: Elanders, 2010.

SCHWAIZER, Pedro Henrique. **Análise da qualidade superficial no fresamento em raio com ferramenta de ponta esférica**. 2018. 87 f. Trabalho de Conclusão (Engenharia Mecânica) . Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2018. <https://repositorio.uces.br/xmlui/bitstream/handle/11338/4321/TCC%20Pedro%20Henrique%20Schwaizer.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Disponível em: Acesso em: 17 out. 2020.

SONG, Oinghua; ZHAO, Jun. *Design for variable pitch end mills with high milling stability*. *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 55, p. 891-903, 2011.

STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de corte I**, 6 ed. Florianópolis: Daufsc, 2005.

MEGALIGAS. **Aço Inox 420**. 2020. Dados Gerais. Disponível em: http://www.megaligas.com.br/produtos_aco_inox_420.asp. Acesso em: 17 mar. 2021.

SANDVIK, **Ferramentas e Métodos – Fabricação de Moldes e Matrizes**. Suécia: 2002. 258p.