



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE
MINAS GERAIS**



Dissertação de Mestrado

Pedro Henrique Ribeiro Xavier

**ANÁLISE DO DESGASTE DE FERRAMENTAS DE CORTE
NO FRESAMENTO DE PEÇAS COM DIFERENTES
GEOMETRIAS**

Belo Horizonte, maio de 2018.



Pedro Henrique Ribeiro Xavier

Análise do desgaste de ferramentas de corte no fresamento de peças com diferentes geometrias.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Ciência e Desenvolvimento de Materiais.
Linha de Pesquisa: Seleção, processamento e caracterização.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Cardoso Santos
Co-orientador: Prof. Dr. Luis Henrique Andrade Maia

Belo Horizonte, maio de 2018.

X3a Xavier, Pedro Henrique Ribeiro.
Análise do desgaste de ferramentas de corte no fresamento de peças com diferentes geometrias / Pedro Henrique Ribeiro Xavier. - 2018.
106 f. : il., fotos, grafs., tabs.
Orientador: Sandro Cardoso Santos.
Co-orientador: Luis Henrique Andrade Maia.
Dissertação (mestrado) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2018.
Bibliografia.

1. Usinagem. 2. Fresagem. 3. Ferramentas para cortar metais. 4. Desgaste dos materiais. 5. Vibração (Mecânica). I. Santos, Sandro Cardoso. II. Maia, Luis Henrique Andrade. III. Título.

CDD: 620.11292



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
“ANÁLISE DO DESGASTE DE FERRAMENTAS DE
CORTE NO FRESAMENTO DE PEÇAS COM
DIFERENTES GEOMETRIAS”

Autor: Pedro Henrique Ribeiro Xavier

Orientador: Prof. Dr. Sandro Cardoso Santos

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof. Dr. Sandro Cardoso Santos (ORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Luis Henrique Andrade Maia (COORIENTADOR)
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC/MG

Prof. Dr. Leonardo Roberto da Silva
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Yukio Shigaki
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Belo Horizonte, 22 de Maio de 2018.

Dedico este trabalho à minha esposa
Kenia e aos meus pais Emanuel e Myrian
por estarem sempre ao meu lado.

*“Sou um homem afortunado e devo buscar
minha fortuna.”*

(Henry Avery).

AGRADECIMENTOS

À Deus e minha família.

Agradeço à todos que contribuíram para realização deste trabalho, em especial:

Ao professor Sandro Cardoso, pela orientação e ajuda durante o trabalho.

Ao professor Luis Maia, pela coorientação, apoio e confiança no desenvolvimento do trabalho.

Aos professores Leonardo Roberto e Yukio Shigaki, membros da banca de qualificação que forneceram importantes sugestões para o aprimoramento do trabalho.

À equipe técnica do Departamento de Engenharia Mecânica do CEFET-MG, em especial ao Marcelo Ferreira e Wenceslau Barbosa.

À equipe técnica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Minas, em especial ao Ítalo, que me deu todo apoio durante a realização dos ensaios.

Ao Laboratório de Microscopia Avançada da PUC-Minas, em especial à Edilene Braga, pela realização das análises microscópicas.

Ao Aldeci Santos, da Sandvik Coromant, por fornecer as ferramentas utilizadas no trabalho.

Aos amigos do mestrado: Daniel Brandão, Guilherme Duca e Steferson Ferreira que foram grandes companheiros nessa jornada.

Ao Cefet/MG por disponibilizar os meios necessários para a realização do trabalho e pelo apoio financeiro.

RESUMO

A compreensão dos fenômenos que ocorrem durante a usinagem permite o aumento da previsibilidade do processo, levando ao aumento da produtividade durante a fabricação. Conhecer bem as variáveis e os parâmetros de usinagem é de fundamental importância para entender o comportamento na interface entre a ferramenta e a peça de trabalho. Por ser um processo intermitente, o fresamento submete a ferramenta de corte a variações cíclicas de temperatura e tensão, geradas pelo movimento de rotação da fresa durante a usinagem. Este trabalho tem o objetivo de analisar o desgaste das ferramentas de corte no fresamento frontal de peças com diferentes geometrias. Essas variações provocam avarias e desgastes, que podem ocasionar a quebra e conseqüente fim da vida das ferramentas. Fatores como o comprimento e a geometria da peça influenciam no número de entradas e saídas da ferramenta na peça, intensificando o seu desgaste. No trabalho foram realizados ensaios de fresamento frontal em duas barras de aço SAE 1045 com diferentes geometrias, mantendo-se todos os parâmetros de corte constantes. Para diferenciá-las, foram usinados canais em uma delas, respeitando-se o comprimento de corte total, que foi de 300mm. Após uma quantidade definida de entradas e saídas de corte, as ferramentas passaram por sucessivas análises em microscópio óptico e medição de massa, com o intuito de identificar e caracterizar as formas e os mecanismos de desgaste presentes. Concomitantemente, foram coletados sinais de vibrações mecânicas do sistema composto pelos corpos de prova e as ferramentas de corte, com o objetivo de ratificar a influência da geometria das peças na evolução do desgaste das ferramentas. Os dados coletados para cada peça foram dispostos em gráficos para o melhor entendimento e comparação do desempenho entre as ferramentas, e observou-se que o número de entradas e saídas da ferramenta sobre a peça é o fator de maior relevância na evolução do desgaste. As ferramentas utilizadas no fresamento dos corpos de prova sem canais desgastaram-se menos do que as utilizadas nos corpos de prova com canais.

Palavras chave: usinagem, fresamento, ferramentas de corte, desgaste/avarias, vibrações mecânicas.

ABSTRACT

The comprehension of the phenomena that occur during the machining allows the increase of the predictability of the process, leading to the increase of the productivity during the manufacture. Knowing the variables and the parameters of machining is very important to understand the behavior at the interface between the cutting tool and the workpiece. As an intermittent process, the milling exposes the cutting tool to cyclical variations of temperature and tension, generated by the rotation movement of the milling cutter during machining. This work has the objective of analyzing the wear of cutting tools in the front milling of parts with different geometries. These variations cause damages and wear, which can lead to fail and consequent end of tool life. Factors such as length and part geometry influence the number of tool inputs and outputs in the workpiece, increasing its wear. In this work, tests of frontal milling were carried out on two SAE 1045 steel bars with different geometries, keeping all cutting parameters constant. To differentiate them, channels were machined in one of them, respecting the total cut length, which was 300mm. After a defined amount of cut in and cut out, the tools underwent successive optical microscopy and mass gauging, in order to identify and characterize the present forms. Simultaneously, mechanical vibration signals were collected from the system composed of test specimens and cutting tools, with the purpose of ratifying the influence of the geometry of the parts on the evolution of tool wear. The data collected for each piece were arranged in graphs for a better understanding and comparison of the performance between the tools, and it was observed that the number of inputs and outputs of the tool on the part is the most relevant factor in the evolution of the wear. The tools used in the milling of the test pieces without channels were worn less than those used in the test pieces with channels.

Key words: machining, milling, cutting tools, wear/damage, mechanical vibrations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processos básicos de fresamento. (a) Fresamento Tangencial; (b) Fresamento Frontal; (c) Fresamento de Topo.....	22
Figura 2 – Técnicas de fresamento. (a) Fresamento Concordante; (b) Fresamento discordante.....	22
Figura 3 – Fresamento frontal.....	24
Figura 4 – Posição da ferramenta em relação a peça. (a) Posição simétrica; (b) Posição assimétrica.....	25
Figura 5 – Efeito do valor de 'j' no fresamento assimétrico.....	26
Figura 6 – Fresas e os ângulos de posição (a) 10°; (b) 45°; (c) 90°.....	27
Figura 7 – Profundidade de corte e penetração de trabalho no fresamento frontal...29	
Figura 8 – Velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento.....	30
Figura 9 – Localizando o diâmetro da fresa. (a) Ponto PK; (b) Diâmetro da fresa. ...	31
Figura 10 – Espessura máxima do cavaco.....	32
Figura 11 – Representação da entrada (a) e saída (b) da ferramenta de corte.....	33
Figura 12 – Componentes da força de usinagem no fresamento.....	34
Figura 13 – Variação cíclica da temperatura de corte durante os períodos ativo e inativo.....	37
Figura 14 – Curva de variação de temperatura no corte interrompido.....	38
Figura 15 – Distribuição da temperatura e de tensões nas ferramentas de corte.....	39
Figura 16 – Sulcos em forma de pente.....	39
Figura 17 – Lascamento da ferramenta de corte.....	40
Figura 18 – Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte.....	41
Figura 19 – Desgaste de cratera ou craterização.....	42
Figura 20 – Desgaste de flanco.....	43
Figura 21 – Desgaste de entalhe.....	44
Figura 22 – Aresta postiça de corte – ou em inglês <i>BUE (build up edge)</i>	45
Figura 23 – Mecanismos de desgaste em função da temperatura de corte.....	46
Figura 24 – Parâmetros para caracterizar o desgaste em ferramentas.....	47
Figura 25 – Curva de evolução do desgaste de ferramentas.....	48
Figura 26 – Fluxograma da pesquisa.....	52
Figura 27 – Corpos de prova antes da usinagem dos canais.....	53
Figura 28 – Máquina ferramenteira FVF 3000 (a); Fresa de metal duro Dormer (b). 54	

Figura 29 – Dimensões do corpo de prova com canais (a); Corpo de prova após a abertura dos canais (b).	55
Figura 30 – Ensaio de dureza Brinell	56
Figura 31 – (a) Centro de Usinagem Discovery 560 – ROMI; (b) Painel de controle Siemens.	57
Figura 32 – (a) Montagem do microscópio Zeiss Discovery.V8; (b) Câmera Zeiss ERc 5s.	58
Figura 33 – Montagem do microscópio eletrônico de varredura JSM-IT300.	58
Figura 34 – Balança analítica OHAUS AR2140.	59
Figura 35 – (a) Equipamentos para monitoramento dos sinais de vibrações mecânicas; (b) Acelerômetro de 3 eixos instalado no eixo de rotação da fresa.	60
Figura 36 – Parâmetros e condições de usinagem recomendadas para ferramentas da classe P.....	61
Figura 37 – Representação das ferramentas de corte utilizadas no trabalho.	61
Figura 38 – Representação da fresa CoroMill 490 utilizada no trabalho.	62
Figura 39 – Painel de controle do Centro de Usinagem.....	64
Figura 40 – Marcas de identificação da classe e da aresta de corte da ferramenta..	65
Figura 41 – Marcações para posicionamento das ferramentas.....	66
Figura 42 – Representação dos ensaios de fresamento: (a) vista superior; (b) vista lateral.	67
Figura 43 – (a) Instalação dos acelerômetros no sistema; (b) Detalhe para os eixos coordenados.....	70
Figura 44 – Amplificador de sinais QuantumX MX1601B.....	71
Figura 45 – Aspectos quantitativos dos gráficos de vibrações mecânicas: (a) Barras com canais; (b) Barras sem canais.	72
Figura 46 – Dureza média dos corpos de prova.....	73
Figura 47 – Evolução do desgaste das ferramentas de corte P20: (a) após 4 passes; (b) após 8 passes; (c) após 12 passes.....	75
Figura 48 – Desgaste de flanco médio das ferramentas P20 ao longo dos passes em diferentes geometrias: (a) Desvio-padrão (b) Curvas de evolução.	77
Figura 49 – Medição da massa do grupo 5 a 8: (a) inicial; (b) após 4 passes; (c) após 8 passes; (d) após 12 passes.....	78
Figura 50 – Curva de variação de massa das ferramentas P20 ao longo dos passes em diferentes geometrias.	79

Figura 51 - Desgaste de flanco médio das ferramentas P40 ao longo dos passes em diferentes geometrias: (a) Desvio-padrão (b) Curvas de evolução.	83
Figura 52 – Curva de variação de massa das ferramentas P40 ao longo dos passes em diferentes geometrias.	84
Figura 53 – Curvas de evolução do desgaste de flanco médio para as ferramentas P20 e P40 durante o fresamento de diferentes geometrias.	86
Figura 54 – Variação de massa das ferramentas P20 e P40 durante o fresamento de diferentes geometrias.	88
Figura 55 – Amplitude média de vibração em função do número de passes da ferramenta no corpo de prova sem canais.	90
Figura 56 – Amplitude em função das frequências excitadas ao longo dos passes na região C do corpo de prova sem canais.	92
Figura 57 – Amplitude em função das frequências durante o fresamento da região B1 no corpo de prova sem canais.	93
Figura 58 – Amplitude em função das frequências durante o fresamento da região B2 no corpo de prova sem canais.	94
Figura 59 – Amplitude média de vibração em função do número de passes da ferramenta no corpo de prova com canais.	95
Figura 60 – Amplitude em função das frequências excitadas ao longo dos passes na região C do corpo de prova com canais.	97
Figura 61 – Amplitude em função das frequências durante o fresamento da região B1 no corpo de prova com canais.	98
Figura 62 – Amplitude em função das frequências durante o fresamento da região B2 no corpo de prova com canais.	99
Figura 63 – Condição final das ferramentas P20 após o fresamento de diferentes geometrias: (a) Sem canais; (b) Com canais.	100
Figura 64 – Condição final das ferramentas P40 após o fresamento de diferentes geometrias: (a) Sem canais; (b) Com canais.	101
Figura 65 – Três casos particulares: (a) Lascamento da ferramenta 6; (b) Desgaste adesivo; (c) Desgaste de entalhe nas ferramentas P40.	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química em porcentagem de peso do aço SAE 1045 utilizado.	53
Tabela 2 – Especificações das ferramentas de corte revestidas.....	62
Tabela 3 – Especificações técnicas da fresa CoroMill 490.	63
Tabela 4 – Parâmetros de corte utilizados nos experimentos.....	64
Tabela 5 – Resumo dos ensaios realizados.....	68
Tabela 6 – Resultados para as ferramentas P20 no fresamento do corpo de prova sem canais.....	74
Tabela 7 – Resultados para as ferramentas P20 no fresamento do corpo de prova com canais.....	76
Tabela 8 – Variação de massa das ferramentas P20 ao longo dos passes em diferentes geometrias.....	80
Tabela 9 – Resultados para as ferramentas P40 no fresamento do corpo de prova sem canais.....	81
Tabela 10 – Resultados para as ferramentas P40 no fresamento do corpo de prova com canais.....	82
Tabela 11 – Variação de massa das ferramentas P40 ao longo dos passes em diferentes geometrias.....	85

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

APC – aresta postiça de corte

AISI – instituto americano de ferro e aço (*American Iron and Steel Institute*)

BUE – aresta postiça de corte (*build up edge*)

HSC – corte em alta velocidade (*high speed cutting*)

HSM – usinagem em alta velocidade (*high speed machining*)

ISO – Organização Internacional de Normalização (*International Organization for Standardization*)

MEV – Microscópio eletrônico de varredura

NBR – Norma Brasileira

PIB – Produto interno bruto

SAE – Sociedade de engenheiros automotivos (*Society of Automotive Engineers*)

LISTA DE SÍMBOLOS

- a_e – penetração de trabalho
 a_p – profundidade de corte
 D_c – diâmetro da fresa
 f – avanço por revolução
 f_{ap} – força de apoio
 f_c – força de corte
 f_f – força de avanço
 f_p – força passiva
 f_t – força ativa
 f_u – força de usinagem
 f_z – avanço por dente
 h_{ex} – espessura máxima do cavaco
 h_m – espessura média do cavaco
 j – deslocamento da fresa em relação a peça
HB – dureza Brinell
HV – dureza Vickers
K – coeficiente particular do par ferramenta-peça
KB – largura da cratera
KM – distância do centro da cratera à aresta de corte
KT – profundidade da cratera
 n – frequência de rotação
 N_c – potência de corte
 N_e – potência efetiva de corte
 N_f – potência de avanço
Q – taxa de remoção de material
T – tempo de vida da ferramenta
 t_c – tempo de corte
VB – desgaste de flanco
 VB_B – desgaste de flanco médio
 $VB_{BMÁx}$ – desgaste de flanco máximo
VC – desgaste de entalhe

v_f – velocidade de avanço

v_c – velocidade de corte

VN – desgaste de entalhe

z – número de dentes da fresa

φ – ângulo da direção de avanço

χ_r – ângulo de posição

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Objetivo geral do trabalho	18
1.2 Objetivos específicos	19
1.3 Organização da pesquisa	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 Processo de usinagem por fresamento.....	20
2.2 Características do fresamento frontal	24
2.3 Variáveis e parâmetros de corte no processo de fresamento.	28
2.3.1 Parâmetros de corte.....	28
2.3.2 Parâmetros do movimento	29
2.3.3 Parâmetros da ferramenta	30
2.3.4 Espessura máxima do cavaco	31
2.4 Posição da ferramenta no fresamento frontal	32
2.5 Esforços na usinagem.....	33
2.6 Avarias e desgastes em ferramentas de corte	35
2.7 Avarias nas ferramentas de corte	36
2.7.1 Trincas de origem térmica.....	37
2.7.2 Trincas de origem mecânica	40
2.8 Desgastes nas ferramentas de corte	41
2.8.1 Desgaste de cratera ou craterização.....	41
2.8.2 Desgaste de flanco.....	42
2.8.3 Desgaste de entalhe	43
2.9 Mecanismos de desgaste	44
2.10 Caracterização do desgaste em ferramentas de corte.....	47
2.11 Evolução do desgaste e curva de vida das ferramentas.....	48
2.12 Vibrações mecânicas	49

3 METODOLOGIA.....	51
3.1 Descrição do trabalho	51
3.2 Materiais	52
3.2.1 Preparação dos corpos de prova de 350mm	53
3.2.2 Medição de dureza nos corpos de prova	56
3.3 Máquinas e equipamentos	56
3.4 Ferramentas de corte utilizadas nos ensaios	60
3.5 Procedimento experimental	63
3.5.1 Parâmetros de corte aplicados nos ensaios.....	63
3.5.2 Ensaio de fresamento.....	65
3.5.3 Medição da massa das ferramentas	68
3.5.4 Análises em microscópio ótico	68
3.5.5 Análise no microscópio eletrônico de varredura (MEV).....	69
3.5.6 Aquisição de dados de vibrações mecânicas.....	69
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	73
4.1 Ensaio de dureza Brinell	73
4.2 Influência da geometria da peça na evolução do desgaste da ferramenta de classe P20.	74
4.3 Influência da geometria da peça na evolução do desgaste da ferramenta de classe P40.	81
4.4 Comparação de desempenho entre as ferramentas P20 e P40.	86
4.5 Análise dos sinais de vibrações	89
4.6 Análise da condição final das ferramentas de corte.....	100
4.6.1 Três casos particulares observados no MEV.	101
5 CONCLUSÃO.....	103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

1 INTRODUÇÃO

O tema proposto para este trabalho é estudar o desempenho de ferramentas de corte durante o fresamento de peças com diferentes geometrias. A compreensão deste fenômeno, que envolve o desempenho das ferramentas, é tema de investigação frequente para pesquisadores e membros da indústria metal-mecânica, que buscam melhorias no processamento e fabricação de materiais, visando redução de custos, qualidade do produto, cumprimento de prazos e soluções tecnológicas.

O fresamento é um dos processos de fabricação mais utilizados na indústria. É reconhecido por garantir elevadas taxas de remoção de material, uma vez que possui múltiplas arestas de corte. É um processo de desbaste e acabamento de materiais, levando à obtenção de peças com geometrias complexas. Grande parte das peças mecânicas com superfícies que não são planas só podem ser obtidas pelo processo de fresamento. Destaca-se ainda pela sua versatilidade e capacidade de execução de muitas tarefas em centros de usinagem cada vez mais modernos e eficientes (MACHADO et al., 2009).

Alguns fenômenos observados durante o processo nem sempre são os esperados. Parâmetros como a velocidade de corte, avanço por dente e profundidade de corte exercem influência significativa sobre o comportamento durante o processo de fresamento. Além destes, outros parâmetros que são averiguados normalmente são: penetração de trabalho, utilização de fluidos de corte e o par ferramenta-peça. Este último pode ser dividido em materiais para ferramentas, geometria da ferramenta, revestimento da ferramenta e o material da peça.

Existe também a influência da geometria da peça trabalhada e seu comprimento, quanto ao número de entradas e saídas da ferramenta de corte. Assim, conhecer a influência que a geometria da peça tem sobre os efeitos de desgaste das ferramentas de corte irá contribuir para a melhor compreensão e previsibilidade dos processos de fabricação por fresamento.

1.1 Objetivo geral do trabalho

Em suma, o objetivo deste trabalho é estudar a influência que a geometria das peças exerce sobre o desempenho das ferramentas de corte, visando o desgaste e a vida útil das ferramentas durante o fresamento frontal. Assim, é importante abordar tópicos como os diferentes tipos de mecanismos de desgaste que ocorrem,

caracterizar estes tipos de desgaste, verificar a influência do número de entradas e saídas da ferramenta de corte e sua influência no tempo de vida da ferramenta.

1.2 Objetivos específicos

- Realizar a quantificação e a avaliação das formas e mecanismos de desgaste nas ferramentas de corte por meio de microscopia óptica e de varredura, a fim de se comparar os resultados obtidos para cada geometria da peça estudada.
- Mensurar a variação de massa das ferramentas durante o fresamento em diferentes geometrias, com o objetivo de alinhá-la ao desgaste das arestas de corte.
- Monitorar as vibrações mecânicas do sistema para ratificar a influência do impacto gerado nas entradas e saídas, sobre o desgaste das ferramentas durante o fresamento de diferentes geometrias.

1.3 Organização da pesquisa

Por fim, a pesquisa está dividida em cinco capítulos organizados e descritos a seguir:

- Capítulo 1: Introdução e objetivos.
- Capítulo 2: Revisão bibliográfica a respeito das principais características do processo de fresamento, avarias e desgaste de ferramentas de corte, vida das ferramentas e características do material utilizado na pesquisa.
- Capítulo 3: Materiais e métodos em que serão apresentados os equipamentos utilizados, bem como as ferramentas e o planejamento das atividades.
- Capítulo 4: Resultados e discussão.
- Capítulo 5: Conclusão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O conceito mais aceito para usinagem é a que a considera como um processo de fabricação em que há retirada de material da peça em forma de cavaco. Cavaco nada mais é que a porção de material que foi removida da peça. Outros processos de fabricação como a estampagem e a retificação, entre outros, também retiram material da peça, entretanto o modo como se dá essa retirada apresenta diferenças em relação à usinagem. Na retificação por exemplo, a retirada de material se dá por meio de grãos abrasivos em grandes quantidades distribuídos de forma aleatória, enquanto que na usinagem o número de ferramentas e sua forma é bem definida (SANTOS; SALES, 2004).

Após anos de evolução nos processos de fabricação de peças de engenharia, desde a madeira utilizada até meados do século XVIII, passando pela revolução industrial, chega-se ao ano de 1862, ano em que a primeira fresadora universal foi desenvolvida. Concebida por J. R. Brown, foi utilizada inicialmente para a produção de canais em brocas helicoidais. Outro acontecimento importante para o processo de fabricação por fresamento foi em 1896, quando F. W. Fellows desenvolveu uma máquina capaz de produzir praticamente qualquer tipo de engrenagem. A partir do ano de 1940 os processos de usinagem não convencionais passaram a ganhar importância pela capacidade de produzir peças com geometrias complexas em materiais de difícil usinabilidade, garantindo acabamento de elevada qualidade e tolerâncias dimensionais cada vez mais estreitas (MACHADO et al., 2009).

No Brasil, em 2010, a participação da indústria manufatureira em relação ao produto interno bruto ficou em 15,8%, segundo estudo realizado pela Fundação Centro de Ferro e Aço (Ilasa) (ESTADÃO, 2011). Para Kalpakijan (1995) *apud* Machado et al. (2009), a manufatura pode ser entendida como o processo de fabricação de grandes quantidades de produtos de forma padronizada e em série, com a utilização de máquinas operatrizes.

2.1 Processo de usinagem por fresamento

O fresamento é considerado como um dos principais processos de fabricação de peças com geometrias complexas, dimensões e formas diversas. É um processo de usinagem em que o material é removido por uma ferramenta rotativa denominada fresa que possui múltiplas arestas de corte. Cada aresta remove uma pequena quantidade de material a cada revolução do fuso da máquina fresadora. Tanto a peça

de trabalho quanto a ferramenta podem se mover em mais de uma direção ao mesmo tempo, sendo possível dessa forma usinar superfícies com qualquer orientação (ASM HANDBOOK, 1989).

Ferraresi (1977) conceitua o fresamento da seguinte maneira: “Processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies quaisquer com o auxílio de ferramentas geralmente multicortantes. Para tanto, a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se deslocam segundo uma trajetória qualquer”.

Sandvik Coromant (2010) destaca que o fresamento é o método de usinagem mais flexível, conferido pela maior quantidade de eixos de movimentação no equipamento, podendo usinar peças com geometrias de qualquer formato. Mas também relaciona esta flexibilidade a uma característica negativa, pois tal flexibilidade colabora com o incremento de muitas variáveis ao processo e acaba tornando-o um desafio quanto à otimização.

Além dessa versatilidade na produção de geometrias diversas, o fresamento garante elevadas taxas de remoção de material, uma vez que a ferramenta possui múltiplas arestas cortantes. Neste tipo de operação, a ferramenta gira enquanto a peça que está presa à mesa é a responsável pelos movimentos de avanço longitudinal e transversal. Em situações especiais, a peça pode ficar estática enquanto a ferramenta realiza todos os movimentos (MACHADO et al., 2009).

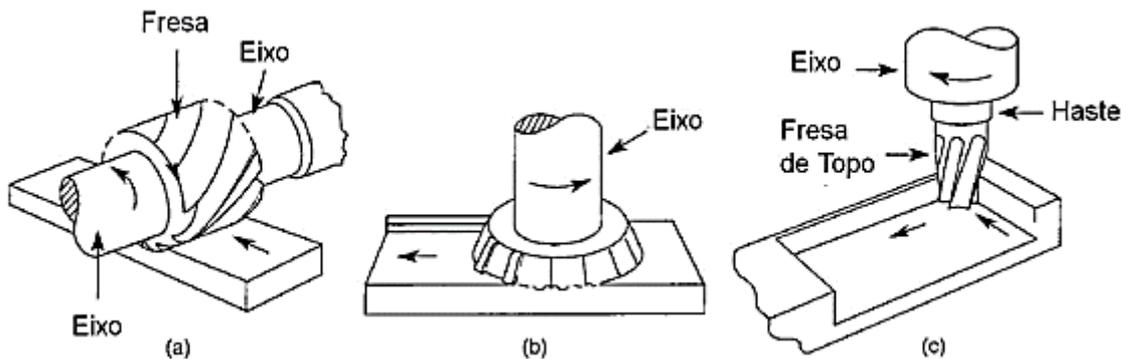
Por ser um processo de corte intermitente, isto é, os dentes da fresa entram e saem da peça a cada revolução da ferramenta, o fresamento gera ciclos de forças de impacto e cargas térmicas a cada rotação, que interferem na vida útil da ferramenta de corte. Por isso, é necessário a escolha de ferramentas adequadas para cada situação e máquinas e sistemas de fixação com elevada rigidez.

O processo de fresamento tem suas variações, cada um com suas vantagens. A escolha do melhor tipo de fresamento depende de fatores que vão desde o tipo e a condição do equipamento, a vida da ferramenta, o acabamento superficial requerido até os parâmetros de corte que serão necessários. Variantes dos processos de fresamento são mostrados na Figura 1. A seguir são listadas outras variações dos processos de fresamento.

- Fresamento tangencial.
- Fresamento tangencial de canais ou de perfis.
- Fresamento de topo.

- Fresamento frontal.
- Fresamento com fresa de tipo esférica.
- Fresamento de cavidades.

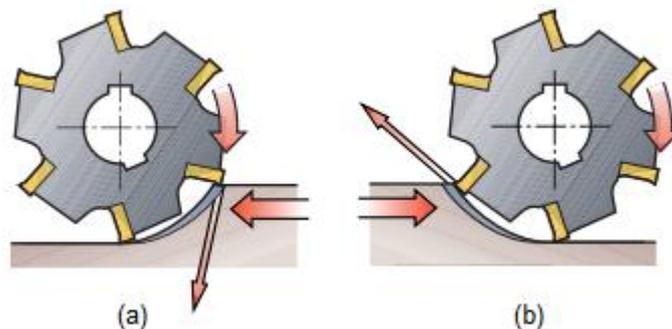
Figura 1 – Processos básicos de fresamento. (a) Fresamento Tangencial; (b) Fresamento Frontal; (c) Fresamento de Topo.



Fonte: Kalpakijan e Schmid, 2006.

Existem duas técnicas fundamentais de fresamento, o fresamento concordante, conforme Figura 2 (a) e o fresamento discordante, observado na Figura 2 (b). Estas duas técnicas diferem entre si de acordo com o sentido de rotação da fresa em relação ao movimento de avanço. No fresamento concordante, os sentidos das velocidades de corte e de avanço são geralmente os mesmos. No fresamento discordante, ocorre justamente o contrário (BARBOSA, 2014).

Figura 2 – Técnicas de fresamento. (a) Fresamento Concordante; (b) Fresamento discordante.



Fonte: Sandvik Coromant, 2010 (adaptado)

A espessura de corte no fresamento concordante diminui com o passar do tempo. A penetração da ferramenta é feita com a espessura de corte máxima, gerando vibrações e a conseqüente redução na vida da ferramenta. No fresamento discordante a espessura de corte aumenta gradualmente, o que produz deformação em vez de cavaco e é prejudicial ao acabamento superficial e tolerância da peça.

O fresamento, que é o principal responsável pela fabricação de engrenagens evoluiu para um método que usina uma ampla variedade de operações. Além de todas as operações convencionais, o fresamento é também uma forte alternativa para fazer furos, roscas, cavidades e superfícies que geralmente eram torneadas, furadas ou rosqueadas com machos (SANDVIK COROMANT, 2010).

Lopes (2013) cita uma tendência do fresamento para usinagens com menor profundidade de corte e com maiores velocidades de corte e de avanço, conhecida como *high speed machining* (HSM) ou com maior velocidade de corte, conhecida como *high speed cutting* (HSC). Com o desenvolvimento de máquinas ferramenta cada vez mais rígidas e ferramentas de corte avançadas, a tecnologia HSM está sendo amplamente utilizada na fabricação de componentes em seu estado endurecido (CUI; ZHAO; TIAN, 2012).

De acordo com Asm Handbook (1989) as principais diferenças entre o fresamento e outros processos de fabricação por usinagem são as interrupções no corte que ocorrem assim que o dente de corte deixa a peça trabalhada, o tamanho relativamente pequeno dos cavacos produzidos e a variação da espessura dos cavacos.

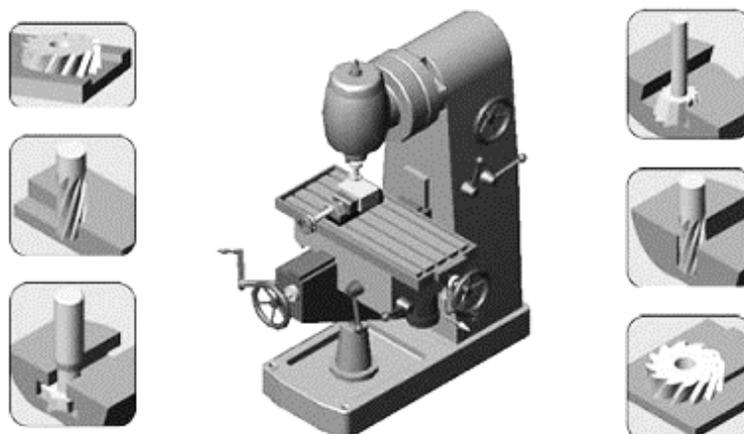
A importância deste processo de fabricação é evidente diante de tanta versatilidade e possibilidades de produção de peças de engenharia com diferentes geometrias, tamanhos e formas. São necessários cada vez mais estudos e pesquisas acerca dos fenômenos que ocorrem durante o processo, principalmente relativos à vida das ferramentas utilizadas. A busca pela otimização de processos, melhoria da qualidade dos produtos, redução de custos e por materiais para ferramentas cada vez mais eficientes instigam pesquisadores e membros da indústria metal-mecânica.

Neste trabalho, o tipo de fresamento utilizado foi o frontal que é a operação mais comum no fresamento e que pode ser realizada utilizando uma grande variedade de ferramentas de corte.

2.2 Características do fresamento frontal

O fresamento frontal é utilizado para usinar superfícies planas por meio da fresa que possui dentes cortantes em sua superfície frontal e são posicionados perpendicularmente em relação a superfície trabalhada (ASM HANDBOOK, 1989). Segundo a Sandvik Coromant (2010) o fresamento frontal é a operação mais comum e pode ser realizada usando diferentes tipos de ferramentas. É frequentemente utilizado em usinagem industrial para fabricação de superfícies largas e planas de forma rápida e precisa (DINIZ; CALDEIRANI FILHO, 1999). A Figura 3 representa um esquema de uma fresadora e tipos diferentes de fresamento, com ênfase no frontal.

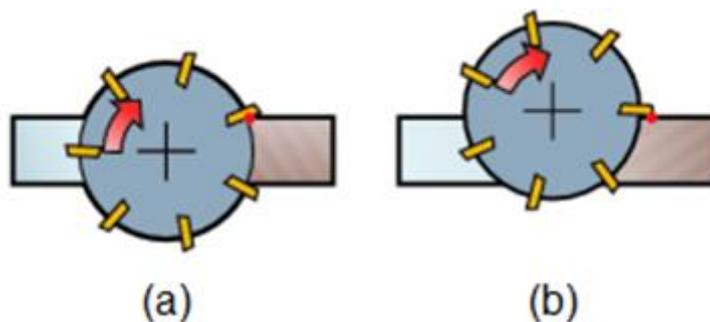
Figura 3 – Fresamento frontal.



Fonte: Portal Metálica, 2017.

No fresamento frontal, a posição relativa entre a ferramenta de corte e a peça exerce forte influência nos resultados da operação. Existem duas situações para o fresamento quanto da posição da ferramenta em relação a peça de trabalho: a posição simétrica, que é caracterizada por apresentar concordância entre o eixo da fresa e a linha de simetria da peça, Figura 4 (a), e a posição assimétrica em que o corte não ocorre sobre o eixo de simetria da peça trabalhada, Figura 4 (b).

Figura 4 – Posição da ferramenta em relação a peça. (a) Posição simétrica; (b) Posição assimétrica.



Fonte: Sandvik Coromant, 2010 (adaptado).

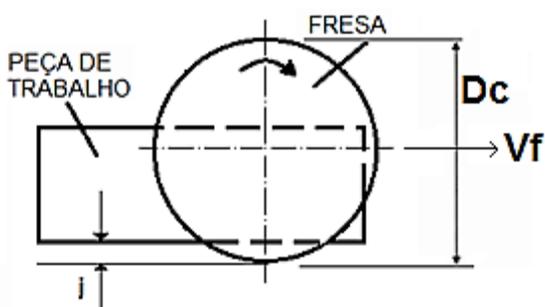
Para compreender e conseguir melhores resultados durante o processo, Diniz e Caldeirani Filho (1999) consideram ser importante levar em consideração o comprimento de corte, o número de dentes engajados, as forças de corte e o engajamento dos dentes com a peça de trabalho.

Em relação ao comprimento de corte devido ao arco de contato, quando a posição é simétrica, observa-se um menor toque entre a ferramenta de corte e a peça. Para esta situação, os resultados de Diniz e Caldeirani Filho (1999) demonstram um maior desgaste da ferramenta de corte. A direção das forças de corte radiais no corte simétrico varia na medida em que a aresta de corte penetra na peça, levando a vibrações e a quebra prematura da aresta de corte. Isto pode ser minimizado quando se tem mais dentes engajados durante o fresamento. Quando o corte é assimétrico, a variação da direção da componente radial é menor, com menor tendência a vibração, garantindo um melhor rendimento da ferramenta. Barbosa (2014) declara que o fresamento assimétrico é vantajoso quando o diâmetro da fresa é maior em relação a largura da peça. Isto ocorre porque neste tipo de fresamento, tem-se um maior número de dentes simultaneamente no corte, caracterizando-o mais suave frente ao fresamento simétrico.

Ainda sobre a posição relativa entre a peça e a ferramenta, Diniz, Marcondes e Coppini (2013) enfatizam que a longevidade da ferramenta é maior quando o fresamento é assimétrico e o valor de 'j' é pequeno, como mostra a Figura 5. Quanto maior o valor de 'j' menor a vida da ferramenta devido ao aumento do lascamento na aresta de corte. O lascamento está relacionado aos esforços mecânicos a que está acometida a ferramenta. O aumento deste fator pode ser relacionado ao fato de que

a espessura do cavaco na entrada da ferramenta na peça é incrementada com o aumento no valor de 'j', fazendo com que o impacto da entrada da ferramenta seja mais intenso.

Figura 5 – Efeito do valor de 'j' no fresamento assimétrico.



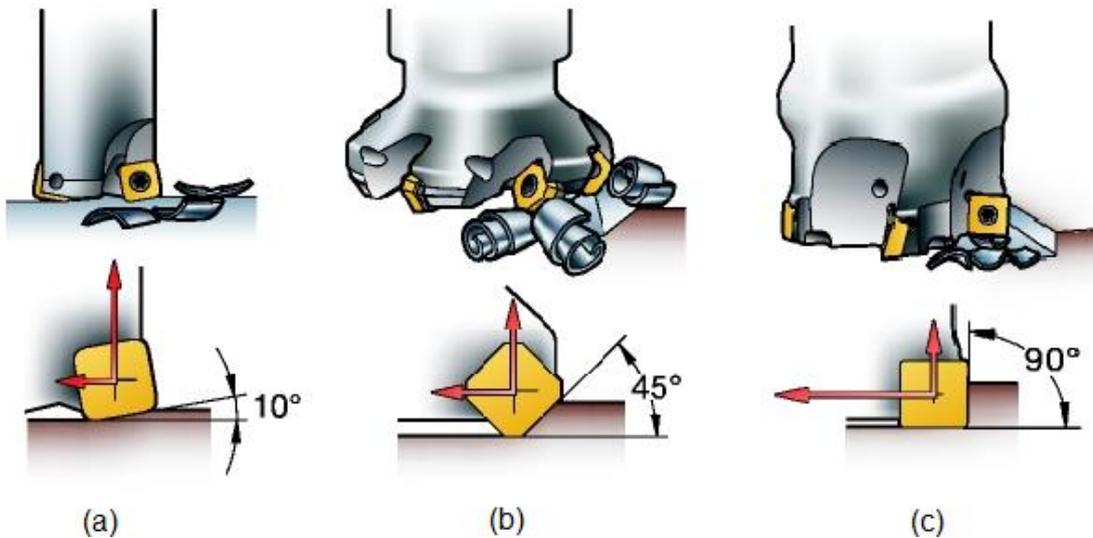
Fonte: Próprio autor.

Outro fator importante para os resultados do fresamento é o ângulo de posição (χ_r) que é o ângulo formado entre a aresta principal de corte da ferramenta e a superfície da peça sendo que os mais comuns são 10° , 45° e 90° . A espessura dos cavacos, as forças de corte e principalmente a vida útil das ferramentas são afetadas por este ângulo (SANDVIK COROMANT, 2017).

Em geral, a redução do ângulo de posição em arestas retas diminui a espessura dos cavacos, para uma dada faixa de avanço por dente. Para proteger a aresta de corte deve-se reduzir a pressão radial na ferramenta, isto pode ser realizado com uma diminuição do ângulo, pois pequenos valores oferecem uma posição mais gradual no corte. Ou seja, a pressão é maior na peça quando forças axiais são mais altas devido a diminuição do ângulo de posição.

Lopes (2013) lista algumas características inerentes ao processo para cada ângulo de posição citado. Quando $\chi_r = 10^\circ$, as fresas podem trabalhar com altos valores de avanço por dente (f_z) e serem utilizadas para fresamento em mergulho. Quando $\chi_r = 45^\circ$, as forças de corte radiais e axiais possuem as melhores condições de balanceamento, entretanto os valores da profundidade de corte ficam limitados. Esta é a escolha geral para o fresamento frontal. Quando $\chi_r = 90^\circ$, as forças radiais ficam orientadas na direção do avanço, sendo permitida a usinagem de peças com paredes finas com menor vibração. Os ângulos de posição mais comuns são mostrados na Figura 6 a seguir.

Figura 6 – Fresas e os ângulos de posição (a) 10°; (b) 45°; (c) 90°.



Fonte: Sandvik Coromant, 2017 (adaptado).

Para o fresamento frontal, a Sandvik Coromant (2010) recomenda a utilização de fresas com diâmetros que sejam de 20 a 50% maior que a peça. Se o diâmetro da fresa for igual ou ligeiramente maior que a largura da peça em trabalho, haverá valores de espessura de corte muito pequenos na entrada e saída do corte, gerando muita pressão. Se for muito maior, o choque entre a fresa e a peça na saída do dente de corte pode acarretar o lascamento e quebra da ferramenta. Além disso, haverá uma fresa de custo elevado para tal situação.

Asm Handbook (1989) quando compara o fresamento frontal com o fresamento tangencial cita que o corte no frontal é mais estreito e mais profundo na direção radial, portanto, remove uma quantidade de material com menor uso de potência. Além disso, o fresamento frontal apresenta outras vantagens em relação ao tangencial:

- Maior rigidez do sistema máquina/ferramenta já que a fresa é acoplada diretamente no eixo da árvore da máquina.
- Usinagem de maiores áreas com menor esforço do eixo de rotação.
- Redução no tempo de troca das ferramentas de corte.
- Menor custo para a reutilização das ferramentas de corte se a fresa for sólida ou então custo zero no caso das ferramentas serem no estilo pastilha.
- Melhor acabamento da superfície.
- Melhor desempenho na remoção de maiores quantidade de material.
- Permite tolerâncias mais precisas.

Em relação às limitações este método está estritamente relacionado à usinagem de superfícies planas e ao aumento dos esforços na direção perpendicular ao movimento de avanço.

2.3 Variáveis e parâmetros de corte no processo de fresamento.

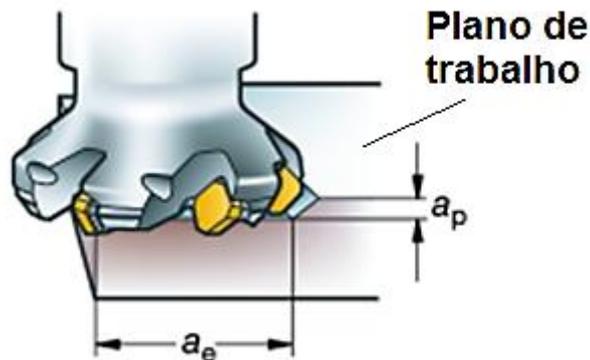
A seguir, tendo como base a publicação da Sandvik Coromant (2010) e a norma NBR 6162 (1989) *apud* Machado et al. (2009), são apresentadas algumas definições importantes sobre o processo de fresamento em geral.

2.3.1 Parâmetros de corte

- Profundidade de corte (a_p): é a profundidade ou largura de penetração da ferramenta na peça, medida em uma direção perpendicular ao plano de trabalho.
- Penetração de trabalho (a_e): é a penetração da ferramenta em relação à peça. É medida no plano de trabalho e em uma direção perpendicular à direção de avanço. A medida em que a penetração de trabalho aumenta, o ângulo de contato entre a fresa e a peça também aumenta, para cada revolução da ferramenta, ocasionando um aumento na temperatura da ferramenta e a consequente diminuição de seu tempo de vida.
- Tempo de corte (t_c): é comprimento da usinagem dividido pela velocidade de avanço.
- Taxa de remoção de material (Q): é o volume de metal removido em milímetros cúbicos por minuto. É estabelecido usando os valores para profundidade de corte, largura e avanço.

Na Figura 7 estão representados os parâmetros profundidade de corte e penetração de trabalho supracitados.

Figura 7 – Profundidade de corte e penetração de trabalho no fresamento frontal.



Fonte: Sandvik Coromant, 2010 (adaptado).

2.3.2 Parâmetros do movimento

- Frequência de rotação (n): é o número de rotações que a ferramenta faz por minuto. É um valor orientado para a máquina, calculado a partir do valor de velocidade de corte recomendada.
- Avanço por revolução (f): é o percurso de avanço em cada volta ou em cada curso da ferramenta. Para ferramentas como a fresa, que possuem mais de um dente, tem-se o avanço por dente.
- Avanço por dente (f_z): representa o percurso de avanço de cada dente medido na direção do avanço da ferramenta e que corresponde à geração de duas superfícies consecutivas na usinagem. É dado pela Equação 1 em ($mm/dente$):

$$f_z = \frac{f}{z} \quad (1)$$

Em que:

f = avanço por revolução

z = número de dentes

- Velocidade de avanço (v_f): representa o movimento da ferramenta com relação a peça e depende do avanço por dente e do número de dentes da fresa. É a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta de corte da ferramenta, segundo a direção e o sentido de avanço. É dada pela Equação 2 em (mm/min):

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

Em que:

f = avanço por revolução

n = frequência de rotação

- Velocidade de corte (v_c): indica a velocidade instantânea da superfície no ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, de acordo com a direção e o sentido do corte. É dada pela Equação 3 em (m/min):

$$v_c = \frac{\pi \cdot D_c \cdot n}{1000} \quad (3)$$

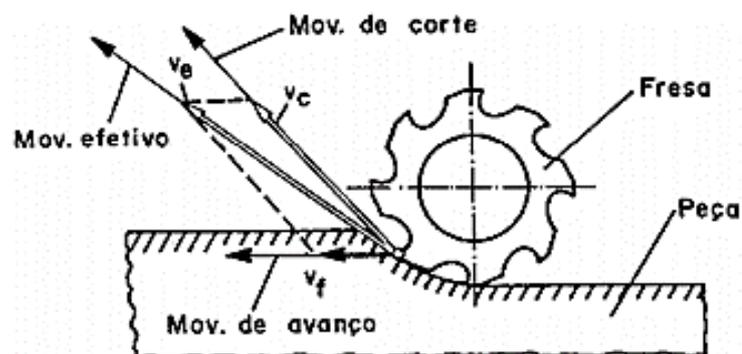
Em que:

D_c = diâmetro da fresa

n = frequência de rotação

Segue abaixo a Figura 8 representando alguns parâmetros relativos ao movimento na operação do fresamento.

Figura 8 – Velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento.

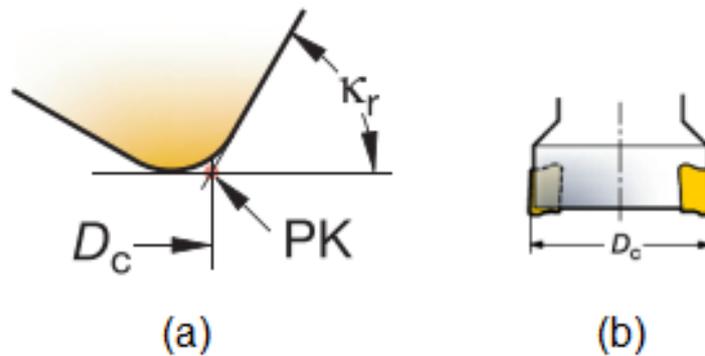


Fonte: NBR-6162, 1989.

2.3.3 Parâmetros da ferramenta

- Número de dentes (z): é o número de arestas efetivas de corte, que corresponde ao número de dentes que usinam simultaneamente. É utilizado para determinar o avanço da mesa e a produtividade. Tem influência crítica sobre o escoamento de cavacos e a estabilidade operacional.
- Diâmetro da fresa (D_c): o diâmetro da fresa é medido acima do ponto PK mostrado na Figura 9. É o ponto onde a aresta de corte principal encontra a fase paralela.

Figura 9 – Localizando o diâmetro da fresa. (a) Ponto PK; (b) Diâmetro da fresa.



Fonte: Sandvik Coromant, 2010 (adaptado).

2.3.4 Espessura máxima do cavaco

A espessura máxima do cavaco (h_{ex}) é um resultado do envolvimento da fresa e como ela está relacionada ao avanço por dente, a penetração de trabalho e ao ângulo de posição e pode ser expresso pela Equação 4 em (mm):

$$h_{ex} = f_z * \text{sen} \chi_r \quad (4)$$

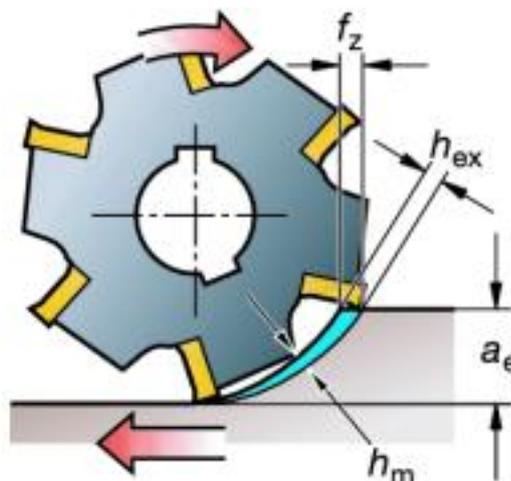
Em que:

f_z = avanço por dente

χ_r = ângulo de posição

É um fator importante para se decidir quanto ao avanço por dente, a fim de garantir a maior produtividade. O corte efetivo acontecerá se ele for mantido a um valor compatível à fresa em uso. Um cavaco fino, com um valor de espessura máxima muito baixo, pode afetar a vida útil da ferramenta, resultando em baixo rendimento. Um valor muito alto sobrecarrega a aresta de corte levando a quebras (SANDVIK COROMANT, 2010). A Figura 10 representa a espessura máxima do cavaco junto aos fatores relacionados.

Figura 10 – Espessura máxima do cavaco.



Fonte: Sandvik Coromant, 2010.

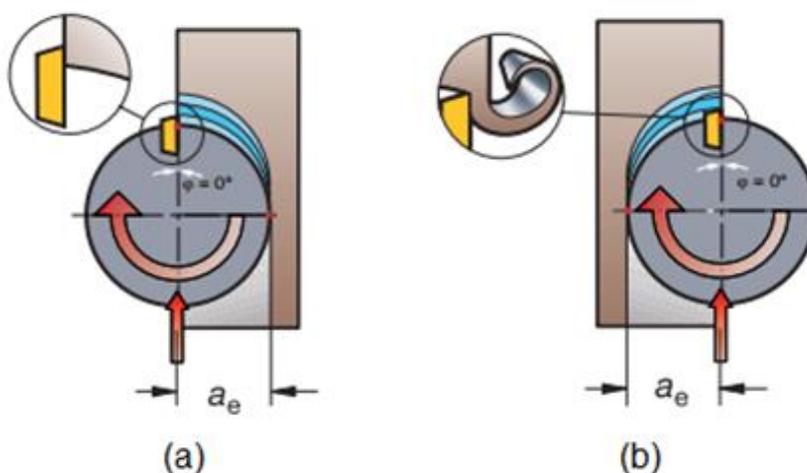
2.4 Posição da ferramenta no fresamento frontal

A formação de cavaco é um processo que ocorre durante a interação entre a ferramenta de corte e a peça. Os impactos mecânicos e térmicos gerados pela formação de cavaco exercem influência significativa sobre a vida da ferramenta. É notável que para velocidades de corte intermediárias, na casa dos 800m/min, os efeitos da taxa de deformação e temperatura de corte sobre a formação do cavaco atingem um valor de equilíbrio. Portanto, para estes valores de velocidade de corte, é esperado que se obtenha uma maior vida para a ferramenta (CUI; ZHAO; TIAN, 2012).

Conforme a Sandvik Coromant (2010) a formação inicial do cavaco se dá em três diferentes regiões, de acordo com a posição da fresa: na entrada do corte, no arco de contato e na saída de corte, como pode ser observado na Figura 11.

Na entrada, em que a aresta de corte está se movendo em direção à peça ocasionando em remoção de material, a ferramenta está sujeita a tensões de compressão. Apesar de produzir cavacos mais espessos, não é considerada uma região crítica. A saída da peça é a mais sensível das três áreas de corte. A saída refere-se a aresta de corte movendo-se para fora da peça. O cavaco espesso não encontra ponto de apoio no final do corte e acaba curvando-se. Essa curvatura gera forças de tração, levando a conseqüentes quebras da ferramenta.

Figura 11 – Representação da entrada (a) e saída (b) da ferramenta de corte.



Fonte: Sandvik Coromant, 2010 (adaptado).

Em suma, deve-se evitar cavacos espessos na saída da ferramenta. O posicionamento assimétrico entre a linha de centro da fresa e a peça é uma maneira para se obter cavacos mais espessos na entrada e menos espessos na saída. Ao mover a peça para longe do centro, obtém-se forças de corte mais constantes e em sentido favorável, minimizando a vibração.

2.5 Esforços na usinagem

O desgaste da superfície anterior do dente de corte no fresamento frontal tem influência significativa nas forças de corte, afetando a precisão da usinagem. Isso faz com que o estudo das forças que agem na aresta de corte e o conhecimento de seus comportamentos sejam de grande importância (GUZEEV; PIMENOV, 2011).

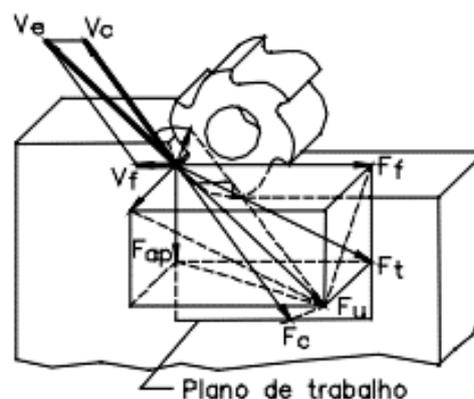
De posse das grandezas relacionadas à força de usinagem, a potência requerida para efetuar o corte pode também ser determinada. Isto facilita o projeto de máquinas-ferramenta e serve como indicativo da usinabilidade dos materiais, pois quanto maior a força empregada, mais difícil tende a ser a usinagem do material. Ela pode ser a responsável pela falha da ferramenta por deformação plástica, além de influenciar diretamente no desenvolvimento de outros mecanismos e processos de desgaste (SANTOS; SALES, 2004).

As forças de usinagem são consideradas como agentes em direção e sentido sobre a ferramenta de corte, e são as seguintes:

- Força de usinagem (f_u): é a força que atua sobre uma cunha cortante. As suas componentes são obtidas por meio da projeção sobre o plano de trabalho mediante decomposição ortogonal.
- Força ativa (f_t): é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho.
- Força de corte (f_c): é a força principal de corte, é a projeção da força de usinagem sobre a direção de corte.
- Força de avanço (f_f): é a projeção da força de usinagem sobre a direção de avanço.
- Força de apoio (f_{ap}): é a projeção da força de usinagem sobre a direção perpendicular à direção de avanço, situada no plano de trabalho.

A Figura 12 mostra as componentes da força de usinagem no processo de fresamento.

Figura 12 – Componentes da força de usinagem no fresamento



Fonte: Santos e Sales, 2004.

Onde:

f_{ap} = força de apoio.

f_f = força de avanço.

f_t = força ativa.

f_c = força de corte.

f_u = força de usinagem.

Segundo a notação vetorial, as componentes da força de usinagem podem ser representadas pela Equação 5 em (N):

$$\vec{F}_u = \vec{F}_c + \vec{F}_f + \vec{F}_p \quad (5)$$

Em que:

$F_p = \text{força passiva.}$

Apesar de não contribuir para a potência de usinagem, a força passiva é importante por ser responsável pela deflexão elástica da peça e da ferramenta durante o corte. Ela é definida como uma projeção da força de usinagem perpendicular ao plano de trabalho (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013), as potências de usinagem resultam dos produtos das componentes de força e velocidade. Elas variam constantemente, devido à alteração do número de dentes efetivos no corte e pela variação da espessura do cavaco. A potência de corte (N_c) e a potência de avanço (N_f) em CV, são dadas pelas Equações 6 e 7, respectivamente.

$$N_c = \frac{f_c * v_c}{60 * 75} \quad (6)$$

$$N_f = \frac{f_f * v_f}{1000 * 60 * 75} \quad (7)$$

A potência efetiva de corte é dada pela Equação 8.

$$N_e = N_c + N_f \quad (8)$$

Obtém-se a potência consumida na operação de usinagem diretamente da medição no motor elétrico da máquina operatriz. Um sensor de corrente elétrica pode ser instalado na fonte de alimentação do motor elétrico responsável pelo suprimento de potência do eixo principal da máquina. De posse desse valor calcula-se a potência efetiva (SANTOS; SALES, 2004).

2.6 Avarias e desgastes em ferramentas de corte

As ferramentas de corte se desgastam como resultado de elevadas cargas, atrito e altas temperaturas entre a aresta de corte da ferramenta e a peça de trabalho (GU et al., 1999). Para Machado et al. (2009) por mais que as ferramentas de corte apresentem elevadas dureza e resistência ao desgaste, e por menor que seja a resistência mecânica da peça de trabalho, elas apresentarão, mais cedo ou mais tarde, um processo de desgaste que ocasionará sua substituição. Em um processo de usinagem, existem duas causas principais que acarretarão a necessidade de substituição das ferramentas de corte: as avarias, que podem ser trincas, lascamentos ou quebras e o desgaste, que é a deformação excessiva.

Os desgastes e as avarias nas ferramentas podem ser considerados indicadores do fim de vida das mesmas. Quando ocorrem, alteram a qualidade

superficial do produto usinado e também podem comprometer as dimensões e geometrias requeridas. São fenômenos comuns e observáveis em qualquer tipo de ferramenta, no entanto são indesejáveis, mesmo sendo impossível trabalhar sem eles (LOPES, 2013).

A avaria é entendida como um fenômeno que ocorre de maneira repentina e inesperada. A quebra e o lascamento levam à destruição completa ou à perda de uma quantidade considerável de material da aresta de corte. É mais comum em ferramentas de baixa tenacidade e geralmente estão presentes com mais frequência em operações de corte intermitente, como o fresamento. Isto devido ao fato de ocorrer choques térmicos e mecânicos durante o processo (MACHADO et al., 2009).

O desgaste é a perda contínua e microscópica de partículas da ferramenta durante o corte. É observado tanto nos processos de corte contínuo quanto nos de corte interrompido.

A influência dos parâmetros de corte no desgaste das ferramentas durante o processo de fresamento tem sido muito estudada ao longo dos anos. Serdar et al. (2006) *apud* Muñoz-escalona, Díaz e Cassier (2011) demonstraram em seus estudos que um aumento no desgaste de flanco é percebido quando a velocidade de corte é incrementada. Além disso, Melo et al. (2006) consideram o desgaste inevitável e que a presença de trincas na aresta de corte é devida aos choques mecânicos e térmicos que a ferramenta é submetida durante o corte.

2.7 Avarias nas ferramentas de corte

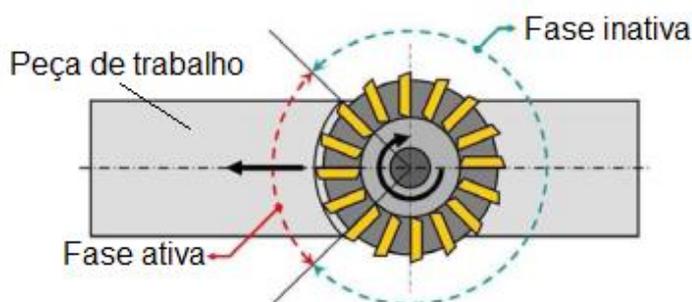
No fresamento, as ferramentas são frequentemente substituídas em função de apresentarem lascamento, trincamento ou até mesmo quebras. Em operações de corte intermitente o desenvolvimento do desgaste será uniforme, na superfície de folga ou saída da ferramenta, apenas se a ferramenta de corte apresentar alta tenacidade, suficiente para suportar os choques mecânicos e térmicos inerentes ao processo. Durante o corte interrompido uma aresta de corte pode sofrer avarias na entrada, no meio ou na saída do corte, durante o ciclo da ferramenta (SANTOS; SALES, 2004). Para Machado et al. (2009) uma aresta de corte pode sofrer avarias de origem mecânica, devido aos choques originados na entrada ou saída de corte e avarias de origem térmica, em que o choque é causado pela flutuação da temperatura durante a revolução da ferramenta.

2.7.1 Trincas de origem térmica

Durante a usinagem é desenvolvida uma grande quantidade de calor que é dissipada pela ferramenta de corte. O crescimento da taxa de desgaste das ferramentas está intimamente ligado ao aumento da temperatura na interface ferramenta-peça, sendo que altas temperaturas tendem a evidenciar os problemas, reduzindo a resistência mecânica das ferramentas (RODRIGUES et al., 2015).

As temperaturas flutuam ciclicamente, aumentando durante a fase ativa e diminuindo durante o tempo inativo. A Figura 13 ilustra os ciclos térmicos que a ferramenta está submetida durante os períodos ativo e inativo, sendo que a região da ferramenta em que a temperatura é mais alta é a que está em contato com o cavaco (FERRARESI, 1977).

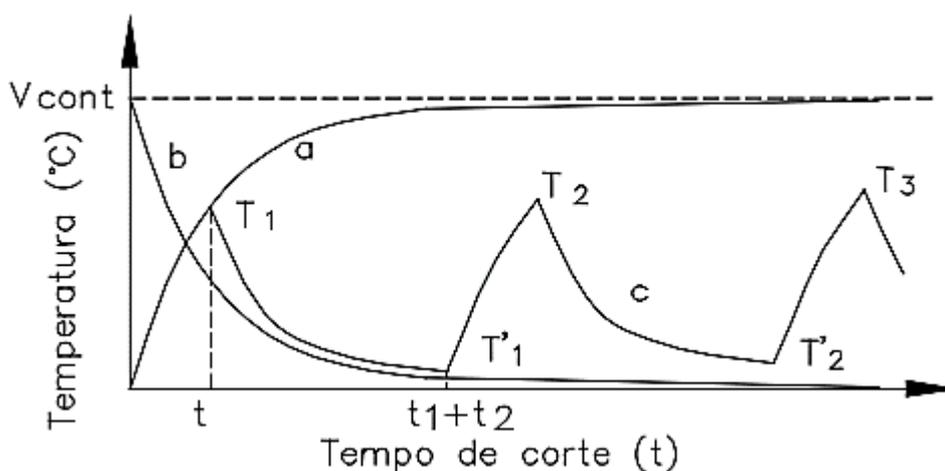
Figura 13 – Variação cíclica da temperatura de corte durante os períodos ativo e inativo.



Fonte: Palmari, 1987 (adaptado).

A variação cíclica da temperatura é mostrada na Figura 14. A curva *a* da figura representa o aquecimento da aresta de corte em um processo contínuo, em que a temperatura tende a se estabilizar em um valor constante, a não ser que os efeitos do desgaste comecem a interferir no processo. A curva *b* representa o resfriamento contínuo da aresta, desde o valor constante de temperatura atingido durante o corte até a temperatura ambiente. A curva *c* representa o corte interrompido em que existe um tempo ativo t_1 , em que a aresta de corte se aquece até a temperatura T_1 . Nesse momento inicia-se o tempo inativo t_2 , em que a aresta começa a se resfriar até atingir a temperatura T'_1 , ao final do tempo $t_1 + t_2$.

Figura 14 – Curva de variação de temperatura no corte interrompido.

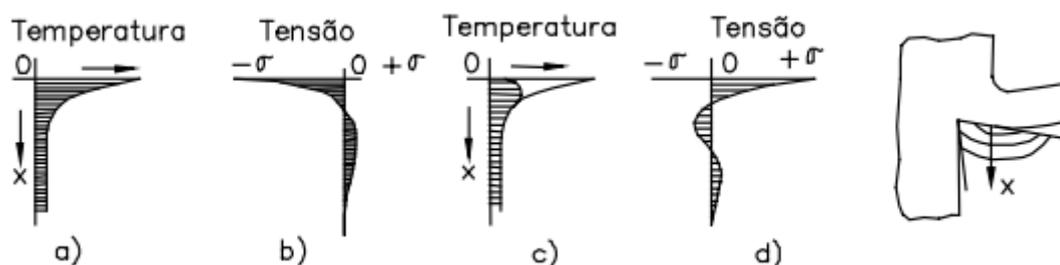


Fonte: Palmari, 1987.

Esta distribuição de temperatura depende das condições de corte (velocidade de corte, avanço e relação entre o tempo ativo e inativo do ciclo), do material da ferramenta de corte e do material da peça. A flutuação cíclica da temperatura também leva a uma modificação, também cíclica, da distribuição de tensão na região de corte da ferramenta, na interface cavaco-ferramenta, o que pode provocar a formação de trincas de origem térmica (MACHADO et al., 2009). Variações na temperatura causam variações de tensão na superfície da ferramenta e isto é um fator determinante para o surgimento de trincas.

A Figura 15 (a) mostra a curva de distribuição de temperatura em relação à profundidade “x”, a partir do ponto de contato cavaco-ferramenta. Ferraresi (1977) descreve o que ocorre da seguinte maneira: a camada superficial, a uma temperatura mais alta se dilata. Entretanto, as camadas subsequentes em temperaturas inferiores, terão uma dilatação bem menor. Tais camadas impedirão o processamento de uma dilatação muito maior na camada de contato cavaco-ferramenta, gerando tensões de compressão, observados na Figura 15 (b). Em consequência, haverá tensões de tração a uma certa distância da superfície de contato e, num instante de tempo seguinte, com a variação da temperatura de corte (resfriamento devido ao tempo inativo) essa camada estará submetida a tração, enquanto que as camadas inferiores serão submetidas a compressão como vistos na Figura 15 (c) e (d). Estas variações de tensão repetem-se a cada ciclo da ferramenta, o que leva ao aparecimento de trincas nas camadas superficiais da ferramenta de corte.

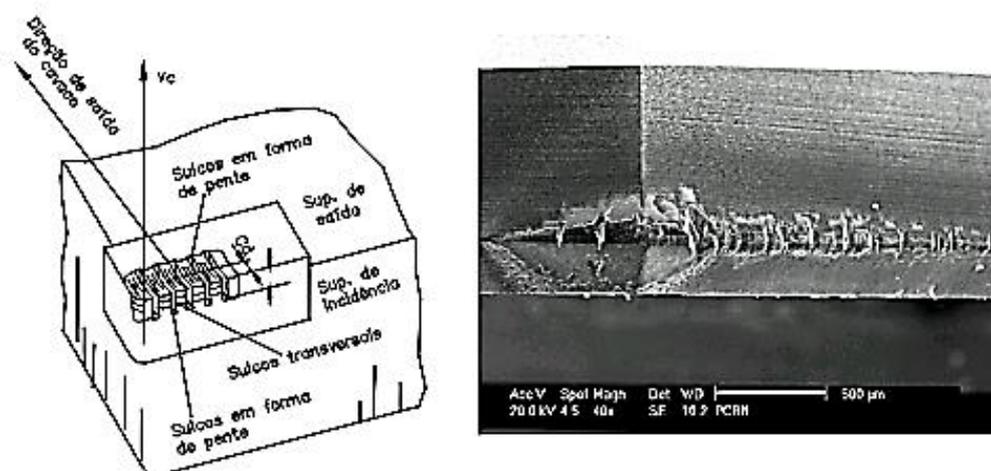
Figura 15 – Distribuição da temperatura e de tensões nas ferramentas de corte.



Fonte: Ferraresi, 1977.

Estas trincas, que são de origem térmica, vão se acumulando e originam sulcos conhecidos como sulcos em forma de pente, os *combracks*. A formação dos sulcos acontece em duas etapas distintas. A primeira compreende o período de início da trinca e a segunda o período de transformação da trinca em sulco. Quanto maior a variação de temperatura causada pela continuação dos ciclos de corte, maior o número de sulcos. Veja na Figura 16 uma representação dos sulcos.

Figura 16 – Sulcos em forma de pente



Fonte: Santos e Sales, 2004.

Melo et al. (2006) indicam que trincas térmicas possuem origem no ponto em que a temperatura é mais alta, na interface cavaco-ferramenta (aproximadamente 0,1 a 0,3mm da aresta de corte).

Além de evoluírem para sulcos, as trincas térmicas podem interagir com trincas de origem mecânica. As trincas térmicas ocorrem perpendicularmente à aresta de

cutting and can, occasionally, find cracks of mechanical origin that are parallel to the cutting edge, which can lead to tool chipping, reducing its useful life. For this, Wang et al. (1996) consider that the process that leads to tool failure occurs in four stages: the period of formation of grooves in the form of a wedge, the period of formation of cracks transverse to these (which can be of mechanical origin), the period in which they meet and, finally, the fracture of the tool.

Many studies have been carried out regarding the origin of thermal cracks and the conclusions indicate that they become the main cause of tool failures during cutting at high speeds. For low cutting speeds, mechanical cracks are the main responsible for tool failures (MACHADO et al., 2009).

2.7.2 Trincas de origem mecânica

In milling, in each cycle of the mill, the cutting tool experiences a violent impact at the start of the cut. The sudden change from zero load to a high compressive load during the cutting period, makes the cutting edge subject to a repetitive loading at each entry into the workpiece, which can lead to the appearance of cracks due to fatigue.

Normally, mechanical cracks occur parallel to the cutting edge, both on the exit surface and on the clearance surface of the tool and can interact with other cracks, such as thermal cracks. This can lead to tool chipping (MACHADO et al., 2009). In Figure 17, the chipping of a cutting tool is observed, which is characterized by the loss of material from the tool.

Figura 17 – Lascamento da ferramenta de corte



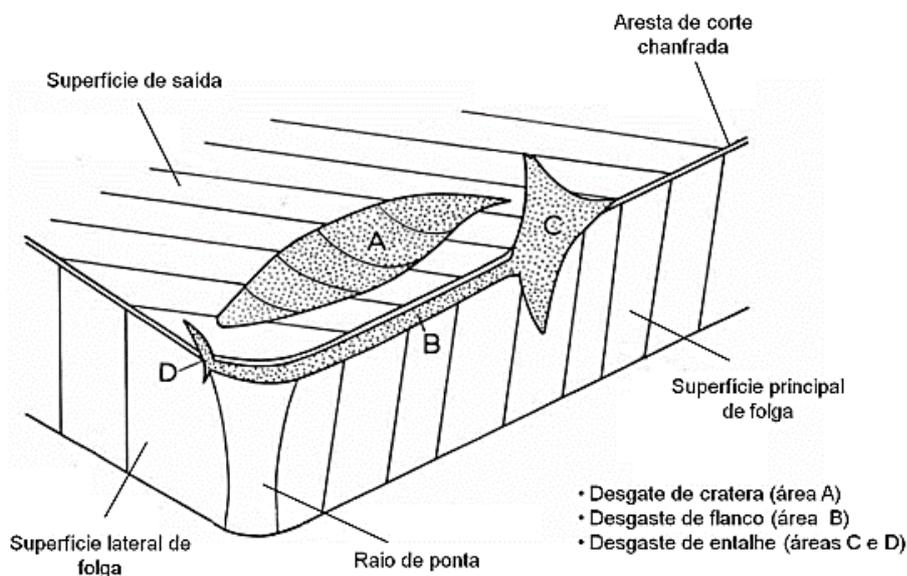
Fonte: Sandvik Coromant, 2010 (adaptado).

Os problemas de choques mecânicos na entrada ainda podem ser agravados pela tendência de adesão do cavaco à superfície de saída (KAPALDIN, 1980, *apud* MACHADO et al., 2009). E quanto maior o carregamento, mais rápido a avaria ocorrerá. Fatores como grandes profundidades de corte, altos avanços, alta resistência da peça de trabalho, acabam acelerando o processo de fadiga e de avaria da ferramenta de corte.

2.8 Desgastes nas ferramentas de corte

A forma e a geometria da ferramenta de corte são continuamente transformadas, de acordo com sua utilização na usinagem e consequente desgaste. O desgaste é progressivo e apresenta-se tanto na superfície de folga como na superfície de saída da ferramenta. Na Figura 18, observam-se as três principais formas e áreas de desgaste: na região A, o desgaste de cratera, na região B, o desgaste de flanco e, nas regiões C e D o desgaste de entalhe.

Figura 18 – Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte



Fonte: Trent e Dearnley, 1982 (adaptado).

2.8.1 Desgaste de cratera ou craterização

O desgaste de cratera ou craterização é um tipo comum de desgaste que ocorre na superfície de saída da ferramenta. É muito comum quando se fresam materiais dúcteis, como o aço e suas ligas. A sua ocorrência é devida à reação química entre o

material da peça e a ferramenta de corte, geralmente associada às elevadas temperaturas geradas na interface cavaco-ferramenta. Segundo Bjurka (2011), também pode aparecer devido ao cavaco gerar um desgaste abrasivo na superfície da ferramenta durante o seu deslizamento pela mesma.

Geralmente, as crateras aparecem na parte da superfície onde as temperaturas mais altas estão localizadas, mas sua posição relativa à aresta de corte varia de acordo com o material usinado, sendo mais frequentemente vista atrás da aresta. A sua profundidade máxima ocorre próxima ao ponto médio do comprimento de contato entre o cavaco e a superfície de saída (SANTOS; SALES, 2004).

A craterização excessiva, relacionada ao aumento da velocidade de corte e ao avanço empregados no fresamento, enfraquece a aresta de corte e gera a quebra da ferramenta. Esse tipo de desgaste pode ser visto na Figura 19, em que também é possível ver o critério KT para a medição da profundidade da cratera na ferramenta.

Figura 19 – Desgaste de cratera ou craterização.



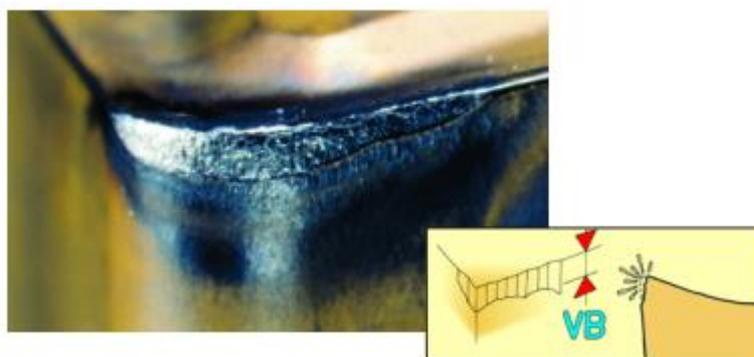
Fonte: Sandvik Coromant, 2010.

2.8.2 Desgaste de flanco

O desgaste de flanco é o tipo mais comum de desgaste de ferramentas. Para Silva (2015) é o desgaste natural, que pode provocar o lascamento da aresta e abreviar a vida da aresta de corte. Dessa forma, é o principal fator a se considerar ao limitar a vida da ferramenta. Ocorre na superfície de folga devido à abrasão causada pelo contato entre a ferramenta e a peça. A perda do ângulo de folga durante o desgaste de flanco ocasiona uma aumento na área de contato entre a superfície de folga e o material da peça, aumentando o atrito nesta área. Este tipo de desgaste é motivado pelo aumento na velocidade de corte (SANTOS; SALES, 2004).

Apesar do desgaste ser um problema para as ferramentas nos processos de usinagem, o desgaste de flanco é o menos danoso, e chega a ser o preferido, pois oferece uma vida útil da ferramenta previsível e estável (SANDVIK COROMANT, 2010). A Figura 20 representa este tipo de desgaste e mostra o parâmetro VB , utilizado para se caracterizar o desgaste de flanco. Este parâmetro, assim como o critério KT , serão definidos posteriormente, na parte que trata da caracterização do desgaste de ferramentas de corte.

Figura 20 – Desgaste de flanco



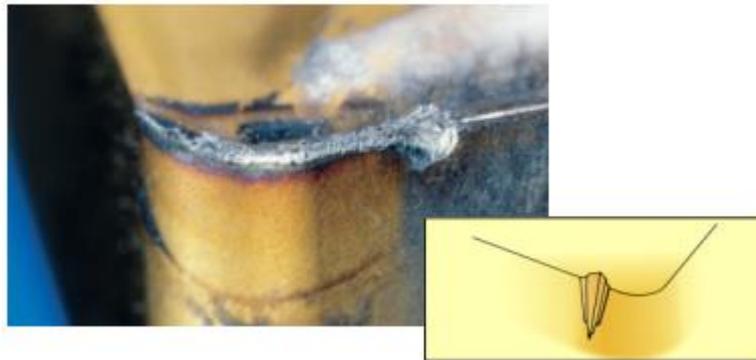
Fonte: Sandvik Coromant, 2010.

2.8.3 Desgaste de entalhe

O desgaste de entalhe é causado pela adesão ou solda por pressão de cavacos e uma deformação na superfície endurecida, caracterizado por dano excessivo localizado na face de saída e no flanco da ferramenta de corte, na linha da profundidade de corte (SANDVIK COROMANT, 2010).

Bjurka (2011) frisa que o desgaste de entalhe sempre ocorre na profundidade de corte máxima e que ferramentas de corte estão mais susceptíveis a este tipo de desgaste ao fresar materiais mais resistentes. Materiais mais resistentes a altas temperaturas e com elevado grau de encruamento são os tipos de materiais que causam este tipo de dano nas ferramentas de corte. Na Figura 21, observa-se o desgaste de entalhe.

Figura 21 – Desgaste de entalhe



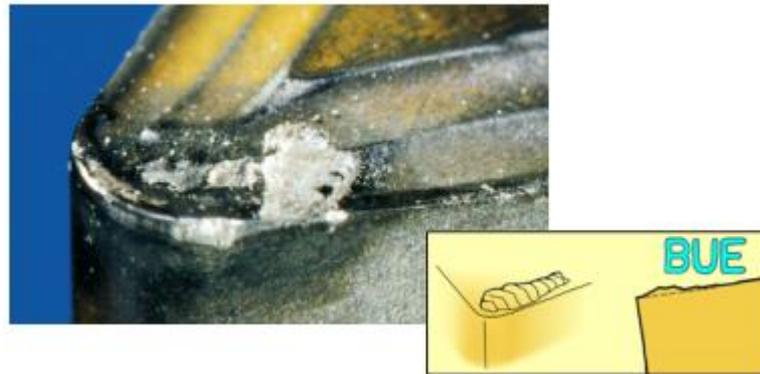
Fonte: Sandvik Coromant, 2010.

2.9 Mecanismos de desgaste

Em condições normais de corte, todas as formas de desgaste apresentadas anteriormente estarão presentes, entretanto uma delas irá prevalecer. Elas ocorrem devido aos vários mecanismos de desgaste que podem estar presentes durante o corte do material, entre eles o desgaste adesivo, o desgaste abrasivo, o desgaste difusivo e a oxidação. A seguir uma descrição de cada um dos mecanismos de desgaste citados:

- Desgaste adesivo: esse mecanismo de desgaste ocorre principalmente em baixas temperaturas e baixas velocidades de corte, onde o fluxo de material sobre a superfície de saída torna-se irregular. Nestas condições, fragmentos são arrancados da superfície da ferramenta e arrastados junto ao fluxo de material. Frequentemente, leva ao aparecimento da aresta postiça de corte (APC), observada na Figura 22, que é um fenômeno causado por solda por pressão do cavaco na ferramenta (GU et al., 1999). Segundo Silva (2015), a formação da APC, ou em inglês *build up edge* (BUE), é mais comum na usinagem de materiais dúcteis, devido às suas baixas durezas e elevada plasticidade.

Figura 22 – Aresta postiça de corte – ou em inglês *BUE* (*build up edge*).



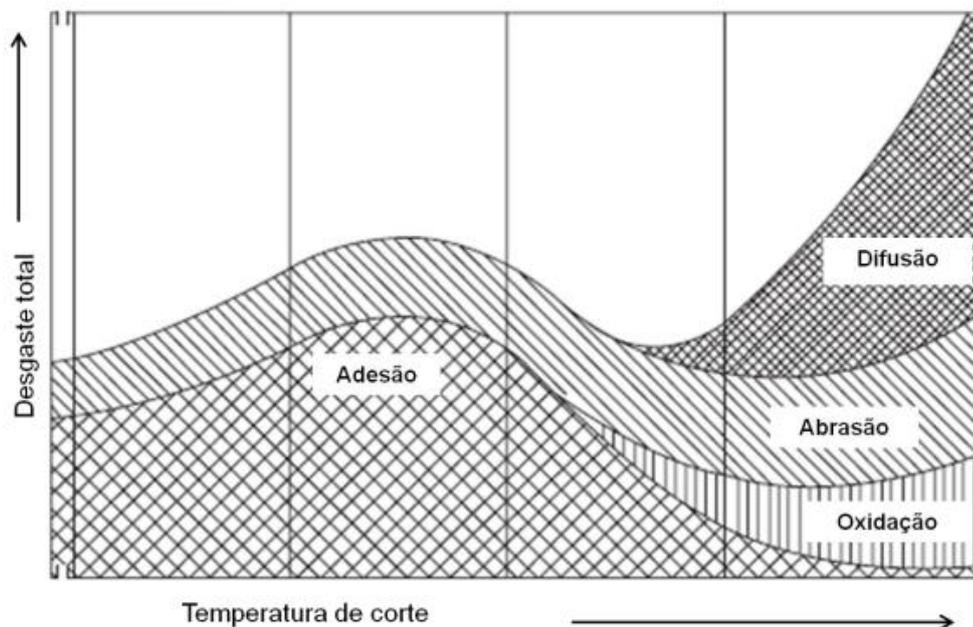
Fonte: Sandvik Coromant, 2010.

- Desgaste abrasivo: é causado principalmente por deslizamento de partículas duras da peça de trabalho contra a ferramenta de corte. A habilidade da ferramenta em resistir a este tipo de desgaste está relacionada à sua dureza. (GU et al., 1999).
- Degaste difusivo: é proporcionado por fatores químicos durante a usinagem e envolve a transferência de átomos de um material para outro, sendo fortemente dependente da temperatura, do tempo e da solubilidade dos elementos envolvidos na zona de fluxo (MACHADO et al., 2009). A existência dessa zona de aderência (ou zona de fluxo) é o que faz com que este mecanismo não seja desprezível, visto que as altas velocidades relativas entre a ferramenta de corte e a peça reduz o tempo de contato entre eles.
- Oxidação: representa um dos mecanismos de desgaste por reação química, que ocorre quando o material da ferramenta ou da peça usinada reagem com o oxigênio atmosférico. É mais comumente observado em regiões onde o contato entre a peça e a ferramenta é exposto, descolorindo o material da ferramenta na zona atingida. Pode ser observado como um severo desgaste de entalhe, sendo que algumas vezes os fragmentos gerados pela oxidação resultam também no desgaste abrasivo (BUSTAMANTE, 2017, *apud* STEPHENSON e AGAPIOU, 2006).

A Figura 23 apresenta um diagrama clássico com estes mecanismos de desgaste em função da temperatura. Note que em baixas temperaturas apenas os mecanismos de adesão e abrasão estão presentes, sendo que a adesão é predominante. Em temperaturas elevadas a adesão dá lugar aos outros mecanismos.

Também é notável o aumento do desgaste total com o aumento da temperatura de corte.

Figura 23 – Mecanismos de desgaste em função da temperatura de corte.



Fonte: Vieregge, 1970, *apud* Machado et al., 2009 (adaptado).

Tais mecanismos foram apresentados no gráfico anterior em função da temperatura de corte, entretanto poderiam ser também representados em função de qualquer parâmetro que a influencie, principalmente a velocidade de corte. Muñoz-escalona, Díaz e Cassier (2011) concluíram que para certas faixas de velocidade de corte, predomina o aparecimento de diferentes tipos de mecanismo de desgaste, durante o fresamento frontal do aço AISI 1045:

- Desgaste abrasivo → 250m/min.
- Desgaste adesivo → 650m/min.
- Desgaste difusivo → 850m/min.

Os mecanismos de desgaste de abrasão, adesão e difusão atuam tanto isoladamente quanto em conjunto, promovendo o desgaste por deformação plástica e por cisalhamento, por altas tensões de compressão ou entalhe (SILVA, 2015).

2.10 Caracterização do desgaste em ferramentas de corte

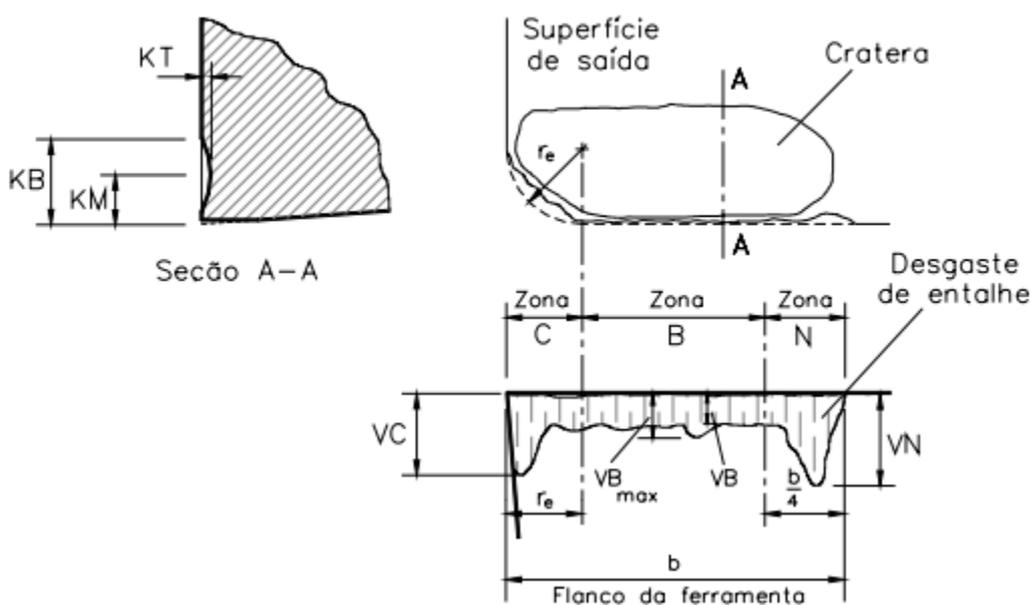
O desgaste da ferramenta é um processo gradual. Para realizar a medição do desgaste, existem duas regiões fundamentais que podem ser utilizadas: a superfície principal de folga e a superfície de saída (ARAKHOV, 2008, *apud* LOPES, 2013).

A norma ISO-3685 (1977) utiliza os parâmetros KT , VB_B e $VB_{BMÁX}$ para quantificar o desgaste nas ferramentas. Para a medição do desgaste, a aresta principal de corte é dividida em três regiões: C, B e N, conforme a Figura 24. Pela norma, é recomendado a manutenção ou troca da ferramenta quando o nível de desgaste atinge certos valores, conforme itens a seguir:

- Desgaste de flanco médio, $VB_B = 0,3mm$.
- Desgaste de flanco máximo, $VB_{BMÁX} = 0,6mm$.
- Profundidade de cratera, $KT = 0,06 + 0,3 * f$, em que f é o avanço por revolução em mm/rev .
- Falha catastrófica.

Ainda leva-se em consideração o valor dos desgastes gerados na superfície de folga pelos entalhes VN e VC . Na superfície de saída mede-se os desgastes: profundidade de cratera KT , largura da cratera KB e distância do centro da cratera à aresta de corte KM .

Figura 24 – Parâmetros para caracterizar o desgaste em ferramentas.



Fonte: Trent e Wright, 1999, *apud* Santos e Sales, 2004.

2.11 Evolução do desgaste e curva de vida das ferramentas

O tempo em que uma ferramenta de corte trabalha normalmente, sem perder a geometria de sua aresta, sem precisar ser afiada ou substituída é denominado de vida da ferramenta de corte. Segundo Ferraresi (1977) vida da ferramenta é “o tempo em que a mesma trabalha efetivamente, sem perder o corte ou até que se atinja um critério de fim de vida previamente estabelecido”. O tempo de vida da ferramenta (T) em função da velocidade de corte (v_c) é dada pela Equação 9 a seguir:

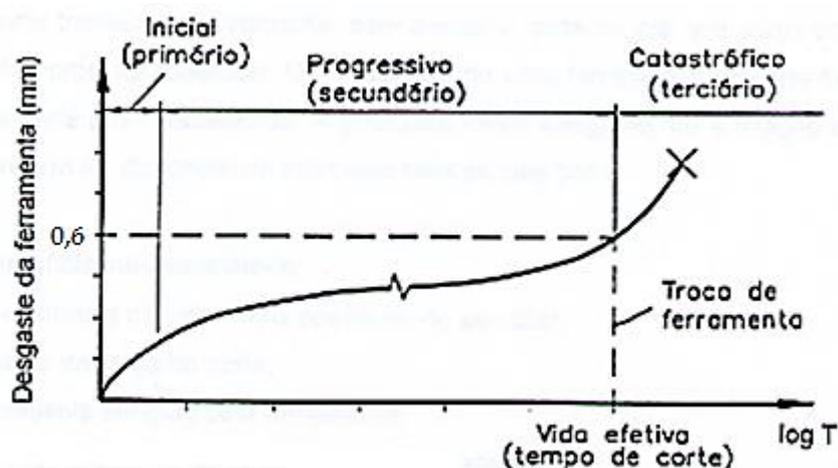
$$T = K * v_c^{-x} \quad (9)$$

Em que:

K e x = coeficientes particulares para cada par ferramenta – peça.

O desgaste de uma ferramenta pode ser acompanhado à medida que o tempo de corte avança, em que pode se distinguir três estágios, conforme a Figura 25. A faixa inicial ou primária corresponde ao desgaste acentuado da ferramenta em função da desagregação das camadas de revestimento e acomodação das faces de contato entre a peça e a ferramenta. A faixa progressiva corresponde ao estado estacionário do desgaste, sendo caracterizada pela operação normal da ferramenta durante o trabalho. A faixa catastrófica corresponde ao desgaste acelerado, em que ocorre a concentração dos maiores esforços de corte, elevadas temperaturas e vibrações (LOPES, 2013). Essa última etapa, que se inicia quando a ferramenta atinge valores de desgaste de flanco máximo de 0,6mm, caracteriza a necessidade de substituir a ferramenta.

Figura 25 – Curva de evolução do desgaste de ferramentas.



Fonte: Smith, 1989, *apud* Santos e Sales, 2004.

A velocidade de corte é o parâmetro que mais influencia o desgaste da ferramenta durante a usinagem. Ela é diretamente responsável pelo aumento da temperatura na região de formação de cavacos, sendo responsável direta por ativar ou acelerar os mecanismos de desgaste (MACHADO, et al., 2009). A curva de vida da ferramenta de corte é expressa em função da velocidade de corte e fornece o tempo em que a ferramenta poderá trabalhar até que se atinja o nível de desgaste estabelecido previamente.

A longevidade das ferramentas de corte pode ser expressa por meio do número de peças produzidas ou pelo percurso efetivo de corte. Sales e Santos (2007) *apud* Silva (2015) listam os principais fatores que influenciam o desgaste de uma ferramenta:

- Iminência de quebra da aresta cortante.
- Elevadas temperaturas na interface cavaco-ferramenta.
- Tolerâncias dimensionais.
- Acabamento superficial.
- Aumento das dimensões das rebarbas.
- Elevação das forças de usinagem.
- Nível de ruído maior.
- Crescente nível de vibrações.

2.12 Vibrações mecânicas

Vibrações são fenômenos inerentes ao processo de fresamento e podem causar diversos inconvenientes como desgaste prematuro das ferramentas de corte, desgaste excessivo, acabamento insatisfatório da peça e alto consumo de energia durante o processo (CHENG, 2009).

A análise de vibrações é extremamente necessária em projetos de engenharia, como máquinas, automóveis e aeronaves. Um nível de vibração excessivo em sistemas mecânicos pode comprometer e diminuir a vida útil do equipamento (SILVA, 2009).

De acordo com Cheng (2009), as vibrações podem ser classificadas em três maneiras, como vibrações livres, vibrações forçadas ou vibrações autoexcitadas.

As vibrações livres têm como ocorrência apenas uma força inicial ou um choque e cessam com tempo. Não são prejudiciais ao processo, pois as máquinas-ferramentas são construídas com elevada rigidez não permitindo a ocorrência da vibração por longos períodos (CHENG, 2009).

Segundo Stephenson e Agapiou (2006), as vibrações forçadas ocorrem quando uma excitação dinâmica é aplicada. São geralmente oriundas de três fontes:

- 1) Forças alternadas, induzidas por diferenças na dureza da peça, formação de arestas postiças de corte, etc.
- 2) Fontes internas de vibração como desgaste e folgas em elementos de transmissão.
- 3) Fontes externas de vibração transmitidas pelas fundações da máquina.

O último tipo são as vibrações autoexcitadas, que representam trepidações que surgem no processo quando duas ou mais vibrações forçadas entram em fase, aumentando a amplitude das forças envolvidas no fresamento. Este tipo é o menos desejado, pois torna o processo de fresamento instável.

Segundo a Sandvik Coromant (2018), são quatro os fatores que influenciam a vibração mecânica durante o fresamento:

- Ângulo de posição/ataque e forças de corte: o ângulo de posição determina a direção das forças de corte, quanto maior o ângulo, maior a estabilidade do sistema, visto que as forças radiais ficam orientadas na direção de avanço, permitindo a usinagem com menor vibração.
- Diâmetro da fresa em relação à profundidade de corte: menor diâmetro da fresa requer menor valor para a potência de corte, e menor valor para o torque, diminuindo a vibração.
- Passo da fresa: quanto mais ferramentas estão em contato com a peça, maior o risco de vibrações.
- Geometria das ferramentas.

3 METODOLOGIA

O capítulo 3 está dividido em cinco partes com o intuito de descrever o trabalho de maneira geral, apresentar os materiais, os equipamentos e as ferramentas utilizados na pesquisa e o procedimento experimental que foi seguido.

3.1 Descrição do trabalho

O trabalho experimental foi desenvolvido por meio da coleta e análise de dados em processos de fresamento de barras de aço, realizados em um centro de usinagem situado no Laboratório de Usinagem da PUC Minas. As análises de microscopia ótica e de varredura foram realizadas no Laboratório de Microscopia Ótica e no Laboratório de Microscopia Avançada da mesma instituição.

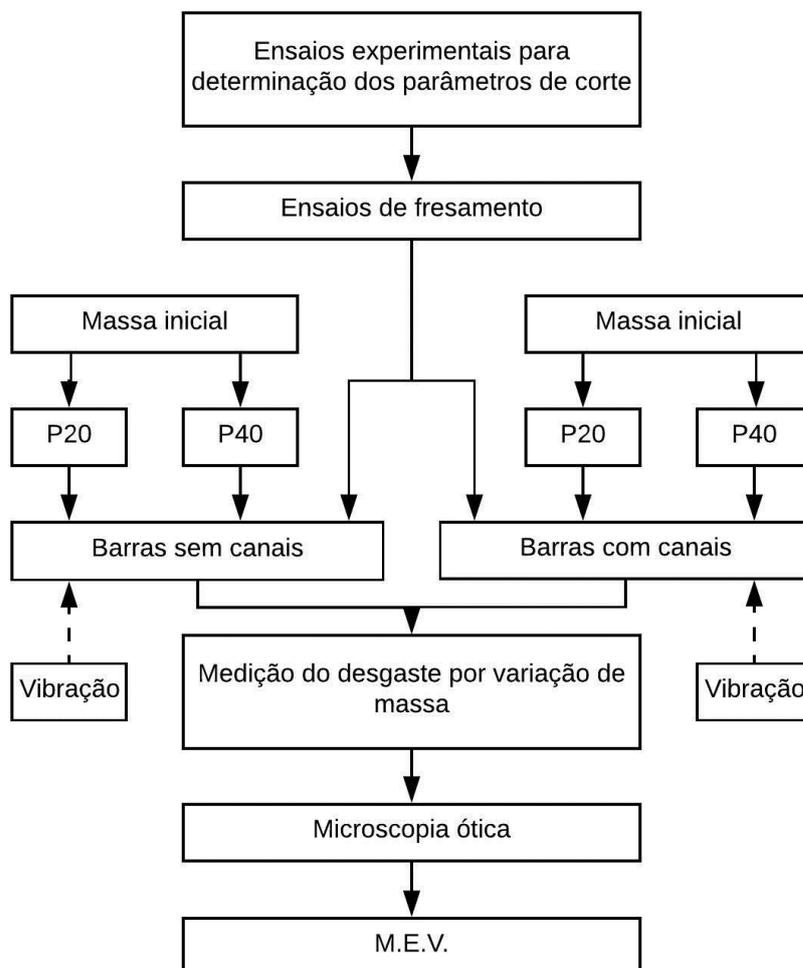
O trabalho tem o propósito de analisar o desgaste de ferramentas de corte durante o fresamento de peças com diferentes geometrias. Para isto, foram utilizadas ferramentas de metal duro para a realização de fresamento frontal em barras de aço. Elas foram montadas em uma fresa e instaladas no centro de usinagem, sendo que os parâmetros de corte foram definidos e mantidos constantes durante todo o processo com o intuito de averiguar somente a influência da geometria das peças de trabalho.

Os ensaios de fresamento foram alternados com baterias de medição de massa das ferramentas e análises em microscopia ótica. Após um determinado número de passes da fresa sobre a peça, as ferramentas foram retiradas, pesadas e tiveram suas arestas analisadas. Após a análise no microscópio, foram novamente instaladas no porta ferramentas e iniciou-se um novo ciclo para os ensaios.

Paralelamente à realização dos ensaios de fresamento, foram monitorados os sinais de vibração nos eixos X, Y e Z do sistema. Foram instalados acelerômetros tanto nas peças usinadas quanto no eixo de rotação da fresa. Com o objetivo de ratificar a influência da geometria das peças na evolução do desgaste das ferramentas de corte, os sinais obtidos foram tratados em software e analisados juntamente com os resultados para o desgaste.

Por fim, após a execução de todos os passes previamente planejados, as ferramentas de corte foram observadas no microscópio eletrônico de varredura para a visualização e caracterização dos mecanismos de desgaste e avarias. Na Figura 26 observa-se o fluxograma resumindo a sequência de procedimentos que foram seguidos.

Figura 26 – Fluxograma da pesquisa.



Fonte: Próprio autor.

3.2 Materiais

O material utilizado na pesquisa foi o aço SAE 1045 laminado e cortado nas dimensões requeridas. Ao todo, foram utilizadas quatro barras de aço quadradas 100x100mm sendo duas com 300mm e outras duas com 350mm de comprimento. Para diferenciar a geometria das barras foram usinados dois canais com 25mm de largura cada nas barras maiores, garantindo que ambas possuíssem o mesmo comprimento efetivo de corte, ou seja, 300mm. Na Figura 27 pode-se observar os corpos de prova antes da usinagem dos canais. A composição química do material declarada pelo fornecedor está de acordo com a Tabela 1.

Figura 27 – Corpos de prova antes da usinagem dos canais.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 1 – Composição química em porcentagem de peso do aço SAE 1045 utilizado.

Elemento	Al	C	Cr	Cu	Mn
% em peso	0,036	0,46	0,01	0,01	0,64
Elemento	N	Ni	P	S	Si
% em peso	0,012	0,01	0,016	0,005	0,15

Fonte: Próprio autor, de acordo com dados da AçoLíver Comércio de Ferro e Aço LTDA.

3.2.1 Preparação dos corpos de prova de 350mm

A usinagem dos canais nas barras de 350mm foi realizada no Laboratório de Usinagem localizado no Campus II do CEFET/MG. Foram utilizadas uma fresadora FVF 3000 e uma fresa de metal duro Dormer com 25mm de diâmetro e quatro cortes, observadas na Figura 28.

Figura 28 – Máquina ferramenta FVF 3000 (a); Fresa de metal duro Dormer (b).



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor.

O tipo do fresamento realizado na abertura dos canais foi o frontal. Os parâmetros de corte utilizados neste procedimento foram determinados experimentalmente. Foi ajustada uma rotação de 2000rpm no equipamento e com auxílio das equações previamente mostradas no Capítulo 2, foi possível estabelecer os demais parâmetros de corte. Concluiu-se que, para este valor da rotação, o valor

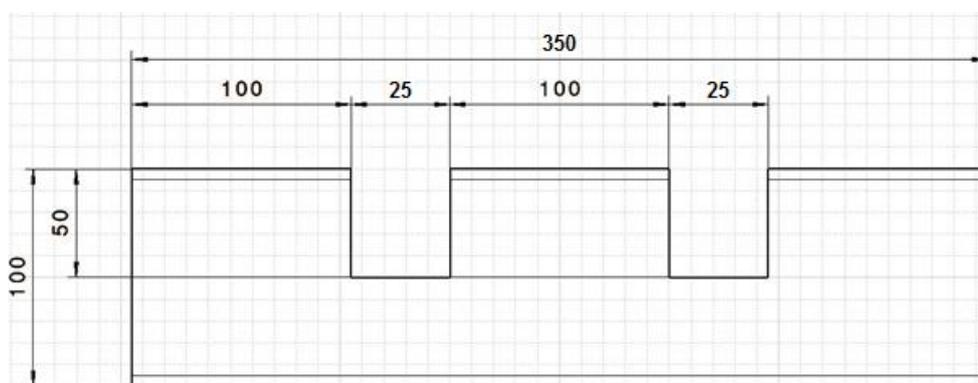
para velocidade de corte está dentro da faixa recomendada pelo fabricante da fresa.

Em resumo, os principais parâmetros de corte são:

- Velocidade de corte: 157m/min
- Profundidade de corte: 2,00mm
- Rotação: 2000rpm.

As dimensões das barras com canais e o corpo de prova após a realização do fresamento podem ser vistos na Figura 29.

Figura 29 – Dimensões do corpo de prova com canais (a); Corpo de prova após a abertura dos canais (b).



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor.

3.2.2 Medição de dureza nos corpos de prova

Com o objetivo de caracterizar os corpos de prova e assim determinar a velocidade corte para os ensaios, foram realizadas medições de dureza Brinell em suas superfícies. Com os valores mensurados por meio de micrômetro foi calculada a média da dureza para cada amostra e a média geral para os corpos de prova. Foram tomados os valores de dureza em 5 pontos ao longo da face correspondente ao comprimento de corte dos corpos de prova. O equipamento utilizado para a realização do ensaio pode ser visto na Figura 30.

Figura 30 – Ensaio de dureza Brinell



Fonte: Próprio autor.

3.3 Máquinas e equipamentos

Os ensaios de fresamento frontal foram realizados utilizando-se um Centro de Usinagem Discovery 560 – ROMI, controlado por software de CNC (Comando Numérico Computadorizado) da Siemens, que foi programado para realizar automaticamente os movimentos durante o fresamento, tornando possível a realização dos ensaios de maneira mais precisa e eficaz. Na Figura 31 observa-se o

centro de usinagem utilizado na realização dos experimentos e o painel de controle do equipamento.

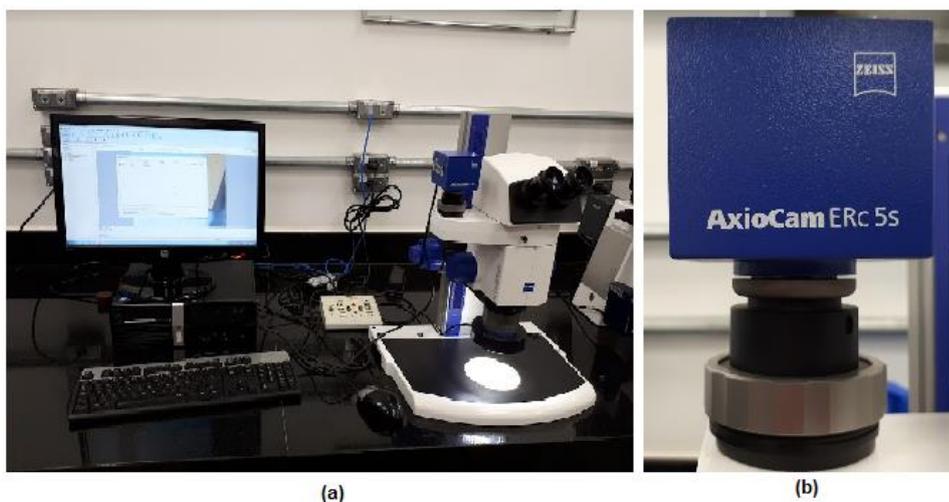
Figura 31 – (a) Centro de Usinagem Discovery 560 – ROMI; (b) Painel de controle Siemens.



Fonte: Próprio autor.

Para acompanhamento do desgaste e avarias das ferramentas utilizou-se um microscópio ótico modelo Zeiss SteREO Discovery.V8 com uma lente objetiva com ampliação de 4x e lente ocular de 10x gerando-se uma ampliação de 40x. Acoplada a lente ocular foi utilizada uma câmera Zeiss AxioCam ERc 5s de 5.0 Megapixel. O software para tratamento das imagens foi o Zeiss AxioVision. Estes equipamentos são mostrados na Figura 32.

Figura 32 – (a) Montagem do microscópio Zeiss Discovery.V8; (b) Câmera Zeiss ERc 5s.



Fonte: Próprio autor.

Para análise qualitativa do aspecto final das ferramentas de corte, bem como formas dos desgastes e mecanismos presentes, utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo JEOL JSM-IT300, com ampliações de 50x e 120x e aceleração de voltagem de 30kV. Este equipamento é o observado na Figura 33.

Figura 33 – Montagem do microscópio eletrônico de varredura JSM-IT300.



Fonte: Próprio autor.

Para medição da massa das ferramentas de corte após cada ciclo de fresamento foi utilizada uma balança analítica OHAUS AR2140 com resolução de 0,1mg, conforme mostrada na Figura 34.

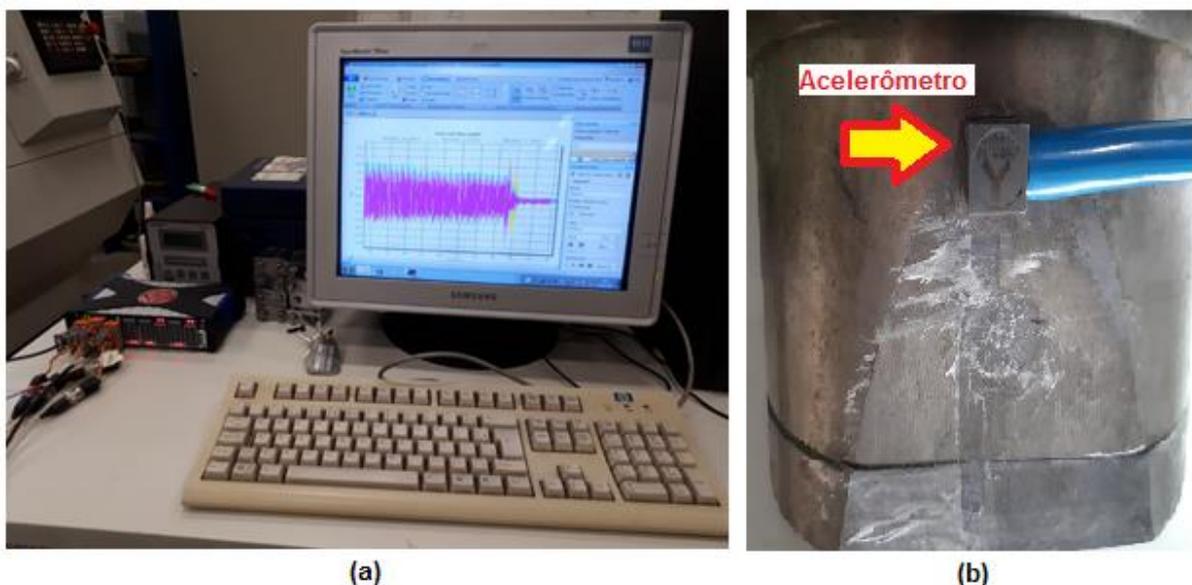
Figura 34 – Balança analítica OHAUS AR2140.



Fonte: Próprio autor.

Para o monitoramento dos sinais de vibração mecânica do sistema, foram utilizados dois acelerômetros de três eixos, um amplificador de sinais QuantumX MX1601B e o software de tratamento de dados HBM catman AP 3.1. Esses equipamentos podem ser observados na Figura 35.

Figura 35 – (a) Equipamentos para monitoramento dos sinais de vibrações mecânicas; (b) Acelerômetro de 3 eixos instalado no eixo de rotação da fresa.

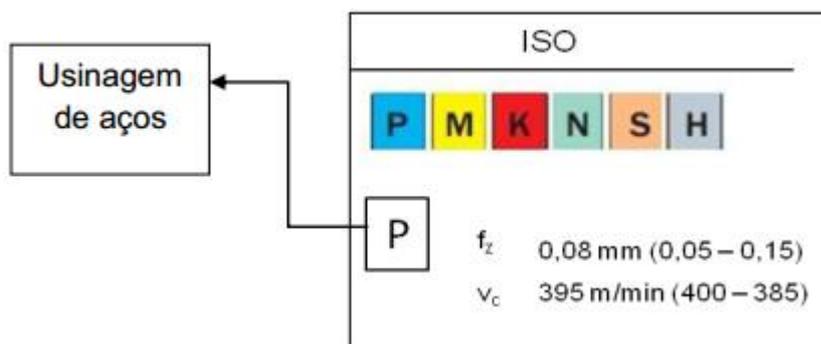


Fonte: Próprio autor.

3.4 Ferramentas de corte utilizadas nos ensaios

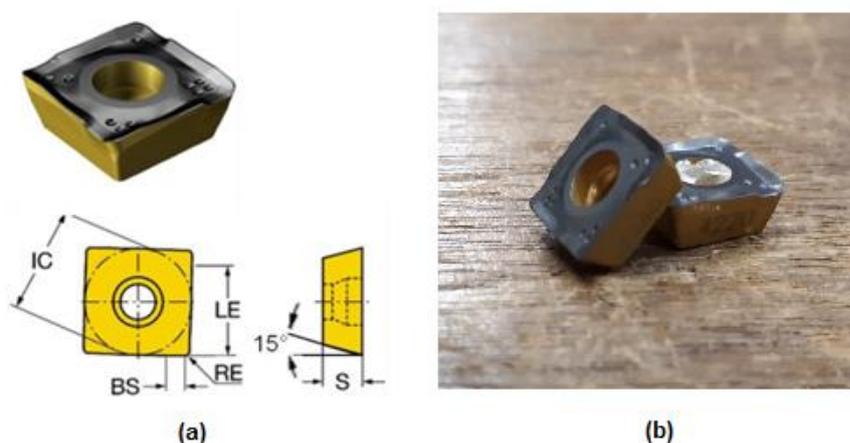
As ferramentas de corte utilizadas no trabalho foram ferramentas de metal duro revestidas da Sandvik Coromant de modelos diferentes, 490R-08T308M-PL 4220 e 490R-08TM-PL 4240. A escolha dessas ferramentas foi realizada de acordo com pesquisas bibliográficas sobre o fresamento de aço. Para selecioná-las foi utilizado o catálogo de ferramentas de corte da fabricante e o primeiro item observado foi justamente sobre qual material a ferramenta seria utilizada. Sendo assim, as classes de ferramentas escolhidas para o trabalho foram as classe P20 e P40, ambas para usinagem de aços, como pode ser visto na Figura 36, que também relaciona parâmetros e condições de usinagem para estas ferramentas. Suas características e especificações estão representadas na Figura 37 e na Tabela 2, respectivamente.

Figura 36 – Parâmetros e condições de usinagem recomendadas para ferramentas da classe P.



Fonte: Sandvik Coromant, 2012, (adaptado).

Figura 37 – Representação das ferramentas de corte utilizadas no trabalho.



Fonte: Sandvik Coromant, 2012 (adaptado).

Geometricamente, as ferramentas de corte são iguais. O que as diferenciam são as aplicações em que cada uma pode ser utilizada. A classe P40, por exemplo, pode ser utilizada em operações mais pesadas, em que mais de um dente da fresa pode estar em contato com a peça. Tem uma dureza aproximada de 1300HV, segundo o fabricante e grãos no substrato maiores em comparação a classe P20. A classe P20, possui dureza de 1500HV e é mais utilizada para usinagem em passo largo (SANDVIK COROMANT, 2010).

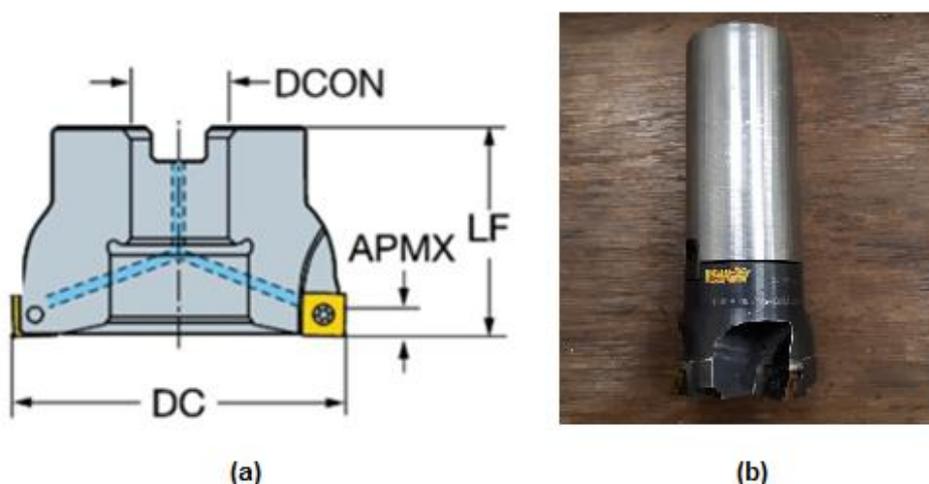
Tabela 2 – Especificações das ferramentas de corte revestidas.

Ferramentas 490R-08T308M-PL 4220/PL 4240		
IC	Diâmetro do círculo inscrito	8,5mm
LE	Comprimento efetivo de corte	5,6mm
BS	Comprimento da aresta de corte alisadora	1,2mm
RE	Raio de canto	0,8mm
S	Espessura da ferramenta	3,3mm
AN	Ângulo de folga principal	15°
L	Comprimento da aresta de corte	8,5mm
	Revestimento da ferramenta	MTCVD
	Número de arestas de corte	4
	Tipo de operação	Passo largo (4220)/Passo extrafino (4240)

Fonte: Sandvik Coromant, 2012 (adaptado).

Por fim, as ferramentas foram montadas em uma fresa da Sandvik Coromant modelo 490-040Q16-08M, que tem capacidade para 4 ferramentas e possui um diâmetro de corte de 40mm. As demais características e especificações estão apresentadas na Figura 38 e na Tabela 3, respectivamente.

Figura 38 – Representação da fresa CoroMill 490 utilizada no trabalho.



Fonte: Sandvik Coromant, 2012 (adaptado).

Tabela 3 – Especificações técnicas da fresa CoroMill 490.

Fresa CoroMill 490-040Q16-08M		
DCON	Diâmetro de conexão	16mm
APMX	Profundidade de corte máxima	5,5mm
LF	Comprimento funcional	40mm
DC	Diâmetro da fresa	40mm
χ_r	Ângulo de posição	90°
	Número de ferramentas	4
	Rotação máxima	29300rpm
	Torque	1,2N.m

Fonte: Sandvik Coromant, 2012 (adaptado).

3.5 Procedimento experimental

Este trabalho contou com a realização de uma série de experimentos, que tiveram seus resultados tratados por meio de técnicas estatísticas, como o Planejamento Experimental e a Análise de Variância (ANOVA).

Segundo Duarte e Meola (2007), o planejamento experimental é um conjunto de técnicas estatísticas para a estruturação de uma metodologia de pesquisa que permite planejar, executar e analisar os resultados. Tem como objetivo a determinação de um número ideal de experimentos para que leve à obtenção de resultados com alto grau de confiabilidade. A utilização desta técnica permite determinar quais variáveis são as mais influentes nos resultados, reduzindo o número de ensaios sem prejudicar a qualidade das informações obtidas. Além disso, com a implementação desta técnica, torna-se possível a realização da pesquisa em etapas, num processo cíclico e iterativo de acréscimo de novos ensaios.

A análise de variância é um procedimento utilizado para comparar a média de três ou mais grupos. Ela nos permite decidir pelas diferenças ou não de hipóteses a serem analisadas para as variáveis de respostas (Souza, [20--]).

3.5.1 Parâmetros de corte aplicados nos ensaios

Para os ensaios, optou-se por manter constantes os parâmetros de usinagem, que foram definidos com base em trabalhos de outros autores e de acordo com a recomendação em catálogos e manuais técnicos dos fabricantes dos ferramentais.

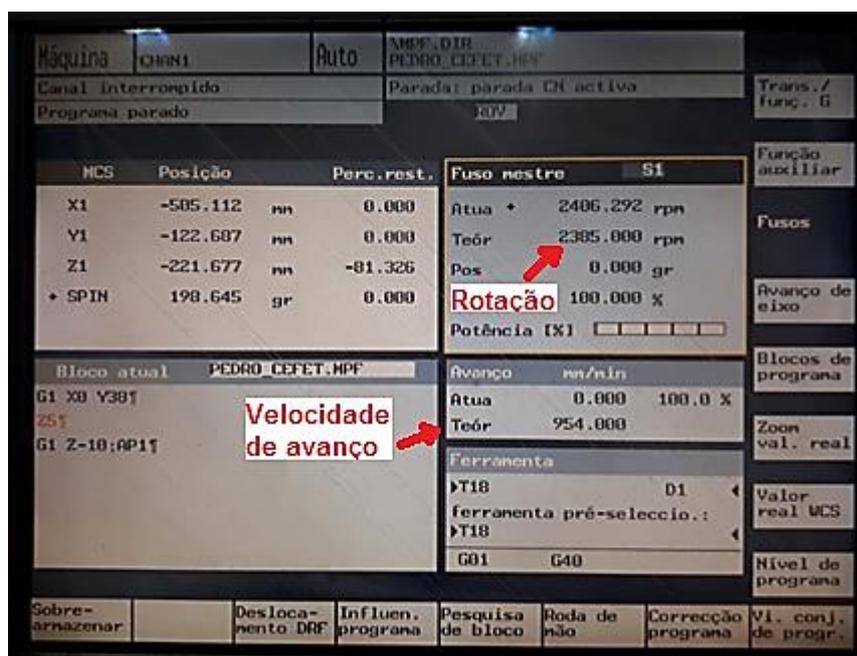
As velocidades de corte recomendadas nos catálogos das ferramentas de classe P20 e P40 são 395 e 270m/min respectivamente. Testes foram feitos com velocidades de 300m/min e ambas as classes de ferramentas apresentaram um desempenho constante para esta faixa de velocidade. Dessa forma, tendo como ponto de partida a velocidade de corte e utilizando as equações mostradas no capítulo 2, foram definidos os outros parâmetros de usinagem que estão descritos na Tabela 4. Algumas variáveis do processo podem ser visualizadas na Figura 39, que mostra a interface do CNC no painel de controle do centro de usinagem.

Tabela 4 – Parâmetros de corte utilizados nos experimentos.

Parâmetro	Unidade	Especificação
Velocidade de corte (Vc)	m/min	300
Profundidade de corte (ap)	mm	2,00
Rotação (n)	rpm	2387
Avanço (f)	mm/rev	0,40
Avanço por dente (fz)	mm/dente	0,10
Velocidade de avanço (Vf)	mm/min	954,8

Fonte: Próprio autor.

Figura 39 – Painel de controle do Centro de Usinagem.



Fonte: Próprio autor.

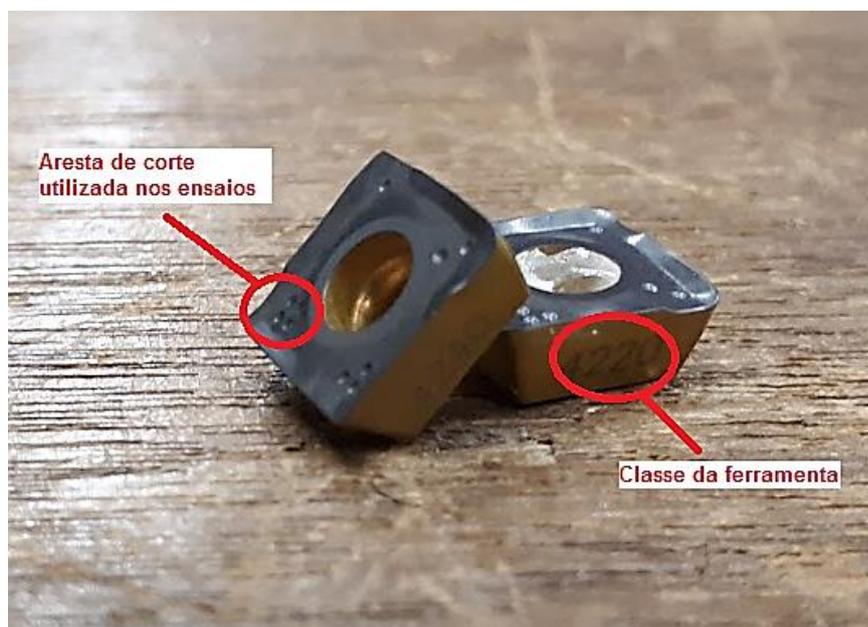
3.5.2 Ensaio de fresamento

Os ensaios de fresamento foram realizados em dois corpos de prova de cada geometria proposta: sem canais e com canais. Eles foram divididos em quatro grupos, com quatro ferramentas cada, numeradas de 1 a 16, de acordo com sua classe e o modelo do corpo de prova a ser utilizado:

- Grupo 1 a 4 → Barra sem canais, ferramentas da classe P20;
- Grupo 5 a 8 → Barra com canais, ferramentas da classe P20;
- Grupo 9 a 12 → Barra sem canais, ferramentas da classe P40;
- Grupo 13 a 16 → Barra com canais, ferramentas da classe P40.

Nos diferentes grupos, cada ferramenta sempre ocupou a mesma posição na fresa e sempre teve a mesma aresta de corte utilizada para cada ciclo dos ensaios. Para garantir as mesmas arestas de corte, elas foram identificadas por meio das marcações de fábrica presentes na face superior, sendo que os ensaios foram realizados utilizando-se as arestas com a marcação 4. Há ainda a marcação em uma de suas superfícies de folga, identificando a classe à qual pertence, conforme mostrado na Figura 40.

Figura 40 – Marcas de identificação da classe e da aresta de corte da ferramenta.



Fonte: Próprio autor.

Para garantir o posicionamento correto de cada ferramenta na fresa, utilizou-se como referência os números de 1 a 4 escritos na superfície do porta-ferramentas, conforme mostrado na Figura 41.

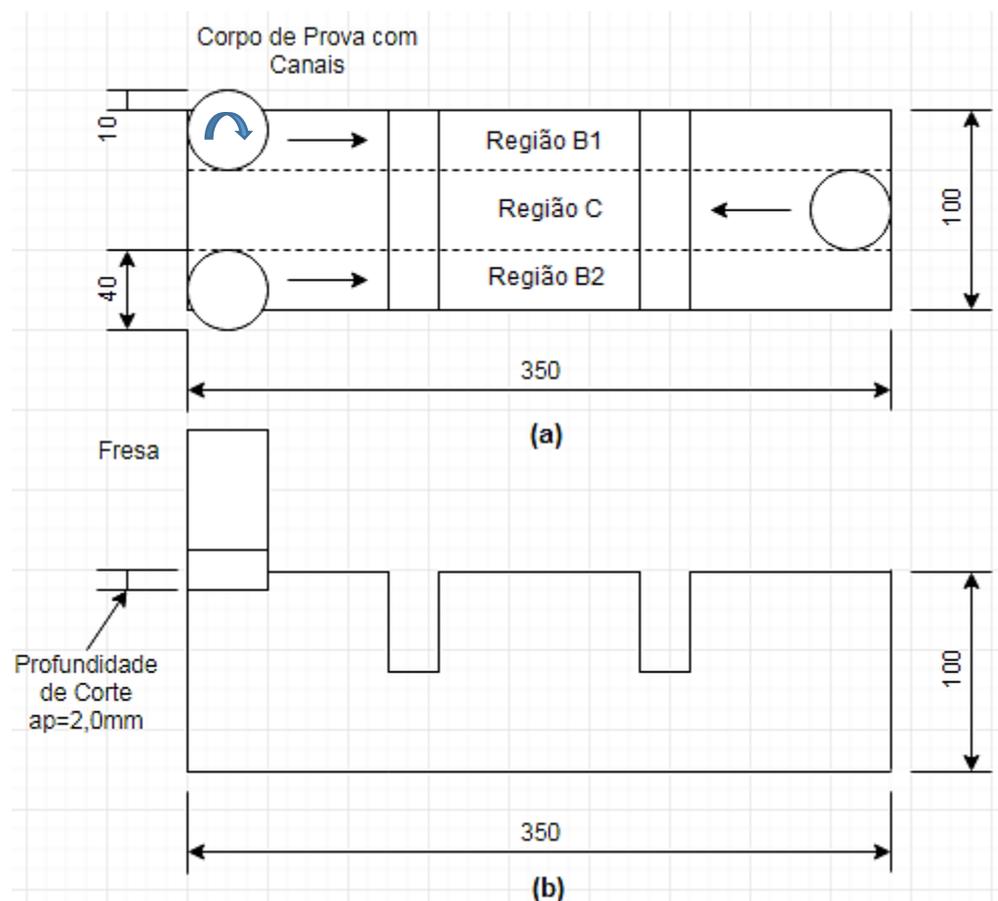
Figura 41 – Marcações para posicionamento das ferramentas.



Fonte: Próprio autor.

Os testes foram divididos em etapas que se alternavam entre o fresamento dos corpos de prova, a medição da massa das ferramentas e a análise em microscópio ótico. Decidiu-se fixar o número de passes das ferramentas sobre a peça, sendo que por passe entende-se a soma dos fresamentos ao longo das regiões B1, C e B2, borda 1, centro e borda 2, respectivamente, em ambos os modelos de corpo de prova. Os números de passes estabelecidos foram 4, 8 e 12. Assim, após os quatro primeiros passes, as ferramentas foram retiradas da fresa, pesadas e analisadas em microscópio ótico, para então serem novamente montadas e reiniciar o ciclo. Na Figura 42 é representado o ensaio de fresamento com as dimensões, o posicionamento da fresa sobre a peça e as regiões B1, C e B2. Todos os ensaios de fresamento foram realizados sem a utilização de fluidos de corte.

Figura 42 – Representação dos ensaios de fresamento: (a) vista superior; (b) vista lateral.



Fonte: Próprio autor.

A cada passe das ferramentas nas regiões B1, C e B2 foram retirados 2mm de material do corpo de prova, valor correspondente à profundidade de corte. O sentido do movimento de avanço da mesa é alternado, no fresamento das regiões B1 e B2, o sentido é da esquerda para direita, enquanto na região C o sentido é o contrário. A Tabela 5 resume todas essas etapas seguidas durante a realização dos ensaios de fresamento.

Tabela 5 – Resumo dos ensaios realizados

Modelo do corpo de prova	Classe da ferramenta	Número de identificação da ferramenta	Posição na fresa	Número de passes	Profundidade de corte total (mm)	Comprimento de corte total (mm)
Sem canais	P20	1	1	4, 8 e 12	8, 16 e 24	3600, 7200 e 10800
		2	2			
		3	3			
		4	4			
Com canais		5	1	4, 8 e 12	8, 16 e 24	
		6	2			
		7	3			
		8	4			
Sem canais	P40	9	1	4, 8 e 12	8, 16 e 24	3600, 7200 e 10800
		10	2			
		11	3			
		12	4			
Com canais		13	1	4, 8 e 12	8, 16 e 24	
		14	2			
		15	3			
		16	4			

Fonte: Próprio autor.

3.5.3 Medição da massa das ferramentas

Após cada ciclo de fresamento as ferramentas de corte foram desmontadas da fresa e passaram por medição de massa em balança analítica, com o intuito de caracterizar o desgaste por meio da sua variação. Elas foram pesadas antes do início dos testes, após cada passe sobre a peça e ao final dos ensaios. A princípio, estava-se medindo o peso de cada ferramenta individualmente, mas a variação de massa era insignificante. Dessa forma, adotou-se a forma de medir a massa das ferramentas por grupo, conforme elas já haviam sido organizadas.

3.5.4 Análises em microscópio ótico

Após a medição da massa do conjunto de ferramentas, elas foram conduzidas ao Laboratório de Microscopia Ótica para serem observadas. Com as imagens obtidas, foi possível analisar o desgaste de flanco localizado na superfície principal de folga de cada ferramenta. Diante dessa análise foram realizadas medições e registros do desgaste apresentado após os números de passes fixados. Para cada ferramenta

de corte dos grupos mediu-se o VB_B e, para os valores de todas juntas, calculou-se a média e o desvio-padrão do grupo. A evolução do desgaste nas ferramentas ficou evidente com essa metodologia, visto que as ferramentas foram submetidas a comprimentos de corte cada vez maiores, implicando em desgastes mais acentuados à medida em que os ensaios foram chegando ao fim.

3.5.5 Análise no microscópio eletrônico de varredura (MEV)

Após o término dos ensaios de fresamento, as ferramentas de corte foram submetidas a análises em microscópio eletrônico de varredura. O objetivo desta etapa do trabalho era observar as condições finais das ferramentas e identificar as formas e os mecanismos de desgaste presentes. Com as imagens obtidas pelo MEV também foram verificadas as condições finais para o desgaste de flanco das ferramentas, com o intuito de validar os registros feitos por meio da microscopia ótica. As ferramentas passaram por limpeza com álcool isopropílico 99,8% e posteriormente foram fixadas no porta amostras com uma fita de carbono dupla face. Todas as dezesseis ferramentas de corte tiveram suas arestas analisadas e, como visto previamente no microscópio ótico, cada grupo apresentou comportamentos semelhantes quanto ao desgaste. O porta amostras tem capacidade para alocar no máximo seis ferramentas por vez, desta forma elas foram agrupadas de quatro a quatro, de modo a realizar as observações de acordo com os conjuntos estabelecidos anteriormente. As imagens foram feitas com ampliações de 50 e 120 vezes.

3.5.6 Aquisição de dados de vibrações mecânicas

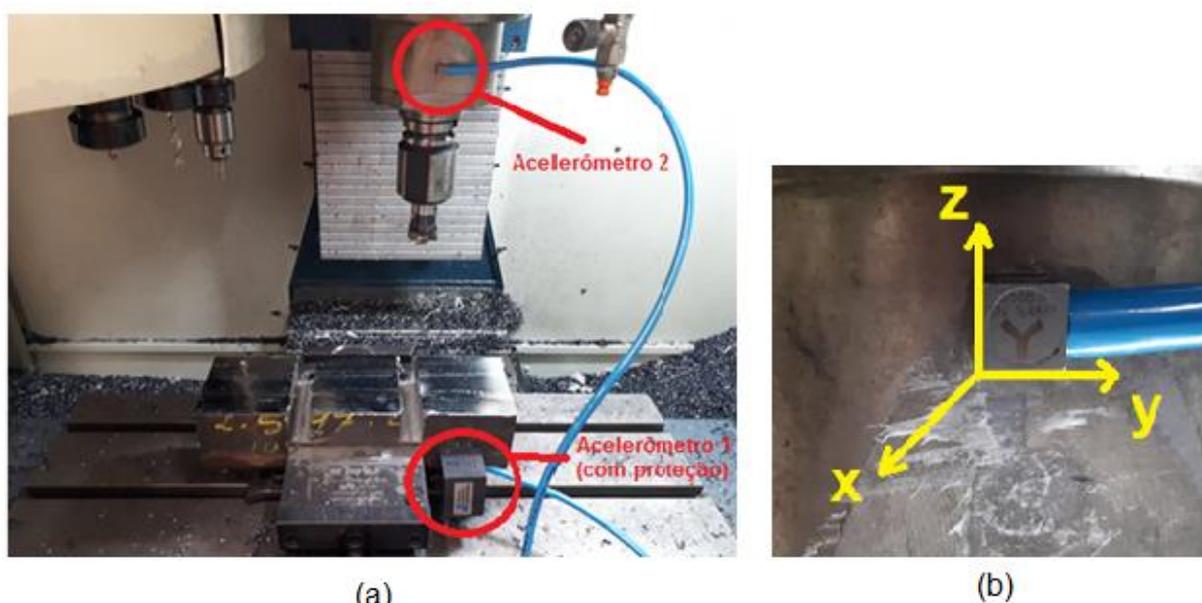
Paralelamente aos ensaios de fresamento, foram monitorados os sinais de vibrações mecânicas do sistema composto pelas ferramentas de corte e os corpos de prova. Foram instalados dois acelerômetros de três eixos coordenados, um em cada parte do conjunto, conforme pode ser observado na Figura 43 (a); o primeiro deles foi alternado entre os corpos de prova e o outro foi fixado até o fim dos testes, no eixo de rotação da fresa.

Os acelerômetros são compostos de uma pequena massa sobre uma base com dois cristais piezelétricos, um acoplado na massa e o segundo na base. O movimento relativo entre estes cristais é convertido em tensão elétrica que foi enviada ao amplificador de sinais por meio de cabos e posteriormente para o sistema de aquisição. No detalhe da Figura 43 (b), podem ser observados os eixos coordenados

do sistema, que são importantes para a correta comparação entre os dados para os corpos de prova e o eixo de rotação.

Com o software catman AP conectado ao amplificador, registraram-se os sinais obtidos ao longo do fresamento das regiões de B1, C e B2. A taxa de amostragem dos sinais monitorados foi de 2400Hz, captados em intervalos de 20 segundos para cada região na barra simples e 25 segundos nas barras com canais.

Figura 43 – (a) Instalação dos acelerômetros no sistema; (b) Detalhe para os eixos coordenados.



Fonte: Próprio autor.

O amplificador QuantumX MX1601B tem capacidade de adquirir dados de dezesseis canais simultaneamente. Entretanto, como o experimento utilizou apenas dois acelerômetros de três eixos, foram utilizados apenas seis portas, identificadas da seguinte maneira:

Porta 1 → eixo x da peça (XP);

Porta 2 → eixo y da peça (YP);

Porta 3 → eixo z da peça (ZP);

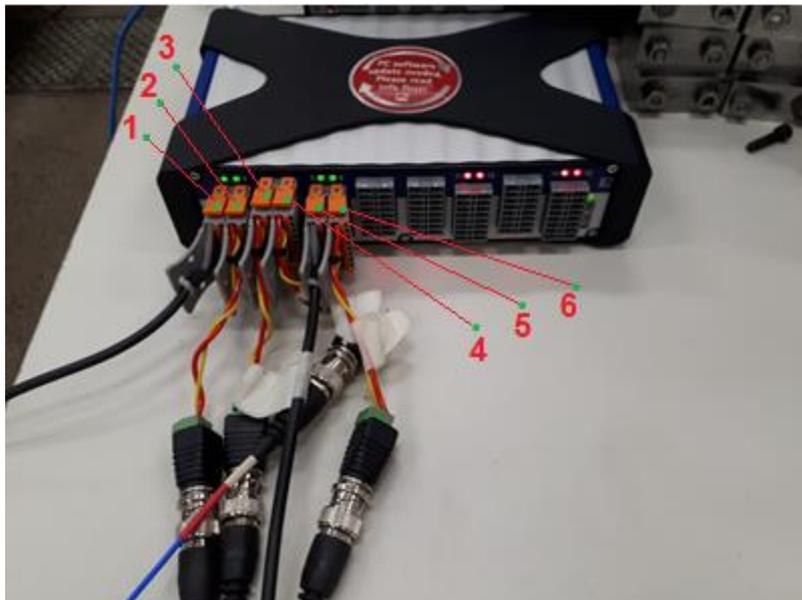
Porta 4 → eixo x da ferramenta (XF);

Porta 5 → eixo y da ferramenta (YF);

Porta 6 → eixo z da ferramenta (ZF).

Na Figura 44 pode-se observar o amplificador e as suas portas utilizadas durante os ensaios de fresamento.

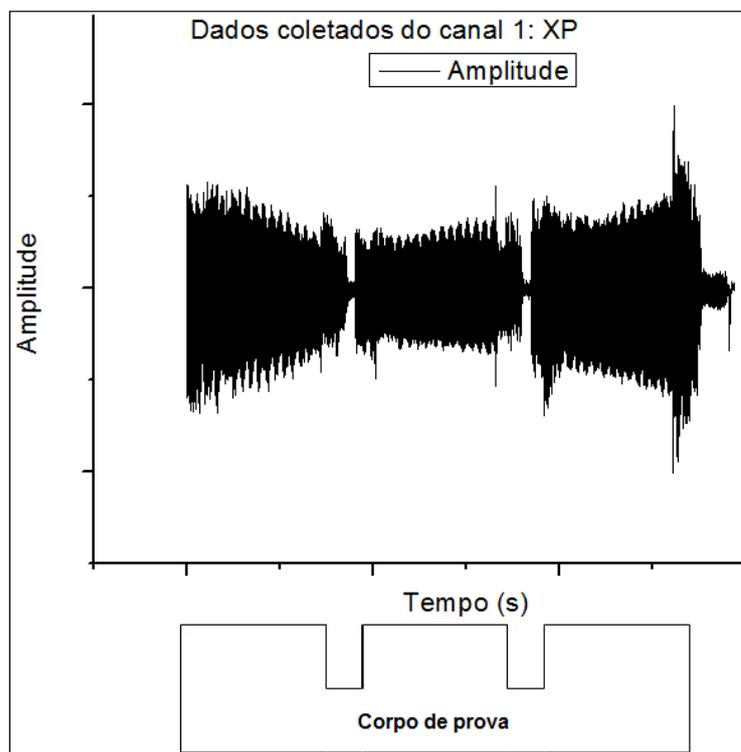
Figura 44 – Amplificador de sinais QuantumX MX1601B.



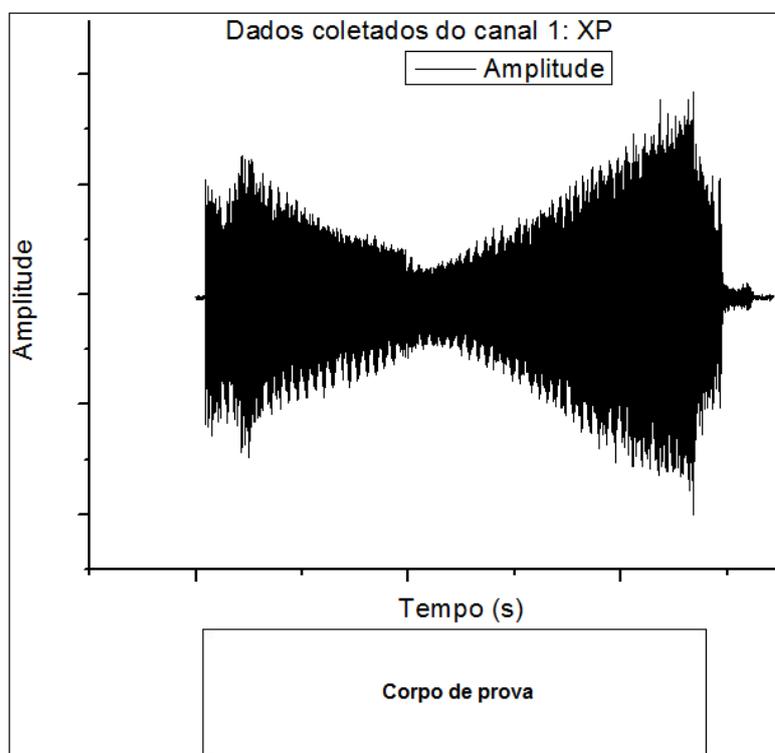
Fonte: Próprio autor.

Na Figura 45 é possível observar o aspecto quantitativo dos gráficos gerados pelo software Catman AP, para os corpos de prova com diferentes geometrias. Para a melhor comparação com os corpos de prova, os gráficos foram elaborados com a amplitude de vibração em função do tempo de fresamento. Nota-se que é possível identificar o momento em que ocorre a diminuição dos sinais de vibrações mecânicas durante o período inativo do fresamento das barras com canais.

Figura 45 – Aspectos quantitativos dos gráficos de vibrações mecânicas:
(a) Barras com canais; (b) Barras sem canais.



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor.

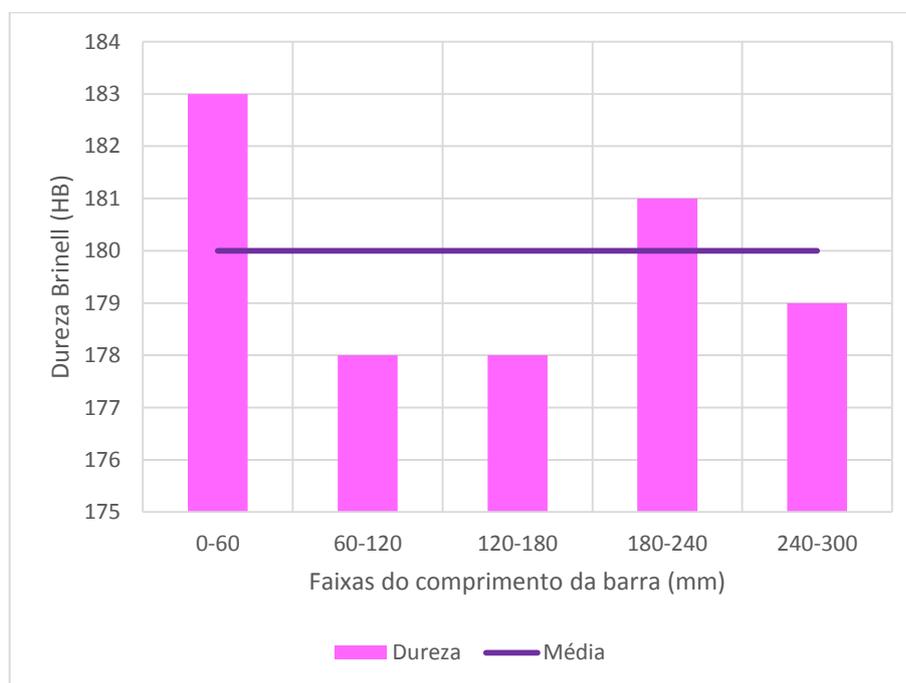
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados, sob a forma de tópicos, os resultados obtidos no fresamento frontal das barras de aço com diferentes geometrias, utilizando-se duas classes de ferramentas de metal duro e mantendo constante os parâmetros de corte, tais como a velocidade e a profundidade de corte. Os dados obtidos foram analisados por meio dos *softwares* Microsoft Excel, Origin Pro e Catman Ap.

4.1 Ensaio de dureza Brinell

O primeiro resultado obtido foi em relação à dureza média dos corpos de prova, sendo que foram realizadas medições ao longo da face correspondente ao comprimento de corte das barras. A medição da dureza foi realizada com o intuito de confirmar a possibilidade de utilização da velocidade de corte de 300m/min que está dentro da faixa sugerida pela fabricante das ferramentas. Na Figura 46 pode-se observar os valores mensurados assim como o valor médio da dureza do material.

Figura 46 – Dureza média dos corpos de prova.



A dureza média mensurada foi de 180HB, valor este que está na faixa de valores para a dureza do aço SAE1045.

4.2 Influência da geometria da peça na evolução do desgaste da ferramenta de classe P20.

Na Tabela 6 são observados os resultados obtidos para o desgaste de flanco médio e para os valores medidos da massa das ferramentas de corte após os ensaios de fresamento para 4, 8 e 12 passes no corpo de prova sem canais.

Tabela 6 – Resultados para as ferramentas P20 no fresamento do corpo de prova sem canais.

Classe da ferramenta	Número de passes	Número da ferramenta	Peso do conjunto (g)	VB_B (mm)	VB_B médio (mm)	Desvio Padrão
P20	4	1	8,8370	0,052	0,057	0,005
		2		0,062		
		3		0,060		
		4		0,054		
	8	1	8,8359	0,102	0,108	0,009
		2		0,117		
		3		0,115		
		4		0,099		
	12	1	8,8365	0,135	0,143	0,008
		2		0,148		
		3		0,138		
		4		0,152		

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 47 observa-se a evolução do desgaste apresentado pela ferramenta número 1, da classe P20, durante o fresamento do corpo de prova sem canais após 4, 8 e 12 passes. Vale ressaltar que as outras ferramentas deste grupo apresentaram evolução de desgaste semelhante, o que também é válido para os outros grupos durante todos os testes.

Figura 47 – Evolução do desgaste das ferramentas de corte P20: (a) após 4 passes; (b) após 8 passes; (c) após 12 passes.



Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 7 são apresentados os resultados obtidos para o desgaste de flanco médio e para os valores medidos da massa das ferramentas de corte após os ensaios de fresamento para 4, 8 e 12 passes no corpo de prova com canais.

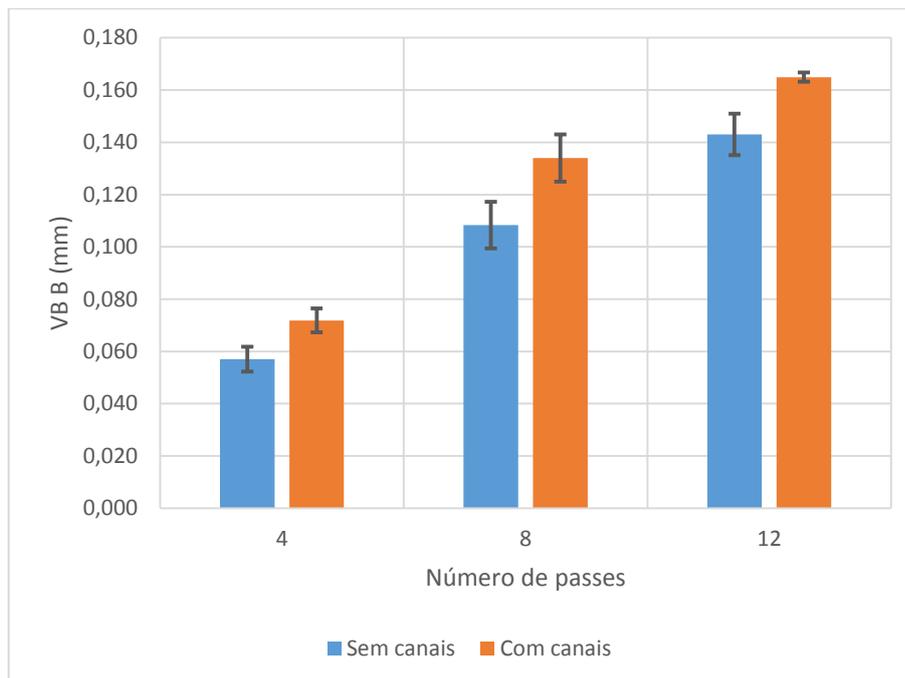
Tabela 7 – Resultados para as ferramentas P20 no fresamento do corpo de prova com canais.

Classe da ferramenta	Número de passes	Número da ferramenta	Peso do conjunto (g)	VB_B (mm)	VB_B médio (mm)	Desvio Padrão
P20	4	5	8,7839	0,070	0,072	0,005
		6		0,078		
		7		0,068		
		8		0,071		
	8	5	8,7787	0,145	0,134	0,009
		6		0,123		
		7		0,131		
		8		0,137		
	12	5	8,7155	0,163	0,165	0,002
		6		--		
		7		0,165		
		8		0,167		

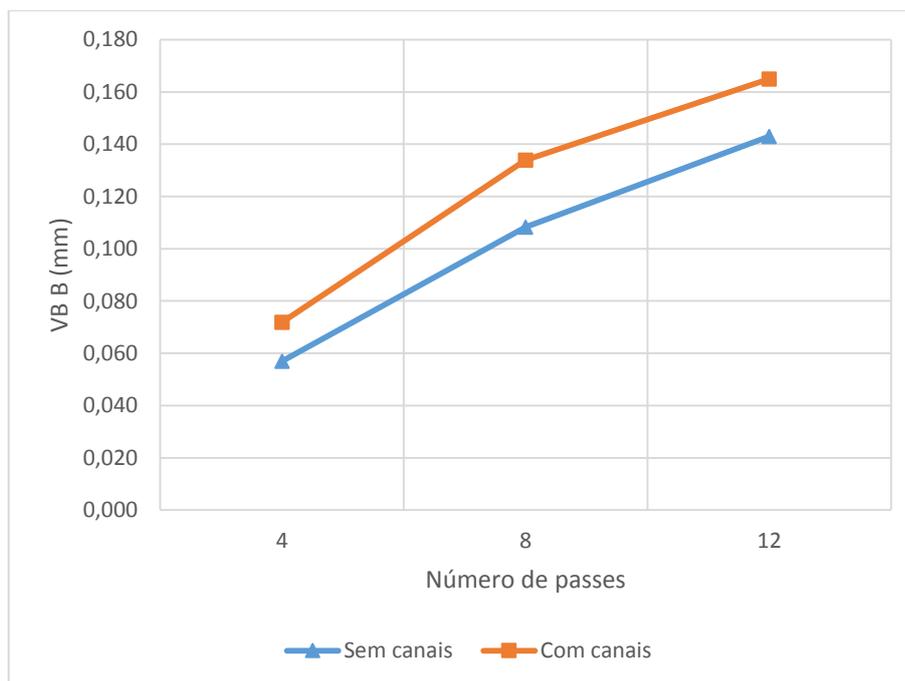
Fonte: Próprio autor.

O VB_B foi acompanhado em função do número de passes das ferramentas sobre os corpos de prova. Pode-se distinguir dois estágios para o desgaste à medida em que a quantidade de passes aumenta, conforme observado nos gráficos da Figura 48. Em ambos os casos, as ferramentas apresentaram um desgaste acentuado no início do fresamento devido à desagregação das camadas de revestimento e acomodação das faces de contato entre a peça e as ferramentas. Seguindo-se os ensaios observou-se uma tendência ao desgaste estacionário, que é caracterizado pela operação normal da ferramenta durante o trabalho. Em nenhuma das condições foi atingido a faixa catastrófica, ou desgaste acelerado, que inicia-se quando a ferramenta atinge valores de desgaste de flanco máximo de 0,6mm.

Figura 48 – Desgaste de flanco médio das ferramentas P20 ao longo dos passes em diferentes geometrias: (a) Desvio-padrão (b) Curvas de evolução.



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor.

Durante o fresamento da região C no último passe da ferramenta classe P20 sobre o corpo de prova com canais, ocorreu o lascamento da ferramenta número 6,

que ocupava a posição 2 da fresa. Esta ocorrência impossibilitou a medição do desgaste final da aresta correspondente. A média final para os doze passes nessa condição foi calculada somente com os valores para as outras três ferramentas. Observou-se um desgaste de flanco médio cerca de 15,4% maior ao final do fresamento do corpo de provas com canais. Na Figura 49, pode-se observar a evolução do desgaste das ferramentas do grupo 5 a 8 mensurado por meio da variação de massa durante o fresamento do corpo de prova com canais.

Figura 49 – Medição da massa do grupo 5 a 8: (a) inicial; (b) após 4 passes; (c) após 8 passes; (d) após 12 passes.

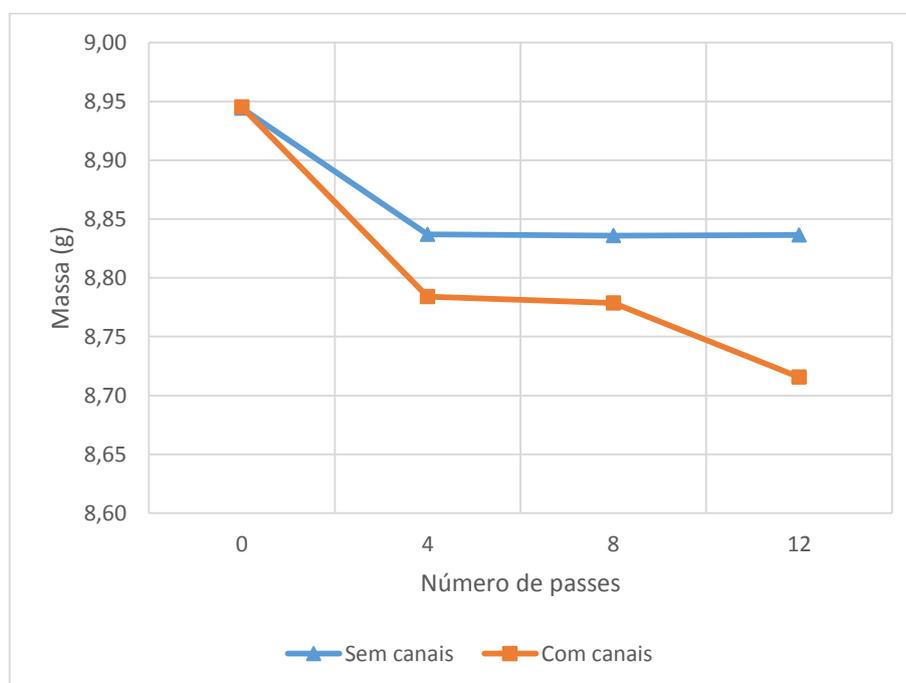


Fonte: Próprio autor.

Em relação à massa dos conjuntos de ferramentas observou-se novamente dois estágios para o desgaste com o passar do tempo do fresamento. Na Figura 50 pode-se notar uma maior variação de massa durante os passes iniciais, e o início da faixa estacionária do desgaste com o passar do tempo. Para o grupo 5 a 8 deve-se levar em consideração o lascamento da ferramenta 6 levando a diminuição drástica da massa de seu conjunto.

Outro ponto observado com a medição das massas foi a presença do mecanismo de desgaste por adesão, ocasionando um leve aumento da massa dos conjuntos de ferramentas durante o período estacionário.

Figura 50 – Curva de variação de massa das ferramentas P20 ao longo dos passes em diferentes geometrias.



Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 8 observam-se as variações de massa para cada condição do trabalho, em que foi desconsiderado o valor mensurado após doze passes. Para efeito de comparação, foram utilizadas as massas aferidas após oito passes, antes da ferramenta 6 sofrer lascamento.

Tabela 8 – Variação de massa das ferramentas P20 ao longo dos passes em diferentes geometrias.

Corpo de prova	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Variação massa (g)
Sem canais	8,9442	8,8359	0,1083
Com canais	8,9454	8,7787	0,1667

Fonte: Próprio autor.

Comparando as ferramentas em cada condição, o conjunto utilizado no fresamento da barra com canais resultou em uma redução de massa cerca de 53,9% maior. De acordo com os dados nota-se que o fresamento de corpos de prova com diferentes geometrias leva ao maior desgaste de flanco e maior variação de massa das ferramentas utilizadas no corpo de prova com canais. Conclui-se que o maior número de entradas e saídas de corte é o fator preponderante para o desgaste das ferramentas de corte nestas condições, visto que todos os outros fatores não foram alterados.

4.3 Influência da geometria da peça na evolução do desgaste da ferramenta de classe P40.

Na Tabela 9 são observados os resultados obtidos para o desgaste de flanco médio e para os valores aferidos da massa das ferramentas de corte após os ensaios de fresamento para 4, 8 e 12 passes no corpo de prova sem canais.

Tabela 9 – Resultados para as ferramentas P40 no fresamento do corpo de prova sem canais.

Classe da ferramenta	Número de passes	Número da ferramenta	Peso do conjunto (g)	VB_B (mm)	VB_B médio (mm)	Desvio Padrão
P40	4	9	8,5697	0,065	0,068	0,002
		10		0,071		
		11		0,067		
		12		0,068		
	8	9	8,5701	0,118	0,131	0,011
		10		0,139		
		11		0,127		
		12		0,143		
	12	9	8,5713	0,150	0,154	0,006
		10		0,154		
		11		0,150		
		12		0,163		

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 10 são apresentados os resultados obtidos para o desgaste de flanco médio e para os valores aferidos da massa das ferramentas de corte após os ensaios de fresamento para 4, 8 e 12 passes no corpo de prova com canais.

Tabela 10 – Resultados para as ferramentas P40 no fresamento do corpo de prova com canais.

Classe da ferramenta	Número de passes	Número da ferramenta	Peso do conjunto (g)	VB_B (mm)	VB_B médio (mm)	Desvio Padrão
P40	4	13	8,5368	0,080	0,085	0,004
		14		0,088		
		15		0,085		
		16		0,088		
	8	13	8,5370	0,154	0,162	0,009
		14		0,168		
		15		0,172		
		16		0,156		
	12	13	8,5373	0,200	0,198	0,004
		14		0,203		
		15		0,193		
		16		0,196		

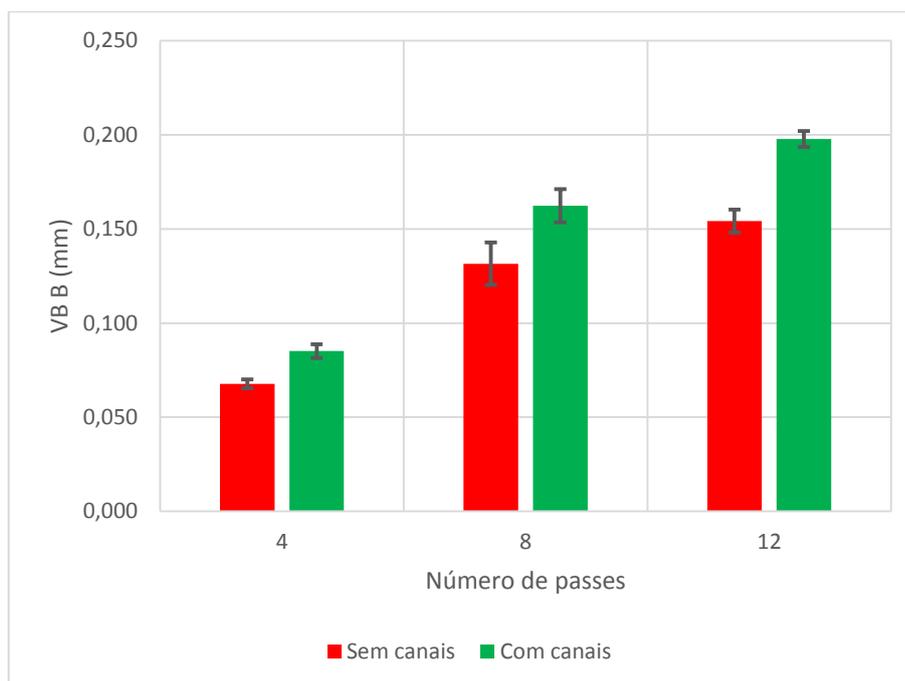
Fonte: Próprio autor.

O comportamento de trabalho apresentado pelas ferramentas P40 foi muito similar às ferramentas da classe P20, sendo possível observar dois estágios para a evolução do desgaste, conforme a Figura 51. No início, as ferramentas passaram por um desgaste acentuado e, com a sequência dos ensaios, observa-se a tendência à estabilização dos valores médios para o desgaste de flanco.

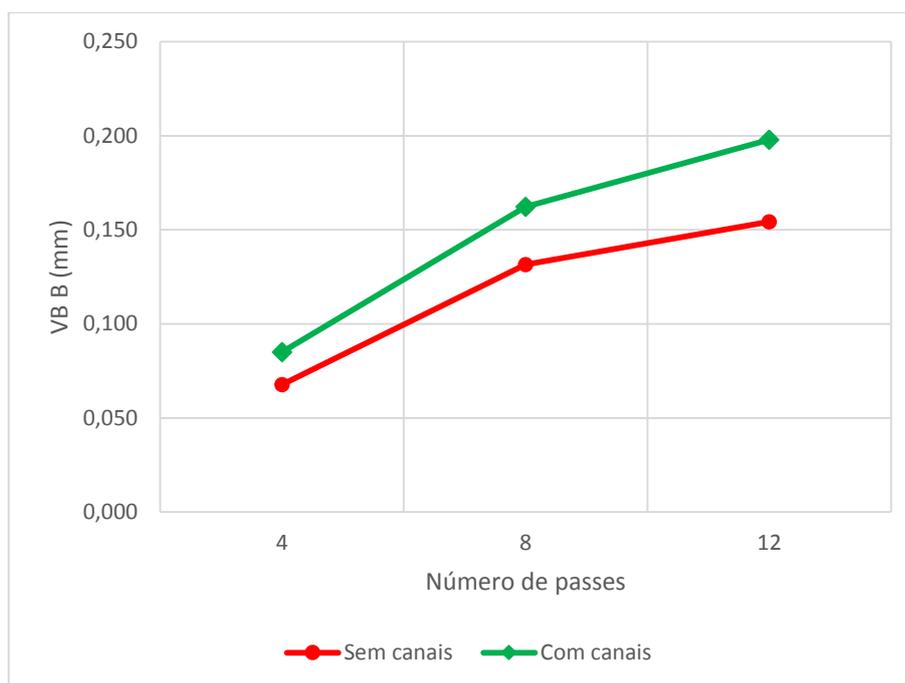
Assim como para as ferramentas da classe P20, a faixa catastrófica não foi atingida em nenhuma das condições durante os ensaios com a classe P40, em que o critério de fim de vida das ferramentas é adotado com o valor de $VB_{BMÁX} = 0,6mm$. Isto porque, de acordo com Diniz, Marconi e Coppini (2013), os revestimentos utilizados em ferramentas de metal duro possuem elevada resistência ao desgaste, o que acarreta no prolongamento da vida das ferramentas.

Para as ferramentas de classe P40 observou-se um desgaste de flanco médio cerca de 28,6% maior ao final do fresamento do corpo de prova com canais.

Figura 51 - Desgaste de flanco médio das ferramentas P40 ao longo dos passes em diferentes geometrias: (a) Desvio-padrão (b) Curvas de evolução.



(a)

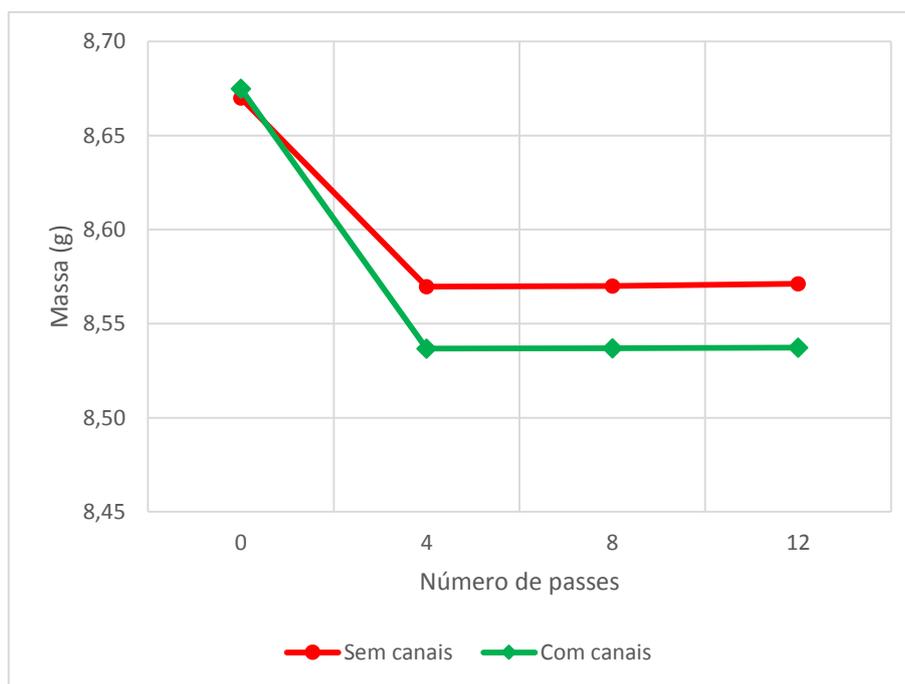


(b)

Fonte: Próprio autor.

A curva de variação de massa dos conjuntos de ferramentas classe P40 é apresentada na Figura 52. Observa-se, assim como para a classe anterior, que no início dos ensaios os conjuntos de ferramentas sofrem maior desgaste de massa e com a evolução do processo de fresamento praticamente não há variação. Nessa condição também ficou clara a presença do mecanismo de desgaste por adesão, levando a um leve aumento de massa nos passes finais.

Figura 52 – Curva de variação de massa das ferramentas P40 ao longo dos passes em diferentes geometrias.



Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 11 são apresentados os valores de massa mensurados antes e após o término dos ensaios em cada situação de trabalho.

Tabela 11 – Variação de massa das ferramentas P40 ao longo dos passes em diferentes geometrias.

Corpo de prova	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Variação massa (g)
Sem canais	8,6700	8,5713	0,0987
Com canais	8,6749	8,5373	0,1376

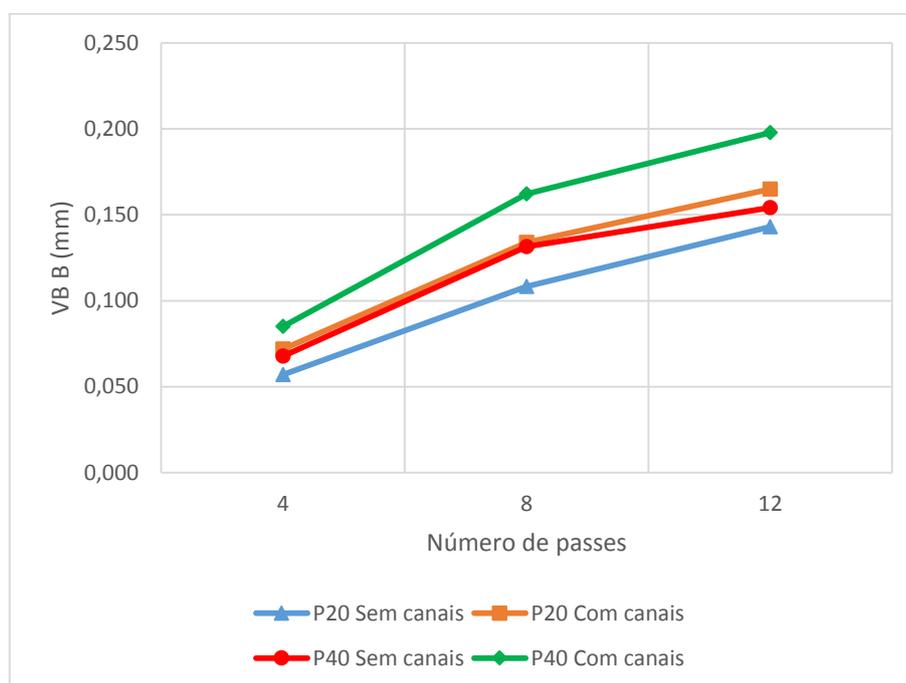
Fonte: Próprio autor.

Comparando as massas dos conjuntos em cada condição, as ferramentas utilizadas no corpo de prova com canais resultaram em uma redução de massa cerca de 39,4% maior. Novamente nota-se maiores valores para o desgaste de flanco e perda de massa para o conjunto de ferramentas utilizadas para o fresamento do corpo de prova com canais. Isto reforça a hipótese de que o número de entradas e saídas de corte é o principal fator no desgaste das ferramentas.

4.4 Comparação de desempenho entre as ferramentas P20 e P40.

Comparando-se os valores gerais para as classes de ferramentas, os melhores desempenhos foram alcançados pelas ferramentas de classe P20. Na Figura 53 estão representadas as curvas de desgaste de flanco médio em função do número de passes para cada classe de ferramentas utilizadas durante o fresamento dos corpos de prova com diferentes geometrias.

Figura 53 – Curvas de evolução do desgaste de flanco médio para as ferramentas P20 e P40 durante o fresamento de diferentes geometrias.



Fonte: Próprio autor.

No gráfico, pode-se observar que o pior desempenho foi o das ferramentas da classe P40 durante o fresamento do corpo de provas com canais. Segundo a fabricante das ferramentas, a classe P40 tem dureza aproximada de 1300 HV e maiores grãos de substrato em comparação as da classe P20, que possuem dureza de 1500 HV. Por possuírem menor dureza, elas são mais susceptíveis ao mecanismo de desgaste por abrasão, e este fato está diretamente relacionado a maior ao desgaste de flanco das ferramentas P40. O melhor desempenho foi o das ferramentas da classe P20 durante o fresamento do corpo de provas sem canais.

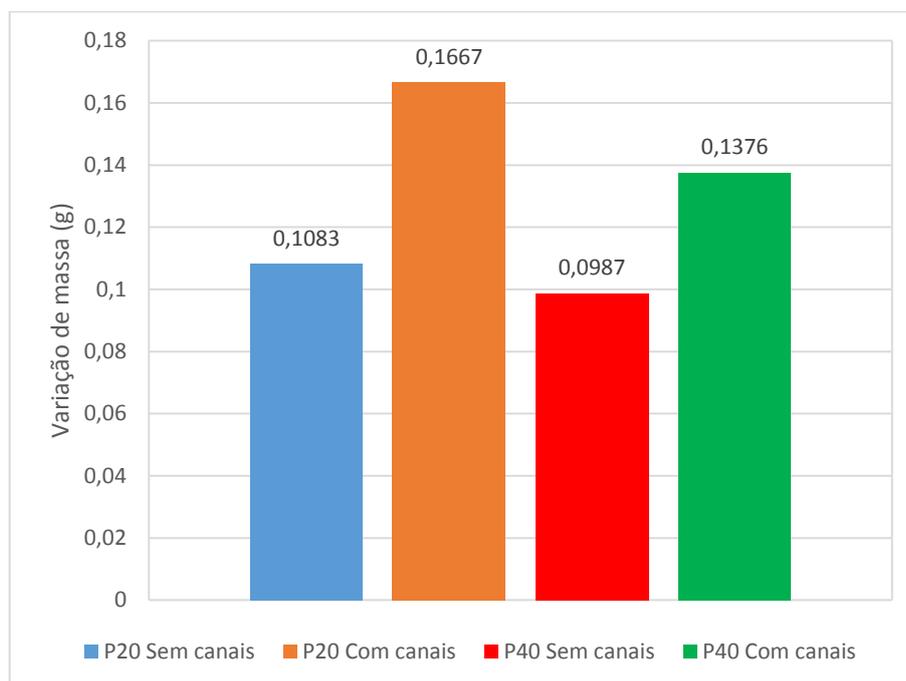
Duas situações se apresentaram com comportamentos muito semelhantes, o fresamento do corpo de prova com canais com as ferramentas P20 e o fresamento da barra sem canais com as ferramentas classe P40. Os valores para o desgaste de flanco das ferramentas nessas duas situações foram muito próximos, com um desempenho um pouco superior para a classe P40 nos passes finais. O principal ponto a se destacar nesta situação é que, apesar das ferramentas da classe P20 serem mais resistentes ao desgaste de flanco, o número de entradas e saídas de corte no corpo de prova com canais se sobressaiu, tornando o desgaste mais elevado.

Abaixo segue a ordem do desempenho das ferramentas de corte quanto ao desgaste de flanco, medidos ao final dos ensaios em cada situação:

- Grupo 1 a 4 $\rightarrow VB_B = 0,143mm$;
- Grupo 9 a 12 $\rightarrow VB_B = 0,154mm$;
- Grupo 5 a 8 $\rightarrow VB_B = 0,165mm$;
- Grupo 13 a 16 $\rightarrow VB_B = 0,198mm$.

Em relação à massa dos conjuntos compostos por diferentes classes de ferramentas, na Figura 54 são mostradas as variações para cada situação de trabalho. Pode-se notar que, mesmo tendo as ferramentas da classe P40 sofrido maior desgaste de flanco, a variação de massa desta classe foi menor relativamente às da classe P20. A maior tenacidade destas ferramentas contribui para maior resistência aos choques mecânicos. As ferramentas da classe P40 são menos frágeis, e como consequência sofrem menos com quebras e lascamentos. Além disso, foi verificado que elas sofreram mais com o mecanismo de desgaste por adesão, contribuindo com uma leve variação positiva de massa nos passes finais dos ensaios.

Figura 54 – Variação de massa das ferramentas P20 e P40 durante o fresamento de diferentes geometrias.



Fonte: Próprio autor.

Diante do exposto fica clara a influência do número de entradas e saídas sobre o desempenho das ferramentas de corte. Peças com geometrias complexas, que possuem muitas entradas e saídas de corte, certamente exigem mais das ferramentas, ocasionando num desgaste de flanco mais acelerado e menor vida útil das ferramentas de corte. Além disso, a classe P40 foi menos influenciada pela presença de canais nos corpos de prova.

4.5 Análise dos sinais de vibrações

Os dados de vibrações mecânicas do sistema foram coletados com o intuito de ratificar a influência da geometria dos corpos de prova quanto ao desgaste das ferramentas de corte. Foram gerados gráficos da amplitude de vibração em função das frequências excitadas. O comportamento entre as diferentes classes de ferramentas foi semelhante e tendo em vista a grande quantidade de dados gerados, optou-se por realizar a análise de vibrações somente para a classe P40, pois elas apresentaram maiores valores para o desgaste de flanco e menor perda de massa.

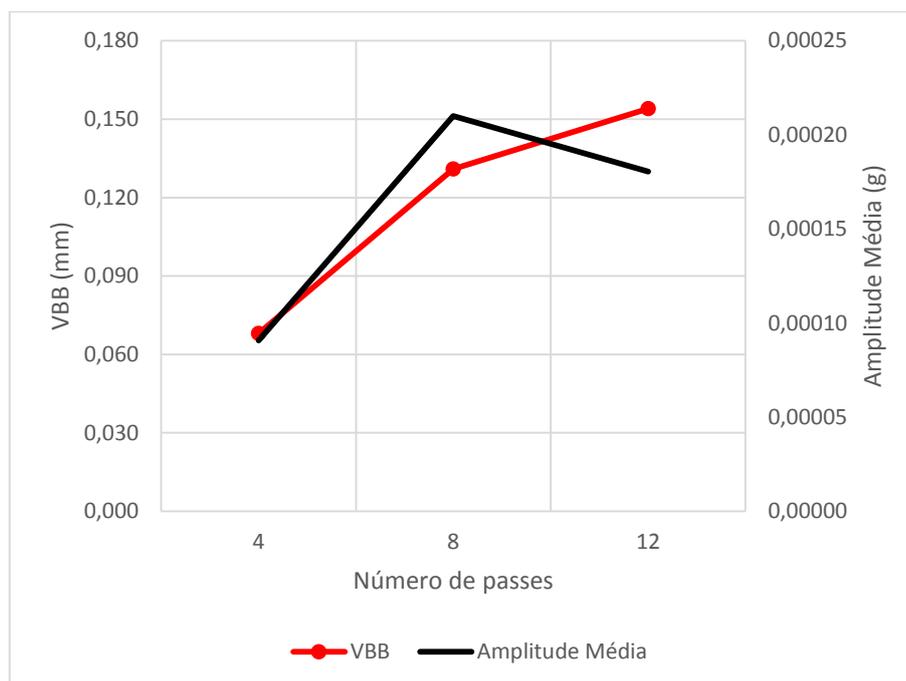
A análise dos gráficos permite a distinção de três faixas de frequências excitadas durante o fresamento dos corpos de prova. A primeira faixa observada é a composta por valores entre 0 e 400Hz, em que pode ser observada a frequência de trabalho do equipamento e seus harmônicos, sendo possível destacar valores para quatro frequências excitadas na maioria dos casos. Em geral, nessa faixa as amplitudes de vibração possuem um comportamento homogêneo, com valores de picos bem próximos para cada frequência.

A segunda faixa observada, que foi a mais estudada no trabalho, contém valores de frequências entre 400Hz e 800Hz. Ela representa a região de frequências da peça durante o fresamento, bem como dos harmônicos da frequência de trabalho. Nesta faixa, as amplitudes de vibração alcançam valores mais altos e heterogêneos se comparados à faixa inicial.

A terceira faixa é composta por valores de alta frequência, acima de 800Hz. Nessa faixa os valores de amplitude identificados voltam a ser mais homogêneos, mas com valores intermediários entre a primeira e a segunda faixas.

Analisando a faixa de frequências da peça nas barras sem canais, ou seja, de 400Hz a 800Hz, é possível notar que o comportamento dos sinais de vibração é semelhante à curva para o desgaste de flanco das ferramentas. Na Figura 55, pode-se observar o gráfico das amplitudes médias de vibração em função do número de passes, juntamente com o gráfico para o desgaste de flanco. Há um aumento na amplitude nos passes iniciais, devido ao desgaste acentuado, e uma tendência à estabilização com o progresso do ensaio.

Figura 55 – Amplitude média de vibração em função do número de passes da ferramenta no corpo de prova sem canais.



Fonte: Próprio autor.

A cada passe da ferramenta sobre a peça, são retirados dois milímetros de altura do corpo de prova, valor que é correspondente à profundidade de corte. Esta diminuição na altura da peça torna o conjunto mais estável, o que determina maior rigidez em termos de vibrações mecânicas. O aumento na rigidez do conjunto somado à consequente diminuição de massa do corpo de prova, faz com que a frequência de oscilação aumente ao longo dos passes da ferramenta, sendo que a frequência é dada pela Equação 10:

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (10)$$

Em que:

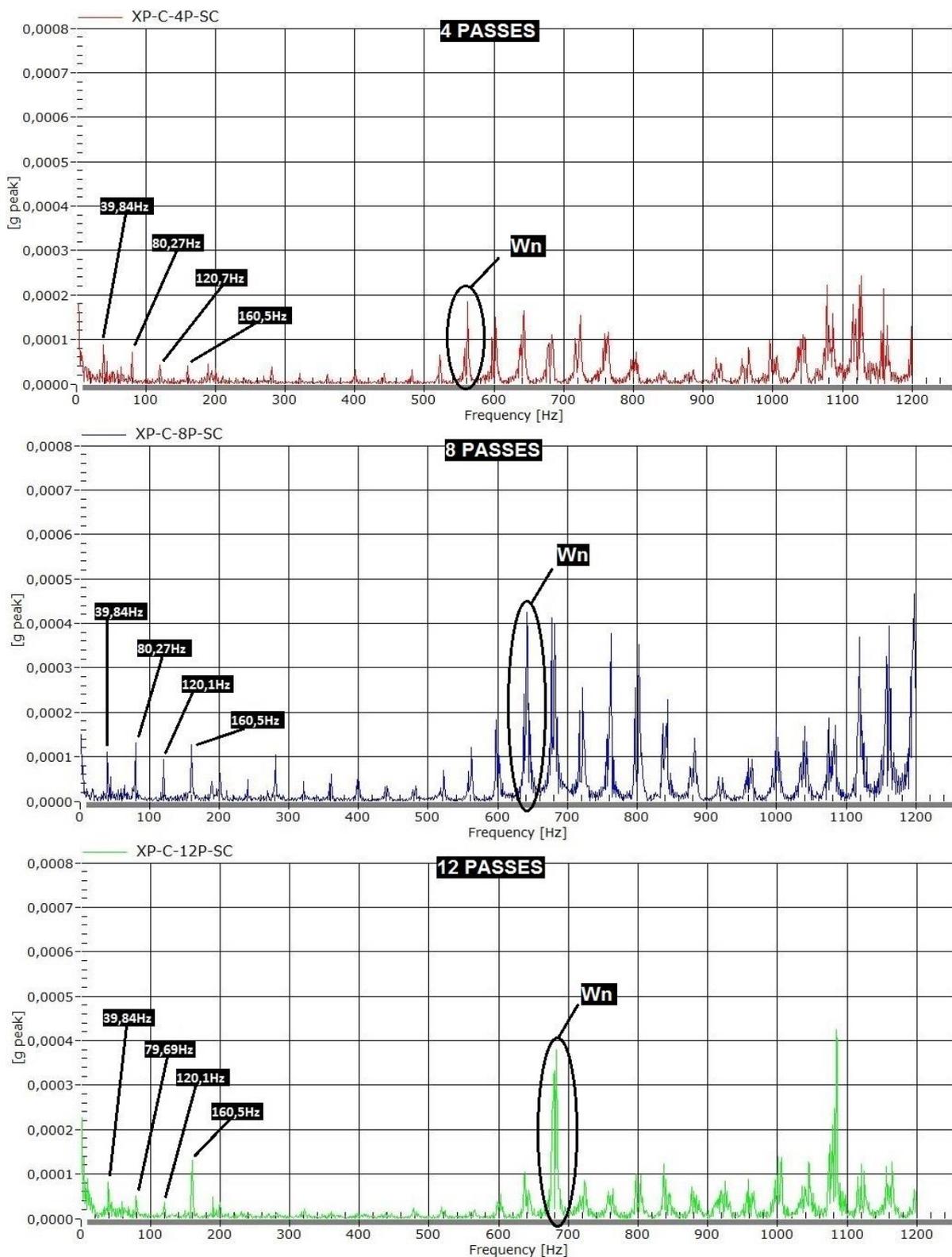
$k = \text{rigidez};$

$m = \text{massa}.$

Na Figura 56 observam-se os gráficos de amplitude em função das frequências excitadas, gerados para o eixo X da peça, durante o fresamento da região C, do corpo de prova sem canais. Na primeira faixa de frequências, estão em destaque a frequência de trabalho excitada do sistema e suas harmônicas. Seu valor é obtido convertendo-se o valor da rotação da fresa de rotações por minuto para hertz. Na faixa

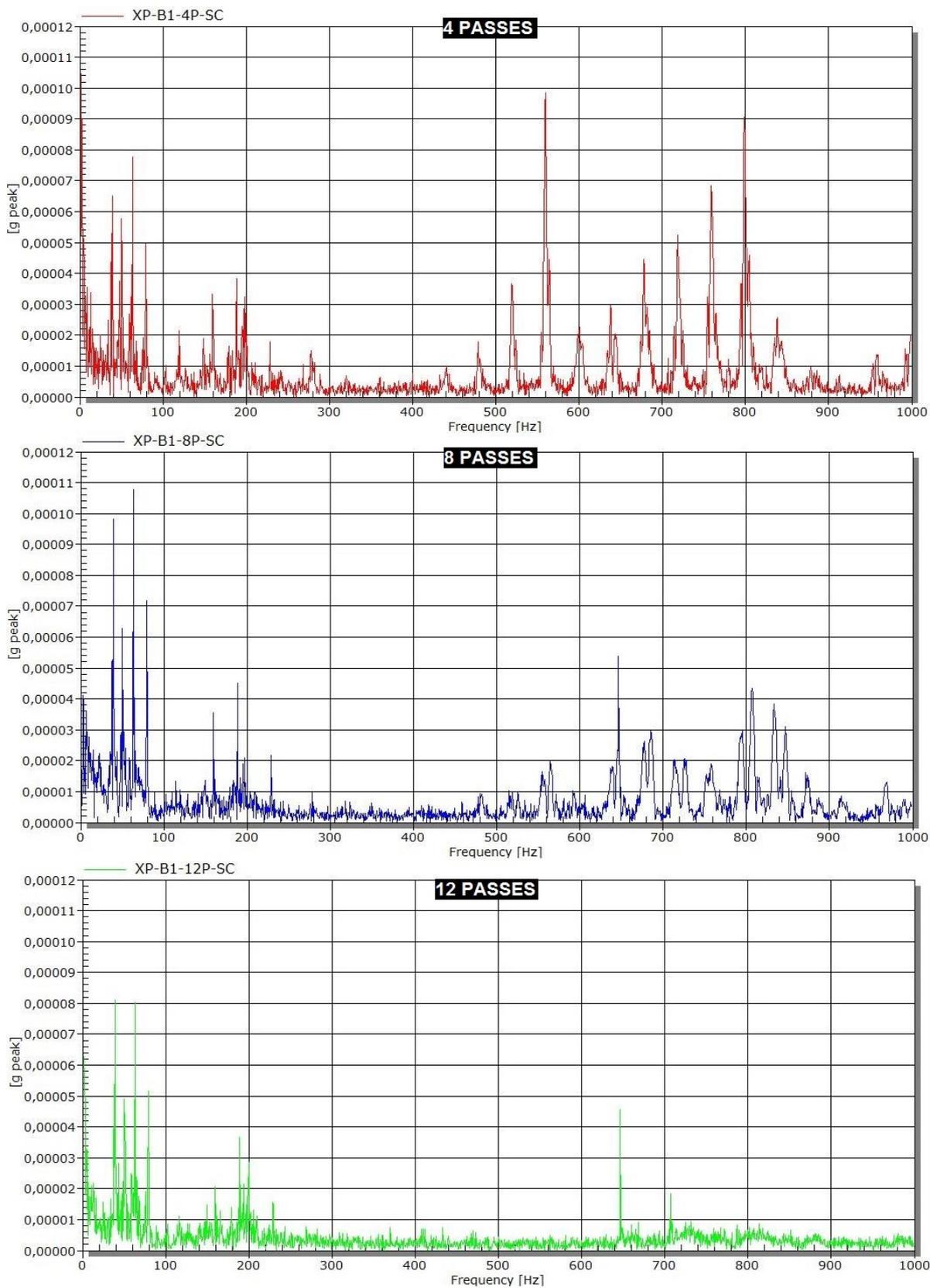
de frequências da peça, pode-se notar que nos primeiros passes o pico máximo de amplitude aparece em 560Hz. Para os oito passes, o maior valor para a amplitude aparece em 640Hz. Nos doze passes finais a amplitude máxima se dá em 680Hz. Este aumento da frequência excitada na peça, de acordo com o andamento do ensaio de fresamento, também foi destacado nos gráficos. Para as outras regiões de fresamento da barra sem canais, regiões B1 e B2, o comportamento foi semelhante, conforme pode ser visto nas Figuras 57 e 58.

Figura 56 – Amplitude em função das frequências excitadas ao longo dos passes na região C do corpo de prova sem canais.



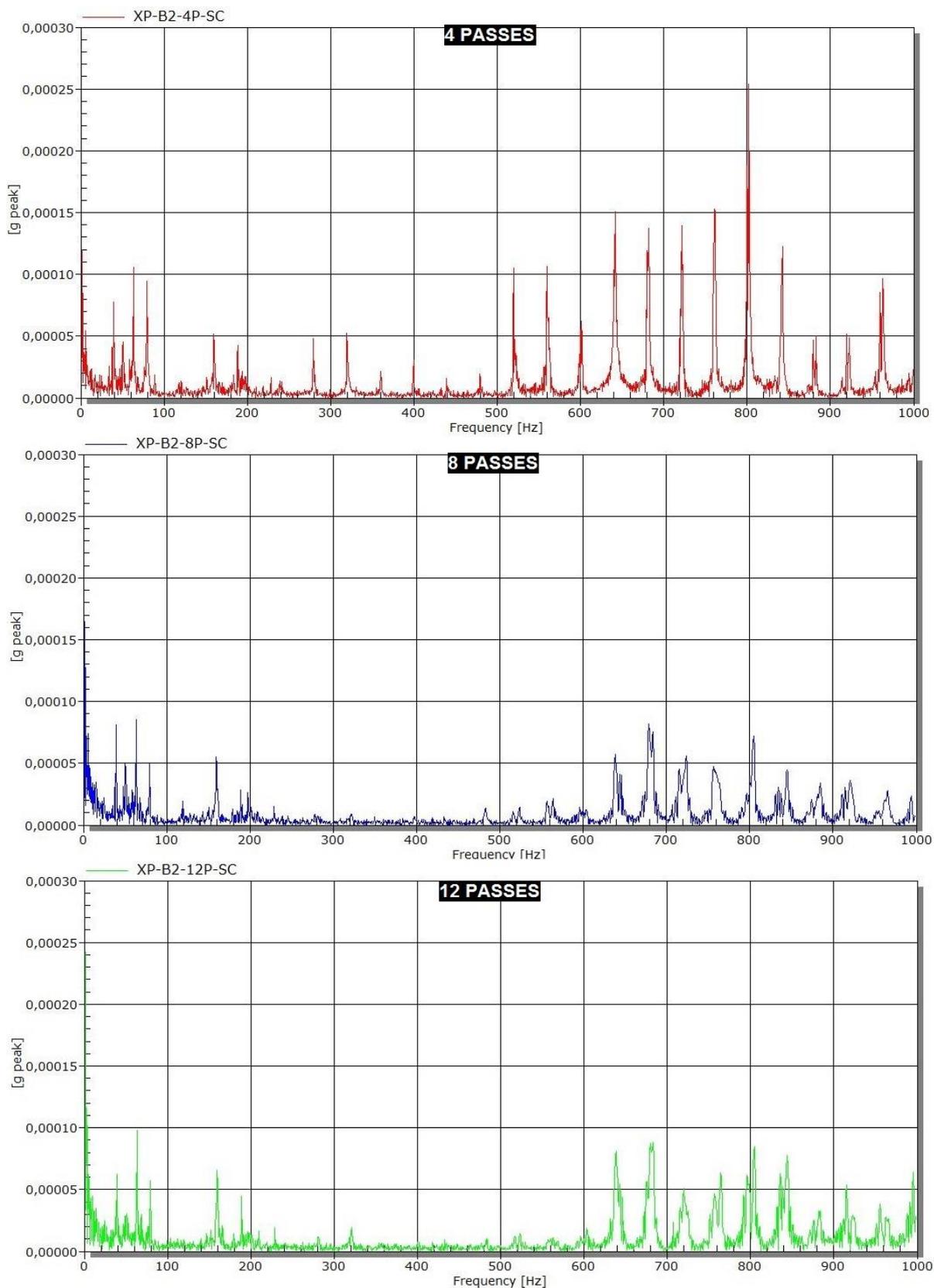
Fonte: Próprio autor.

Figura 57 – Amplitude em função das frequências durante o fresamento da região B1 no corpo de prova sem canais.



Fonte: Próprio autor.

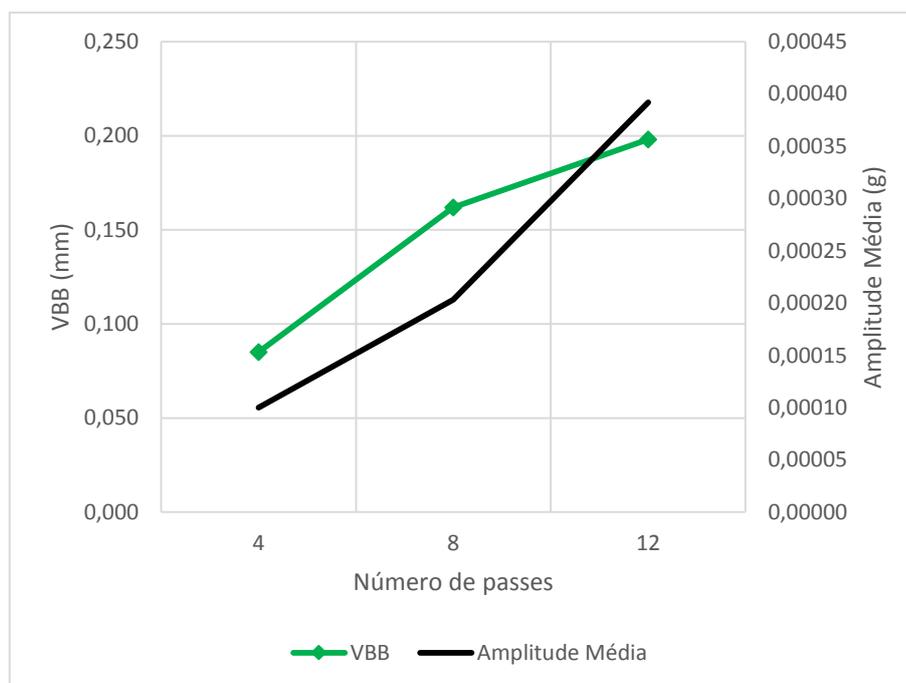
Figura 58 – Amplitude em função das frequências durante o fresamento da região B2 no corpo de prova sem canais.



Fonte: Próprio autor.

Nas barras com canais o comportamento foi diferente, pois observou-se um aumento nas amplitudes médias de vibração ao longo dos passes, na faixa de frequências da peça. Assim como na barra sem canais, nota-se o deslocamento do pico de amplitude máxima, sendo percebido em valores de frequência cada vez mais altas, ao longo dos passes da ferramenta. Entretanto, os impactos gerados pelo maior número de entradas e saídas da ferramenta de corte, contribui de forma mais significativa, comparado ao aumento de rigidez e diminuição de massa, provocando instabilidade no sistema e o conseqüente aumento nas amplitudes. Na Figura 59, pode-se observar o gráfico das amplitudes médias de vibração em função do número de passes, juntamente com o gráfico para o desgaste de flanco.

Figura 59 – Amplitude média de vibração em função do número de passes da ferramenta no corpo de prova com canais.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 60 observam-se os gráficos de amplitude em função das frequências excitadas, gerados para o eixo X da peça, durante o fresamento da região C, do corpo de prova com canais. Foram destacados os valores das frequências de trabalho e o deslocamento do pico de amplitude máxima na região das frequências da peça. Nos quatro primeiros passes o pico de amplitude aparece em 480Hz. Nos oito passes

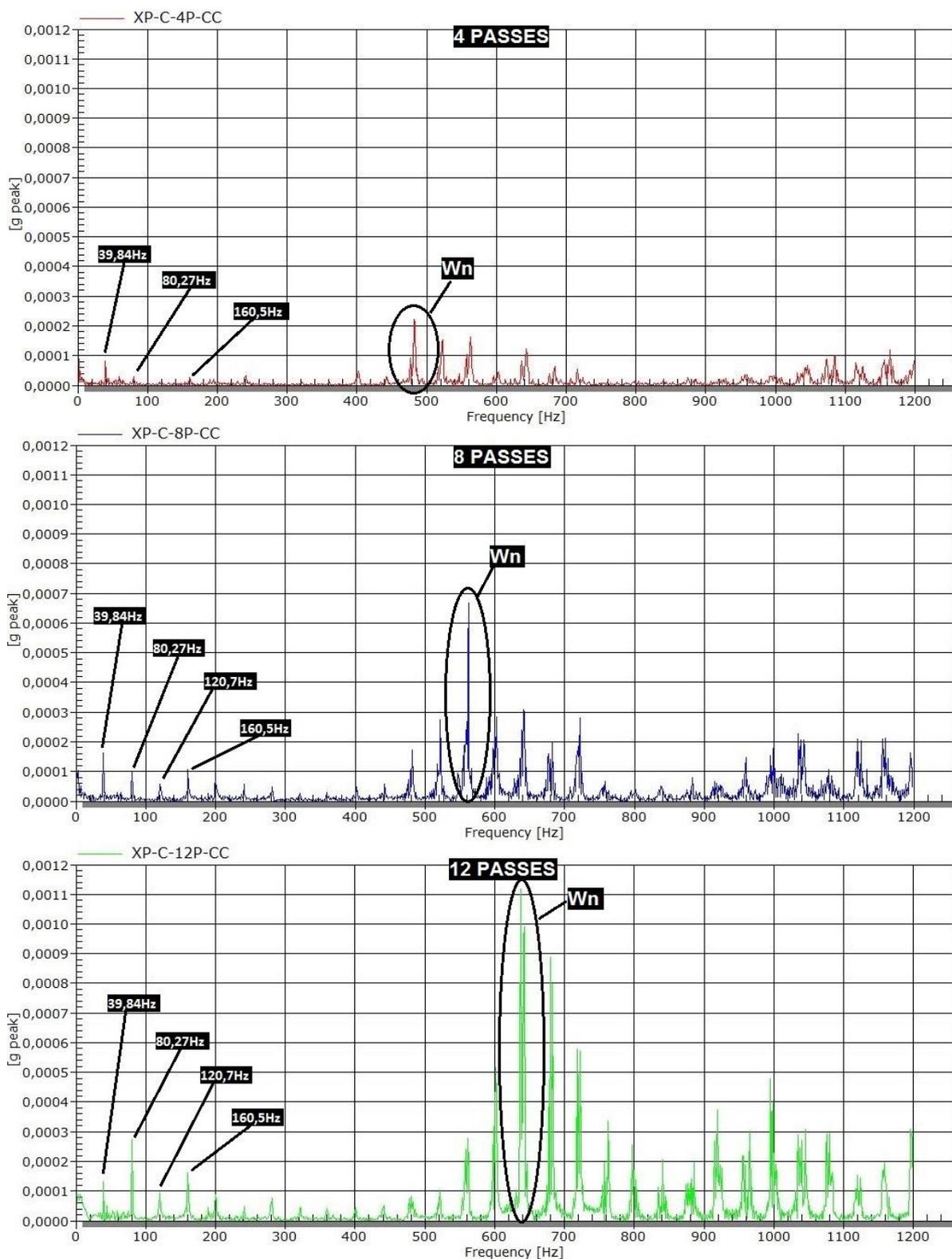
seguintes, a amplitude máxima aparece em 560Hz. Por fim, nos doze passes finais a amplitude máxima se dá na frequência excitada de 640Hz.

Para as outras regiões de fresamento da barra com canais, regiões B1 e B2, o comportamento foi semelhante, conforme pode ser visto nas Figuras 61 e 62.

Os sinais de vibrações coletados para os dois tipos de corpos de prova foram diferentes entre si, conforme os gráficos de resultados e as análises realizadas. Nas barras sem canais, nota-se pela curva de amplitudes médias na faixa de frequências da peça, um comportamento semelhante ao observado para o desgaste de flanco médio. Nos passes iniciais, observam-se valores altos para as amplitudes máximas, devido ao desgaste acentuado das ferramentas de corte. Com o decorrer do ensaio de fresamento há uma tendência à estabilização, sendo que esta situação corresponde à faixa de desgaste estacionário na curva para o desgaste de flanco.

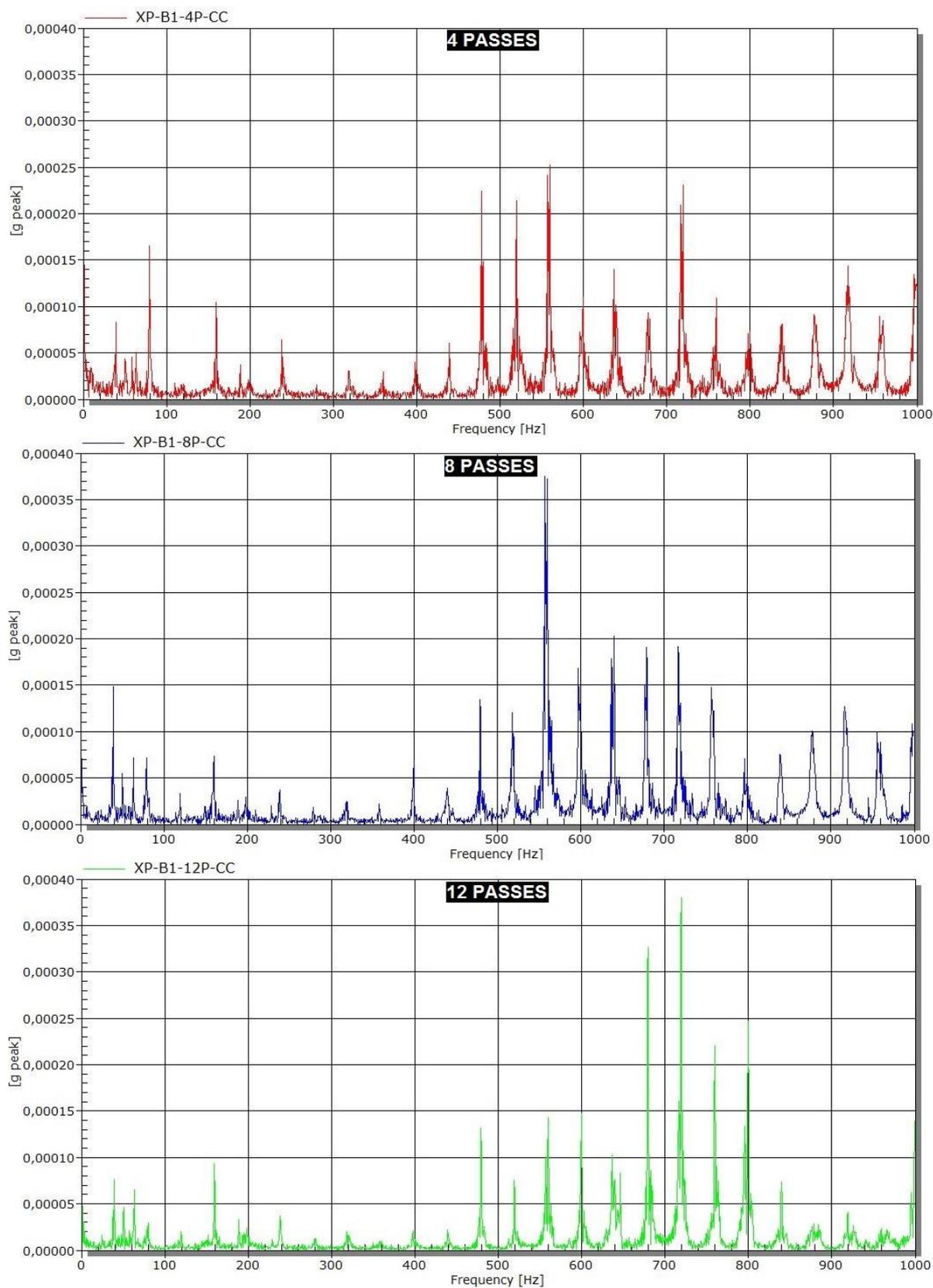
Nos corpos de prova com canais o comportamento é diferente, sendo que os valores para a amplitude máxima na faixa de frequências da peça, sempre aumentam ao longo dos passes. O maior número de impactos gerados nas entradas e saídas de corte ocasionam maior instabilidade ao sistema, notada pelo aumento nas amplitudes máximas, contribuindo de forma mais significativa para o desgaste das ferramentas. Ou seja, o aumento no número de impactos leva a um aumento na instabilidade do conjunto, provocando maior desgaste das ferramentas de corte.

Figura 60 – Amplitude em função das frequências excitadas ao longo dos passes na região C do corpo de prova com canais.



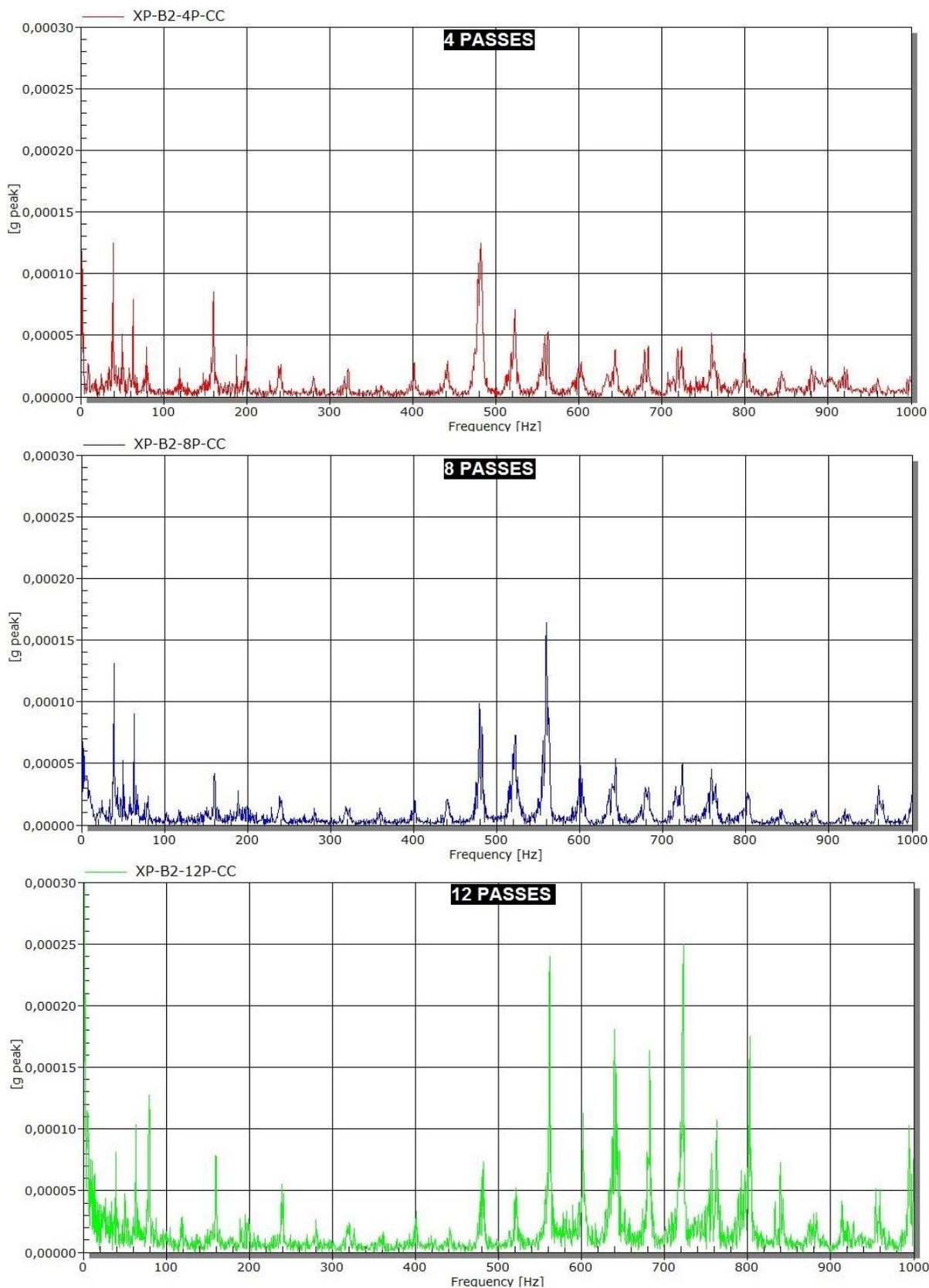
Fonte: Próprio autor.

Figura 61 – Amplitude em função das frequências durante o fresamento da região B1 no corpo de prova com canais.



Fonte: Próprio autor.

Figura 62 – Amplitude em função das frequências durante o fresamento da região B2 no corpo de prova com canais.



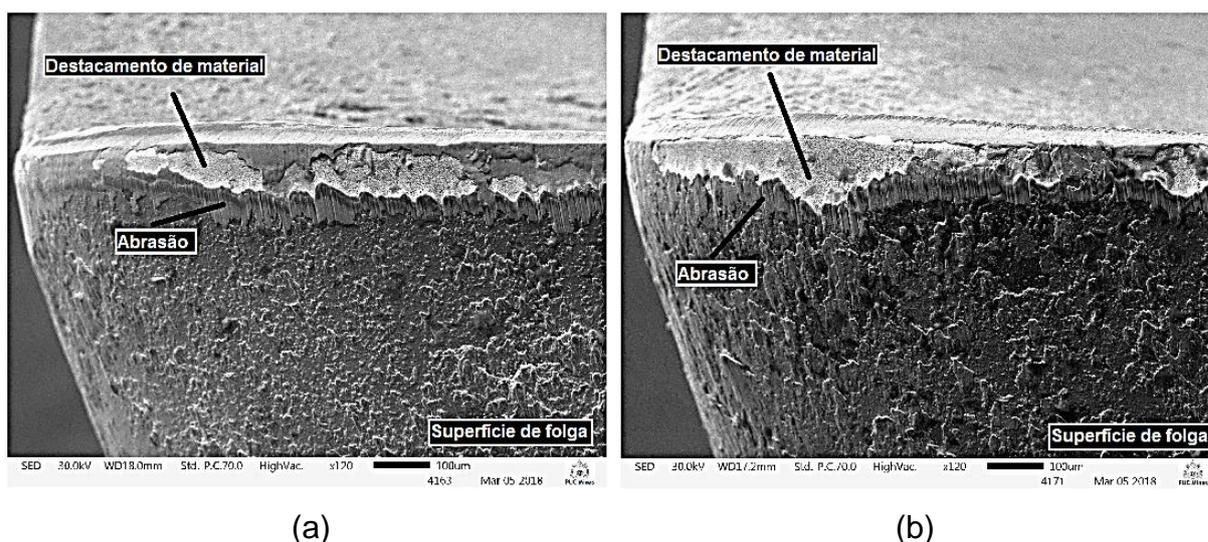
Fonte: Próprio autor.

4.6 Análise da condição final das ferramentas de corte.

Neste item são apresentadas as condições finais dos grupos de ferramentas de corte observadas no microscópio eletrônico de varredura. Foram registradas imagens de todas as ferramentas após o final dos ensaios, com o intuito de analisar o aspecto final e compará-los para as diferentes condições de fresamento propostos para o trabalho. As ferramentas de cada conjunto apresentaram comportamentos semelhantes quanto aos mecanismos de desgaste, sendo que os mecanismos de desgaste por abrasão e por adesão foram os mais facilmente identificados.

Na Figura 63 estão as imagens obtidas das ferramentas de classe P20 ao final do fresamento dos corpos de prova com diferentes geometrias. É possível notar a maior área de destacamento de material no fresamento do corpo de prova com canais, sendo que o maior número de impactos gerados durante o fresamento deste corpo de prova é o principal responsável por esta diferença. As marcas em forma de sulcos, ou microlascamentos observados são originados pelo mecanismo de desgaste abrasivo, que atua na superfície de folga das ferramentas na direção do fluxo de saída de cavaco. No geral, o aspecto final das ferramentas de corte nestes dois grupos foi semelhante.

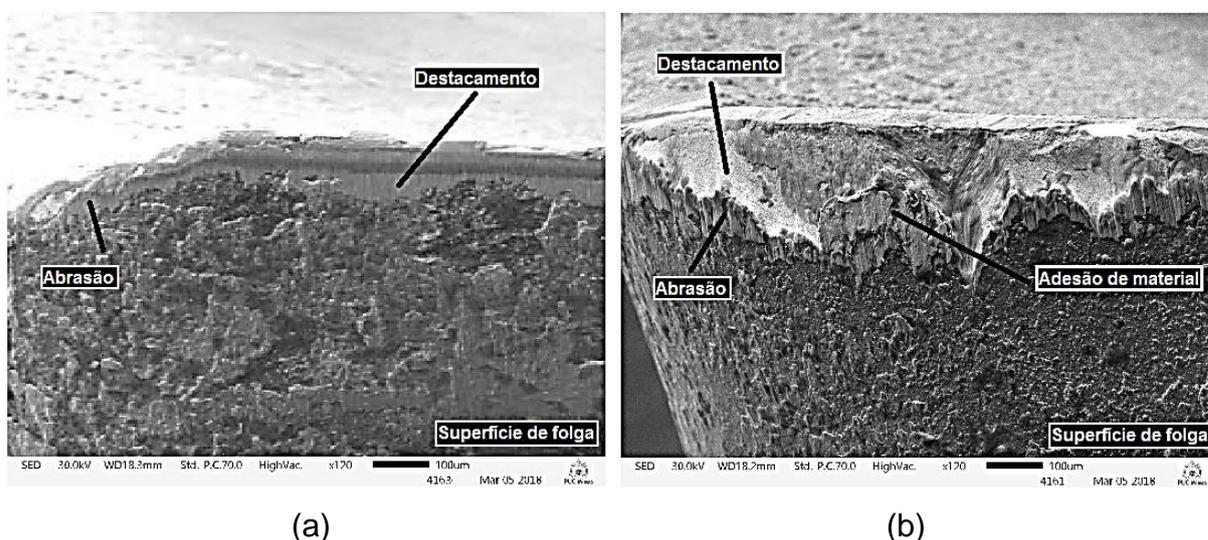
Figura 63 – Condição final das ferramentas P20 após o fresamento de diferentes geometrias: (a) Sem canais; (b) Com canais.



Fonte: MEV/PUC-Minas, aumento de 120x.

Analisando a condição final das ferramentas da classe P40, na Figura 64, os mecanismos e formas de desgaste apresentados em ambas as condições foi bem semelhante. Assim como para a classe anterior, foi observada a presença de desgaste abrasivo, entretanto de forma mais atuante, visto que esta classe de ferramentas possui menor dureza. Também foi observada a presença do mecanismo de desgaste adesivo de forma mais acentuada, com o aparecimento do desgaste de entalhe. Em contrapartida as áreas de destacamento de material foram menores em comparação com a classe P20, que possuem maior dureza e são menos resistentes aos choques mecânicos.

Figura 64 – Condição final das ferramentas P40 após o fresamento de diferentes geometrias: (a) Sem canais; (b) Com canais.

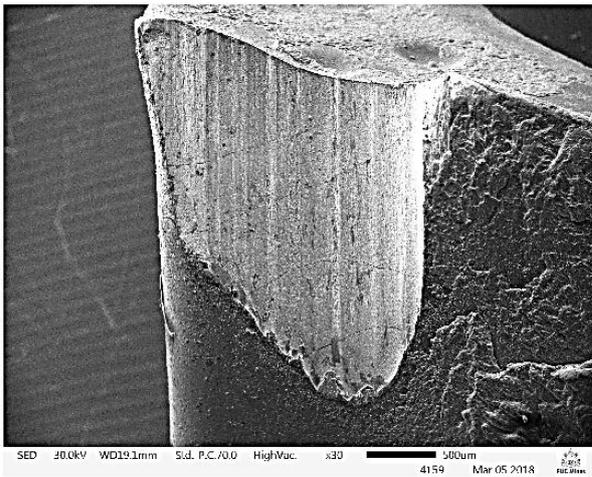


Fonte: MEV/PUC-Minas, aumento de 120x.

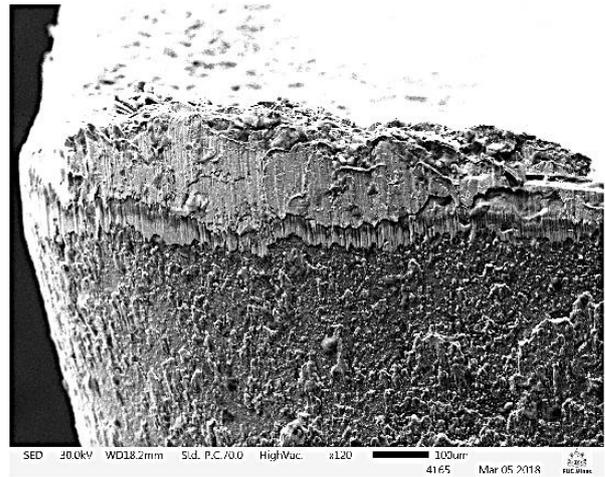
4.6.1 Três casos particulares observados no MEV.

Três casos particulares foram observados quanto ao estado final das ferramentas de corte, eles podem ser analisados na Figura 65. O primeiro caso foi o lascamento da ferramenta de número 6, da classe P20, que por possuir maior dureza está mais sujeita a sofrer quebras e lascamentos durante o corte. O segundo foi o aparecimento de desgaste adesivo bem intensificado nas ferramentas da classe P40. A terceira situação, também ocorrida nas ferramentas da classe P40 durante o fresamento da peça com canais, foi o aparecimento do desgaste de entalhe na região de profundidade de corte máxima, gerando deformação no flanco da ferramenta.

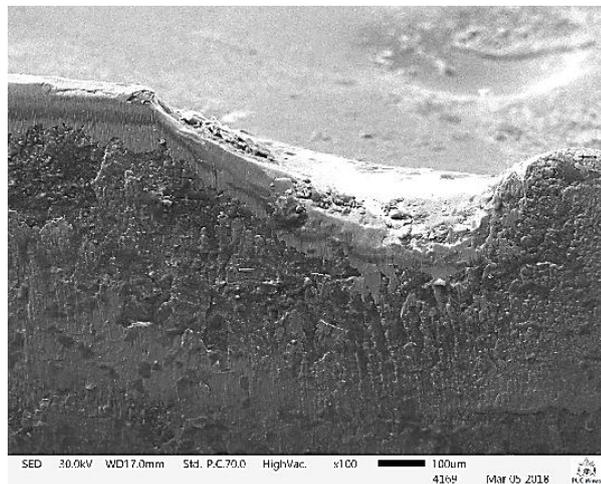
Figura 65 – Três casos particulares: (a) Lascamento da ferramenta 6; (b) Desgaste adesivo; (c) Desgaste de entalhe nas ferramentas P40.



(a)



(b)



(c)

Fonte: MEV/PUC-Minas.

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- O número de entradas e saídas de corte foi o fator de maior relevância quanto ao desgaste das ferramentas de corte durante o fresamento de diferentes geometrias.
- Comparando os conjuntos de ferramentas de mesma classe, os maiores valores para o desgaste de flanco e perda de massa, foram atingidos pelas ferramentas utilizadas no fresamento dos corpos de prova com canais.
- Entre as diferentes classes de ferramentas, os melhores desempenhos foram alcançados pelas ferramentas da classe P20 pois, por possuírem maior dureza, são mais resistentes ao desgaste de flanco.
- As ferramentas da classe P40 tiveram maior desgaste de flanco médio, entretanto, perderam menos massa ao longo dos ensaios, pois sofrem menos com quebras e microlascamentos.
- Os mecanismos de desgaste identificados foram o desgaste abrasivo e o desgaste adesivo, que geraram principalmente o desgaste no flanco das ferramentas.
- Houve regiões de destacamento do material de revestimento, com maior abrangência nas ferramentas da classe P20, que são mais frágeis. Em contrapartida as ferramentas da classe P40 sofreram mais com o desgaste abrasivo e adesivo.
- Nas barras sem canais observou-se menor amplitude de vibração mecânica ao longo dos passes, ou seja, o desgaste de flanco não é mais significativo do que o aumento na rigidez do conjunto, por exemplo.
- Nas barras com canais o maior número de impactos leva a um aumento na instabilidade do conjunto, provocando maior desgaste das ferramentas de corte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASM HANDBOOK. **Volume 16: Machining**. 9. ed. Novelty: Asm International, 1989. 1089 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-6162: Movimentos e Relações Geométricas na Usinagem dos Metais**. São Paulo: Abnt, 1989.

BARBOSA, Rodrigo da Silva. **Avaliação dos esforços de corte no fresamento frontal da liga de alumínio-silício (A356) quando mantido constante a produção de peças**. 2014. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del-rei, São João del Rei, 2014.

BJURKA, Emelie. **Analyze of insert geometries, wear types and insert life in milling**. 2011. 67 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Mecânica Aplicada, Chalmers University Of Technology, Göteborg, 2011.

BUSTAMANTE, Guilherme Duca. **Influência das dimensões da peça na evolução do desgaste de ferramentas de corte no processo de fresamento**. 2017. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

CHENG, K. **Machining Dynamics – Fundamentals, Applications and Practices**. Londres: Springer, 2009.

CUI, Xiaobin; ZHAO, Jun; TIAN, Xianhua. Cutting forces, chip formation, and tool wear in high-speed face milling of AISI H13 steel with CBN. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 64, n. 9-12, p.1737-1749, 28 abr. 2012.

DINIZ, Anselmo Eduardo; CALDEIRANI FILHO, José. Influence of the relative positions of tool and workpiece on tool life, tool wear and surface finish in the face milling process. **Wear**, [s.l.], v. 232, n. 1, p.67-75, set. 1999.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2013. 272 p.

DUARTE, Marcus Antônio Viana; MEOLA, Tatiana (Ed.). **Curso de Planejamento Experimental**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

ESTADÃO (São Paulo). **Participação da indústria manufatureira no PIB caiu em 2010, diz IABr**. 2011. Disponível em: <<http://economia.estadao.com.br/noticias/negocios,participacao-da-industria-manufatureira-no-pib-caiu>>. Acesso em: 30 out. 2017.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1977. 751 p.

GU, J.; BARBER, G.; TUNG, S.; GU, R. Tool life and wear mechanism of uncoated and coated milling inserts. **Wear**, v. 225 – 229, p. 273-284, 1999.

GUZEEV, V. I.; PIMENOV, D. Yu.. Cutting force in face milling with tool wear. **Russian Engineering Research**, [s.l.], v. 31, n. 10, p.989-993, out. 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO-3685**: Tool-life testing with single-point turning tools. Geneva, 1977.

KALPAKIJAN, Serope; SCHMID, Steven R. **Manufacturing Engineering and Technology**. 5. ed. Upper Saddle River: Pearson Education, 2006. 1040 p.

LOPES, Cláudio Parreira. **Análise do desgaste de ferramentas no fresamento de engrenagens cônicas de grandes dimensões fundidas em aço ABNT 4140**. 2013. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del-rei, São João del Rei, 2013.

MACHADO, Álisson Rocha et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Editora Blucher, 2009. 371 p.

MELO, Anderson C. A. de et al. Some observations on wear and damages in cemented carbide tools. **Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering**, [s.l.], v. 28, n. 3, p.269-277, set. 2006.

MORE: Mecanismo online para referências, versão 2.0. Florianópolis: UFSC Rexlab, 2013. Disponível em: < <http://www.more.ufsc.br/> >. Acesso em: 03 abr. 2017.

MUÑOZ-ESCALONA, Patricia; DÍAZ, Nayarit; CASSIER, Zulay. Prediction of Tool Wear Mechanisms in Face Milling AISI 1045 Steel. **Journal Of Materials Engineering And Performance**, [s.l.], p.797-808, 24 maio 2011.

PALMAI, Z. Cutting Temperature in Intermittent Cutting. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 27, n.2, p. 261-274, 1987.

PORTAL METÁLICA. **Características das operações de fresamento**. Disponível em: <<http://wwwo.metallica.com.br/caracteristicas-das-operacoes-de-fresamento>>. Acesso em: 03 abr. 2017.

RODRIGUES, Marcelo Acacio et al. Tool life and wear mechanisms during Alloy 625 face milling. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 85, n. 5-8, p.1439-1448, 9 nov. 2015.

SANDVIK COROMANT. **Fatores que influenciam a vibração**. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/technologies/silent-tools/milling/factors_that_influence_vibration>. Acesso em: 10 abr. 2018.

SANDVIK COROMANT. **Fresamento: Ângulo de Posição**. Disponível em: <http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/getting_started/general_guidelines/entering_angle>. Acesso em: 04 abr. 2017.

SANDVIK COROMANT. **Manual Técnico de Usinagem**. São Paulo: Sandvik Coromant, 2010. 789 p.

SANDVIK COROMANT. **Rotating tools: milling**. Sweden, 2012. 359p.

SANTOS, Sandro Cardoso; SALES, Wisley Falco. **Fundamentos da usinagem dos materiais**. Belo Horizonte: Puc Minas, 2004. 276 p.

SCHEFFER, Cornelius; GIRDHAR, Paresh. **Practical Machinery Vibration Analysis & Predictive Maintenance**. Oxford: Elsevier, 2004. 264 p.

SILVA, Samuel da. **Vibrações Mecânicas**. Foz do Iguaçu: Unioeste, 2009. 151 p.

SILVA, Sandro da Costa. **Análise de desempenho de ferramentas de corte nos processos de desbaste e acabamento por fresamento de aço liga MnSi**. 2015. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

SIMUNOVIC, Katica; SIMUNOVIC, Goran; SARIC, Tomislav. Single and multiple goal optimization of structural steel face milling process considering different. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 94, p.321-329, maio 2015.

STEPHENSON, D. A., Agapiou J. S., **Metal cutting theory and practice**. 2ª Edição. ed. Taylor & Francis Group, 2006.

TRENT, E. M.; DEARNLEY, P. A. Wear mechanisms of coated carbide tools. **Metals Technology**, v.9, p.60-75, feb. 1982.

VIEIRA, J. M.; MACHADO, A. R.; EZUGWU, E. O.. Performance of cutting fluids during face milling of steels. **Journal Of Materials Processing Technology**. [s.l.], p. 244-251. out. 2001.

WANG, Z. Y.; SAHAY, C.; RAJURKAR, K. P. Tool Temperatures and Crack Development in Milling Cutters. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v.36, n.1, p.129-140, 1996.