



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA

MORGANA ALVES ZUMPARO

**QUALIDADE DE MANCAIS DE DESLIZAMENTO
BRUNIDOS COM DOIS TIPOS DE FERRAMENTAS**

FLORIANÓPOLIS

2020

Morgana Alves Zumpano

**QUALIDADE DE MANCAIS DE DESLIZAMENTO BRUNIDOS COM
DOIS TIPOS DE FERRAMENTAS**

Dissertação submetido (a) ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Fabio Antonio Xavier

Coorientador: Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner.

Florianópolis

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Zumpano, Morgana Alves
Qualidade de mancais de deslizamento brunidos com dois
tipos de ferramentas / Morgana Alves Zumpano ;
orientador, Fabio Antonio Xavier, coorientador, Walter
Lindolfo Weingaertner, 2020.
121 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2020.

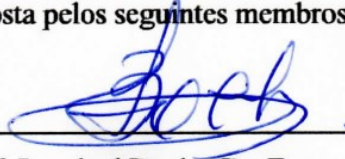
Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Brunimento. 3. Ferramenta. 4.
Textura. 5. Velocidade de corte. I. Xavier, Fabio Antonio.
II. Weingaertner, Walter Lindolfo . III. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica. IV. Título. |

Morgana Alves Zumpano

Qualidade de mancais de deslizamento brunidos com dois tipos de Ferramentas

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:



Prof. Lourival Bochs, Dr. Eng.

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Prof. Dr. Eng. Fabio Antonio Xavier

Orientador

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em engenharia mecânica.

Prof. Dr. Eng. Paulo de Tarso Rocha de Mendonça

Coordenador do Programa

Prof. Dr. Eng. Fabio Antonio Xavier

Orientador

Prof. Dr.-Ing Walter Lindolfo Weingaertner

Coorientador

Florianópolis, 27 de novembro de 2020.

Este trabalho é dedicado à minha família, meus pais,
irmã e meus queridos amigos de curso.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus orientadores Prof. Fabio Antonio Xavier e Prof. Walter Lindolfo Weingaertner pelo conhecimento transferido, pela paciência e atenção. Agradeço também a empresa parceira, pois sem ela não seria possível realizar este trabalho. Aos engenheiros e técnicos da empresa parceira pelo envolvimento e auxílio nos ensaios.

Sou imensamente grata aos amigos de curso: Michel Tavares, Matheus Carrara, Santiago Caraguay, Erick Ricardo e Ademir Luiz Dall-Astra que facilitaram esta caminhada com companheirismo, ajuda e torcendo por mim. Aos laboratórios LMP e LABMAT que me abriram as portas cedendo a sua estrutura. À CAPES pelo financiamento de bolsa de mestrado durante um ano.

Aos meus pais Orlando Saul Alves e Rita Tereza Zumpano Rodrigues pela instrução, responsabilidade e persistência passados ao longo dos anos na minha educação. Pelo incentivo e por conseguirem, com muito esforço, me manterem em Florianópolis para concluir esta dissertação. À minha irmã Paôla Alves Rodrigues pela paciência.

Ao meu marido Khalil Isidro Leal que não me deixou desistir mesmo diante da maternidade e me incentivou a concluir o mestrado, cuidando de mim e de nossa filha com muito carinho. Aos meus sogros Jorge Luiz Marafiga Leal e Soraya Alves Miguel Leal por ajudarem a cuidar da minha filha enquanto eu terminava de escrever a dissertação.

Por último e não menos importante, gostaria de agradecer a Deus que sempre esteve comigo, me dando saúde, força e fé para concluir este trabalho.

RESUMO

Alguns componentes mecânicos demandam tolerâncias de ordem micrométrica em seus projetos para garantir segurança, longevidade e confiabilidade ao produto final. Os mancais de deslizamento são exemplos de peças que precisam apresentar alta precisão dimensional, estreitas tolerâncias de forma e textura para garantir uma lubrificação adequada durante seu funcionamento. O brunimento de passe único é um processo de usinagem que permite atingir essas características. O brunimento é realizado ao final da produção e utiliza ferramentas de corte de geometria não definida para reduzir os erros de forma e melhorar a qualidade da superfície de um componente. Existem vários tipos de ferramentas que podem ser utilizadas neste processo. Sabendo que o projeto da ferramenta determina sua vida, custo e ainda está diretamente ligado à qualidade da peça, este estudo teve como objetivo comparar o comportamento de duas ferramentas: com múltiplas pastilhas e com bucha, pois apesar de serem ferramentas de desbaste, a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas permite maior produtividade, visto que pode ser utilizada em maiores velocidades, mas o seu custo é superior se comparado à ferramenta bucha. As ferramentas foram utilizadas no brunimento de passe único variando-se as velocidades tangencial e axial. A comparação foi realizada pela avaliação dos esforços gerados durante o processo, os resultados de rugosidade e os erros de forma obtidos nas peças fabricadas com cada uma das ferramentas. Como resultado desta pesquisa, verificou-se que a ferramenta bucha, além de não suportar a condição de corte no nível mais alto adotado, gerou rugosidades maiores. A ferramenta rígida de múltiplas pastilhas, apesar de gerar maiores forças ao longo do processo, produziu erros de forma menores e todos os parâmetros de rugosidade avaliados foram menores em relação à ferramenta bucha.

Palavras-chave: Brunimento, ferramentas, mancal de deslizamento, textura, velocidade de corte.

ABSTRACT

Some mechanical components require tolerances of micrometric order in their designs to guarantee safety, longevity and reliability to the final product. Sliding bearings are examples of parts that need to present high dimensional accuracy, close form tolerances and texture to ensure adequate lubrication during operation. Single pass honing is a machining process that allows you to achieve these characteristics. Honing is carried out at the end of production and using cutting tools of undefined geometry to reduce form errors and improve the surface quality of a component. There are several types of tools that can be used in this process. The design of the tool determines its life and cost and it is still directly linked to the quality of the part, therefore this study aimed to compare the behavior of two tools: honing stone type and brushing type. Despite being roughing tools, the honing stone tool allows greater productivity, since it can be used at higher speeds, but its cost is higher than the brushing tool. The tools were used in single pass honing, varying the tangential and axial speeds. The comparison was made by assessing the efforts generated during the process, the roughness results and the form errors obtained in the parts manufactured with each of the tools. As a result of this research, it was found that the brushing tool type, in addition to not supporting the cutting condition at the highest level adopted and generated greater roughness. The honing stone tool, despite generating greater forces along the process, produced minor errors and all the roughness parameters evaluated were lower compared to the brushing tool.

Keywords: Honing, tools, sliding bearing, texture, cutting speed.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 - Grandezas de entrada, de processo e resultado de trabalho no brunimento.....	21
Figura 2. 2 - a) Movimentos relativos no brunimento convencional. b) Velocidades no brunimento convencional e ângulo de cruzamento.....	24
Figura 2. 3 - Dependência entre o parâmetro de rugosidade (R_a) e a taxa de remoção de material (Q) para as ferramentas D181 (a) e D151 (b).	26
Figura 2. 4 - Dependência da rugosidade máxima (R_{max}) e a taxa de remoção de material (Q) para as ferramentas D181(a) e D151(b).....	27
Figura 2. 5 - Dependência da rugosidade (R_a) e da taxa de remoção do volume específico de material (Q_w) para as ferramentas D181 (a) e D151 (b).	27
Figura 2. 6 - Dependência da rugosidade máxima (R_{max}) e da taxa de remoção do volume específico de material (Q_w) para as ferramentas D181 (a) e D151 (b).	28
Figura 2. 7 - Movimentos relativos no brunimento de passe único.....	29
Figura 2. 8 - Representação de uma ferramenta <i>Precidor</i> expandida.	30
Figura 2. 9 - Fases do processo de brunimento.	31
Figura 2. 10 - Textura obtida pelo processo de brunimento a) de passe único e b) convencional.....	33
Figura 2. 11 - (a) Esforços gerados no brunimento, (b) Direção das forças e do momento em uma ferramenta de múltiplas pastilhas.	34
Figura 2. 12 - (a) Valores do coeficiente de atrito axial para os brunimentos de desbaste e de acabamento. (b) Valores do coeficiente de atrito tangencial para os brunimentos de desbaste e acabamento.	35
Figura 2. 13 - Comportamento dos esforços no brunimento de passe único.....	36
Figura 2. 14 - Variação da força de avanço e momento em relação ao sobrematerial removido no brunimento de passe único com a ferramenta <i>Precidor</i>	36
Figura 2. 15 - Força tangencial versus força normal para diferentes velocidades de corte.	37
Figura 2. 16- Ferramentas de brunimento com a) pastilha única b) duas pastilhas c) múltiplas pastilhas d) bucha abrasiva e) maciça (<i>single layer</i>).	38
Figura 2. 17 - Ferramenta de bucha abrasiva (a) com camisa cilíndrica; (b) com pastilhas; (c) com bucha seccionada helicoidalmente.	39

Figura 2. 18 - Esquema da ferramenta <i>Precidor</i>	40
Figura 3. 1 - Sequência das atividades realizadas no desenvolvimento do trabalho.	42
Figura 3. 2 - Centro de usinagem CNC 5 eixos MAZAK Variaxis J-600.	46
Figura 3. 3 - (a) Ferramenta com múltiplas pastilhas. (b) ferramenta com bucha.	47
Figura 3. 4 - Divisões das zonas na ferramenta rígida com múltiplas pastilhas. ..	48
Figura 3. 5 - Divisões das zonas na ferramenta bucha.	49
Figura 3. 6 - Desenho esquemático da vista inferior da ferramenta bucha com as divisões dos rasgos.	49
Figura 3. 7 - Micrografia da bucha de brunimento e análise química via energia dispersiva (EDS) de seu ligante.	50
Figura 3. 8 - Microestrutura do material do corpo de prova - Ferro Fundido Cinzento GG20.	51
Figura 3. 9 - Dimensões iniciais do corpo de prova utilizado nos ensaios.	52
Figura 3. 10 - Esquema do sistema de fixação dos corpos de prova.	53
Figura 3. 11 - Ferramenta rígida de múltiplas pastilhas fixa ao dinamômetro rotativo.	54
Figura 3. 12 - a) Condicionador de sinais b) Dinamômetro rotativo e estator (c) Dispositivo para aquisição de dados (DAD).	55
Figura 3. 13 - Esquemático da montagem do sistema de medição.	55
Figura 3. 14 - (a) Momento referente à ferramenta bucha. (b) Força axial referente à Bucha. (c) Momento correspondente à ferramenta com pastilhas. (d) Força axial equivalente à ferramenta com pastilhas.	57
Figura 3. 15 - Sinais filtrados com passa-baixa 70 Hz.	59
Figura 3. 16 - Posições de medição de circularidade e cilindricidade dos compôs de prova.	60
Figura 3. 17 - Perfilômetro Taylor Robson modelo Form Talysurf i120.	61
Figura 3. 18 - Perfil de rugosidade representativo para os diferentes ensaios, onde (a) corpo de prova, (b) sinal bruto do perfil, (c) perfil de rugosidade: filtro Gaussiano; <i>cut-off</i> : 0,8; <i>ln</i> : 4mm.	62
Figura 4. 1 – Comportamento da força axial e do momento em relação ao tempo na operação de brunimento de passe único com a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.	65

Figura 4. 2 - Força axial equivalente à (a) ferramenta rígida de múltiplas pastilhas (b) à ferramenta tipo Bucha.	66
Figura 4. 3 - Momento equivalente à (a) ferramenta rígida de múltiplas pastilhas; (b) à ferramenta tipo Bucha.	67
Figura 4. 4 - Resultados das forças axiais no brunimento com a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas (a) e com a ferramenta bucha (b) em função das velocidades tangenciais e de avanço.	68
Figura 4. 5 - Resultados das Forças de corte com a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas (a) e para ferramenta bucha (b) em função das velocidades tangenciais e de avanço.	69
Figura 4. 6 - Comparação da força axial para $v_a=3,3$ m/min.	72
Figura 4. 7 - Comparação da força de corte para $v_a=3,3$ m/min.	73
Figura 4. 8 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para F_c para a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.	74
Figura 4. 9 - Momentos no brunimento com a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas (a) e para ferramenta bucha (b) para as distintas velocidades tangenciais e de avanço.	75
Figura 4. 10 - Comparação de momento no brunimento dos furos para $v_a=3,3$ m/min.	77
Figura 4. 11 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para M_z para a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.	78
Figura 4. 12 - Resultados da cilindridade com a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas (a) e para ferramenta bucha (b) para as diferentes velocidades tangenciais e de avanço.	80
Figura 4. 13 - Comparação da cilindridade dos furos brunidos dos corpos de prova para $v_a=3,3$ m/min.	82
Figura 4. 14 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para cilindridade para a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.	83
Figura 4. 15 - Resultados da circularidade com a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas (a) e para ferramenta bucha (b) para as diferentes velocidades tangenciais e de avanço.	85
Figura 4. 16 - Comparação da circularidade dos furos para $v_a=3,3$ m/min.	85
Figura 4. 17 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para circularidade para a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.	86

Figura 4. 18 - Perfil de rugosidade gerado com cada ferramenta.	87
Figura 4. 19 - Resultados do parâmetro Ra gerados com a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas (a) e com a ferramenta Bucha (b).	88
Figura 4. 20 - Resultados do parâmetro Rz gerados com a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas (a) e com a ferramenta Bucha (b).	89
Figura 4. 21 - Comparação do parâmetro de rugosidade Ra dos furos para $v_a=3,3$ m/min.	91
Figura 4. 22 - Comparação de Rz dos furos para $v_a=3,3$ m/min.	91
Figura 4. 23 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para Ra para a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.	92
Figura 4. 24 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para Rz para a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.	93
Figura 4. 25 - Curva de Abbott para a ferramenta com múltiplas pastilhas.	94
Figura 4. 26 - Curva de Abbott para a ferramenta com bucha.	95
Figura 4. 27 - Resultados do parâmetro Rk gerados com a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas (a) e com a ferramenta bucha (b).	96
Figura 4. 28 - Resultados do parâmetro Rpk gerados com a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas (a) e com a ferramenta bucha (b).	96
Figura 4. 29 - Resultados do parâmetro Rvk gerados com a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas (a) e com a ferramenta bucha (b).	97
Figura 4. 30 - Comparação dos parâmetros da família Rk dos furos para $v_a=3,3$ m/min.	99
Figura 4. 31 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para Rk para a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.	100
Figura 4. 32 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para Rpk para a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.	100
Figura 4. 33 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para Rvk para a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 3. 1 - Parâmetros de entrada e resultados do processo analisado.	44
Tabela 3. 2 - Fatores e níveis utilizados nos ensaios de brunimento.	45
Tabela 3.3 - Especificações da ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.	47
Tabela 3. 4 - Especificações técnicas da ferramenta bucha.	49
Tabela 3. 5 - Composição química típica do FoFo GG20.	51
Tabela 3. 6 - Erro associado à medição com dinamômetro rotativo.	58
Tabela 4. 1 - Valor da taxa de remoção de material.	70
Tabela 4. 2 - Porcentagem de variação das forças em relação às velocidades tangencial e axial para ferramenta com pastilhas e com bucha.	71
Tabela 4. 3 - Análise de Variâncias de experimento quadrático completo para F_c da ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.	73
Tabela 4. 4 - Porcentagem de variação do momento em relação a variação da velocidade axial e tangencial para ferramenta com pastilhas e com bucha.	76
Tabela 4. 5 - Análise de Variâncias de experimento quadrático completo para M_z da ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.	78
Tabela 4. 6 - Variação em porcentagem da cilindricidade com a variação das velocidades para ferramenta com pastilhas e com bucha.	81
Tabela 4. 7 - Análise de Variâncias de experimento quadrático completo para cilindricidade da ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.	83
Tabela 4. 8 - Porcentagem de variação da circularidade em relação às velocidades tangencial e axial para ferramenta com pastilhas e com bucha.	84
Tabela 4. 9 - Análise de Variâncias de experimento quadrático completo para circularidade da ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.	86
Tabela 4. 10 - Porcentagem de variação de R_a e R_z em relação a variação da velocidade axial e tangencial para ferramenta com pastilhas e com bucha.	90
Tabela 4. 11 - Análise de Variâncias de experimento quadrático completo para R_a da ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.	92
Tabela 4. 12 - Análise de Variâncias de experimento quadrático completo para R_z da ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.	93

Tabela 4. 13 - Porcentagem de variação dos parâmetros da curva de Abbott em relação a variação da velocidade axial e tangencial para ferramenta com pastilhas e com bucha.....	98
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
cBN	<i>Cubic Boron Nitride</i>
CERTI	Centros de Tecnologias Inovadoras
CFC	Cúbico de Face Centrada
CNC	<i>Computer Numeric Control</i>
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
DAD	Dispositivo para Aquisição de Dados
DIN	Deutsches Institut für Normung
EMBRACO	Empresa Brasileira de Compressores
FEPA	Federation of the European Producers of Abrasives
FoFo	Ferro Fundido
IC	Intervalo de Confiança
Incl.	Industrial
ISO	International Organization for Standardization
LABMAT	Laboratório de Materiais
LMD	Laboratório de Metrologia Dimensional
LMP	Laboratório de Mecânica de Precisão
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MLR	Meio Lubrificadorrefrigerante
MMC	Máquina de Medições por Coordenada
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

LISTA DE SÍMBOLOS

A	[m ²]	Área de contato nominal da pastilha de brunimento
CYLt	[μm]	Cilindricidade de pico a vale
D	[μm]	Diâmetro médio de grãos de diamante
F _a	[N]	Força axial
F _c	[N]	Força de corte
F _n	[N]	Força normal
F _r	[N]	Resultante de F _a , F _t e F _n
F _t	[N]	Força tangencial
F _x	[N]	Componente da força de corte na direção x do dinamômetro
F _y	[N]	Componente da força de corte na direção y do dinamômetro
F _z	[N]	Componente da força de corte na direção z do dinamômetro
M _z	[Nm]	Momento
MS		Média quadrática
M _z	[Nm]	Momento em relação ao eixo z do dinamômetro
P _n	[Pa]	Pressão normal
Q̇	[mm ³ /s]	Taxa de remoção de material
R	[N]	Resultante de F _x e F _y
Ra	[μm]	Rugosidade aritmética média do perfil
Rq	[μm]	Rugosidade quadrática média do perfil
Rz	[μm]	Rugosidade de pico a vale no intervalo de amostragem
Rpk	[μm]	Altura reduzida dos picos
Rk	[μm]	Profundidade de rugosidade central
Rvk	[μm]	Profundidade reduzida dos vales
v _a	[mm/min]	Velocidade axial
v _c	[m/min]	Velocidade de corte
v _t	[m/min]	Velocidade tangencial
f _n	[Hz]	Frequência natural
l _n	[mm]	Comprimento de avaliação
l _h	[mm]	Comprimento da pastilha abrasiva
t	[s]	Tempo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS	19
1.1.1 Objetivo geral	19
1.1.2 Objetivos específicos	19
2 REFERENCIAL PARA PESQUISA	20
2.1 BRUNIMENTO	20
2.2 BRUNIMENTO DE CURSO CURTO OU <i>SUPERFINISHING</i>	22
2.3 BRUNIMENTO DE CURSO LONGO	23
2.3.1 Brunimento convencional	23
2.3.2 Brunimento de passe único	28
3 MÉTODOS, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	42
3.1 MÉTODOS E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	43
3.2 MÁQUINA-FERRAMENTA	46
3.3 FERRAMENTAS DE CORTE	47
3.3.1 Ferramenta de brunimento com múltiplas pastilhas	47
3.3.2 Bucha Superabrasiva	48
3.4 CORPO DE PROVA.....	50
3.4.1 Fixação dos corpos de prova	52
3.5 MEDIÇÃO DAS COMPONENTES DE FORÇA E MOMENTO	54
3.5.1 Processamento dos dados	56
3.6 MEDIÇÃO DOS ERROS DE FORMA.....	59
3.7 MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE	60
4 RESULTADOS	63
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO	63
4.2 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DA FORÇA E DO MOMENTO DE USINAGEM	65
4.2.1 Força de Corte e Força axial no brunimento	67
4.2.2 Momento Torçor no brunimento	74
4.3 ERROS DE FORMA	79
4.3.1 Cilindricidade	79
4.3.2 Circularidade	83
4.4 RUGOSIDADE.....	87

4.4.1	Rugosidade aritmética média do perfil (Ra) e da Rugosidade de pico a vale (Rz).....	88
4.4.2	Comportamento dos Parâmetros da curva de Abbott.....	94
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	102
5.1	CONCLUSÕES	102
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	103
	REFERÊNCIAS	105
	ANEXO I.....	111
	ANEXO II	112
	ANEXO III.....	114
	APÊNDICE A	116
	APÊNDICE B	117

1 INTRODUÇÃO

O brunimento é um processo de usinagem com ferramentas de geometria não definida muito utilizado na produção industrial, pois tem como objetivo a produção de superfícies funcionais e a garantia de alta qualidade geométrica e de forma para os componentes. É um processo que traz estabilidade e repetibilidade a produção, visto que é utilizado ao final da fabricação dos componentes que já apresentam alto valor agregado [1].

Este é um importante processo da indústria automobilística. Ele é utilizado na produção dos cilindros de motores de automóveis, pois gera uma superfície com riscos cruzados que possibilita a redução do atrito e do consumo de óleo. No Brasil, o brunimento é usado na produção de componentes de refrigeradores, como nos mancais de deslizamento e nos cilindros dos compressores, pois traz produtividade e confiabilidade à fabricação.

O brunimento utilizado na produção dos cilindros dos motores à combustão e dos compressores é o brunimento de curso longo. Ele pode ser dividido em duas categorias: o brunimento convencional e o de passe único. As principais diferenças entre ambos é o número de passes em cada processo, o diâmetro da ferramenta e o fato da ferramenta não se expandir durante a usinagem do furo. No brunimento de passe único a ferramenta, que possui um diâmetro previamente ajustado, transpassa somente uma vez a peça usinada e retorna à posição inicial. Nesse processo, se for necessário remover um volume maior de material, o diâmetro da ferramenta deve ser ajustado novamente ou várias ferramentas com diâmetros diferentes devem ser utilizadas em sequência [2].

Segundo Schmidt [3], a capacidade de não se expandir e contrair as partes de corte da ferramenta durante cada ciclo, combinada com a característica de baixo desgaste dos superabrasivos, permite ao processo de passe único manter o máximo controle do tamanho do furo. A parte frontal da ferramenta de passe único é projetada com uma conicidade que permite a ferramenta entrar guiada no furo pré-existente.

Segundo Peres [2], as variáveis de entrada que exercem maior influência sobre o desvio de circularidade do furo brunido são: a cilindricidade inicial, a combinação entre velocidade axial e tangencial e, por fim, o sobrematerial da peça, nesta ordem de relevância. Ademais, dentre as pesquisas mais recentes em brunimento com ferramentas abrasivas, Pereira *et al.* [4] investigaram o efeito que a rotação, a velocidade de avanço e o número de passes exercem sobre a rugosidade obtida em blocos de compressores herméticos de ferro fundido GG20 brunidos com ferramentas flexíveis. Baseado nos resultados obtidos, os autores concluíram que o número de passes é o fator mais influente sobre a rugosidade da superfície do mancal.

Freitas [5] analisou a influência do desgaste da ferramenta sobre os erros de forma e textura de furos de mancais de compressores, observando um comportamento aleatório nos desvios de forma e rugosidade dos mancais brunidos com ferramenta nova. Ademais, segundo o autor, a magnitude dos desvios de cilindridade do mancal brunido com uma ferramenta desgastada foi maior que aquela obtida no mancal brunido com ferramenta nova.

Pesquisas abrangendo o processo de brunimento e suas variáveis apresentaram um crescimento na última década, apesar desse processo ser utilizado na indústria constantemente. Freitas [5] verificou que o volume de publicações anuais sobre o processo de brunimento aumentou significativamente no ano de 2008 até 2018. Este fato mostra que existe um grande interesse da indústria e da comunidade acadêmica em conhecer mais sobre tal processo com o intuito de aplicar estes desenvolvimentos em suas linhas de produção para aumentar a produtividade, reduzir custos e aumentar da qualidade do produto.

Considerando os estudos supracitados, observou-se uma relativa dificuldade em encontrar trabalhos científicos relacionados ao brunimento de passe único. Além disso, não se encontrou na literatura estudos a respeito do efeito da configuração da ferramenta no resultado final da peça.

Devido às limitações de se encontrar literatura a respeito do brunimento de passe único e sabendo que o desempenho de uma ferramenta depende de sua configuração e da especificação e dimensões das pastilhas abrasivas [3] buscou-se avaliar a qualidade da superfície de mancais de deslizamento gerada com duas ferramentas diferentes que possuem a mesma função. Além disso, investigou-se a influência dos parâmetros de corte (velocidade tangencial e axial) sobre os esforços de corte, a rugosidade, os desvios de circularidade e cilindridade ao longo do brunimento de passe único com ambas às ferramentas.

Outra razão que levou à execução desta pesquisa foi o interesse de uma empresa parceira, em obter maiores conhecimentos a respeito deste processo e das superfícies produzidas com tais ferramentas. Pois, o brunimento de passe único é aplicado na produção de seus mancais de deslizamento. Ao se concluir este estudo, será possível qualificar qual ferramenta gerou uma peça mais funcional e quais parâmetros de corte operam melhor para cada ferramenta.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar a superfície gerada com dois tipos de ferramenta (rígida de múltiplas pastilhas e bucha), de forma a avaliar o desempenho de cada uma no brunimento de mancais de deslizamento de ferro fundido cinzento.

1.1.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral proposto, foi necessário alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Medir e caracterizar o perfil da força de corte (F_c) e o momento de corte (M_z) com cada ferramenta durante o processo de brunimento de passe único.
- Avaliar os desvios de cilíndricidade e circularidade das peças brunidas.
- Avaliar a rugosidade das peças brunidas por meio dos parâmetros da Curva de Abbott (Rpk , Rk , Rvk), Ra e Rt nas regiões inicial e final do furo;
- Correlacionar os esforços de corte e a rugosidade gerada pelo processo de brunimento com as propriedades da ferramenta como ligante e granulometria.

2 REFERENCIAL PARA PESQUISA

O objetivo deste capítulo é apresentar as características do processo de brunimento, suas variações, ferramentas empregadas, forças e cinemática do processo, com o foco no processo de brunimento de passe único, pois é o processo utilizado nesse estudo. Ainda serão apresentados estudos referentes às componentes da força de usinagem, a textura da superfície e os desvios de formas gerados por este processo.

2.1 BRUNIMENTO

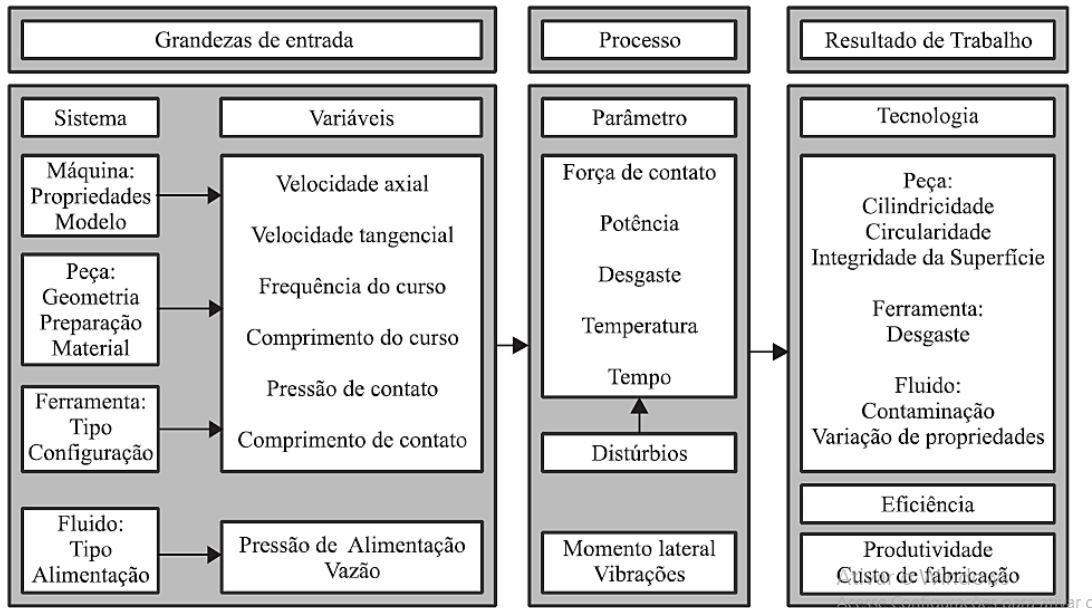
O brunimento é um processo de usinagem com ferramenta de corte de geometria não definida em que a remoção de material ocorre por meio da ação de grãos abrasivos de alta dureza unidos por um ligante. Esse importante processo é empregado na fabricação de peças com alta qualidade e precisão, ou seja, é usado para reduzir os erros de forma e melhorar a qualidade da superfície de um componente. Ele permite a obtenção de peças com estreitas tolerâncias dimensionais ($<10\ \mu\text{m}$), de forma, rugosidade e integridade da superfície [6].

O processo de brunimento é utilizado principalmente em cilindros de motores de combustão interna e em compressores, pois gera uma superfície que possibilita a redução do atrito e do consumo de óleo [7]. O brunimento é um processo de acabamento empregado na sequência de um processo como mandrilamento, alargamento ou retificação.

Segundo König [8], o resultado obtido pelo processo de brunimento é determinado por duas grandezas de entrada: as do sistema e as ajustáveis do processo. As grandezas do sistema contêm os parâmetros do processo determinados pela máquina-ferramenta, peça, ferramenta e fluido de corte. As grandezas ajustáveis do processo são compreendidas pela cinemática e a remoção de material durante o processo. Estes parâmetros são: velocidade de corte, avanço e sobremetal removido por ciclo.

Além das grandezas variáveis de entrada, o brunimento apresenta as grandezas características, referentes ao processo e ao resultado de trabalho. Essas grandezas são mensuráveis ao longo do processo, como a força de avanço, o momento torsor e o desgaste da ferramenta. As grandezas do resultado de trabalho se referem às características mensuráveis da peça brunida, ao desgaste final da ferramenta e à produtividade. Na Figura 2. 1 são apresentadas as grandezas características do processo de brunimento.

Figura 2. 1 - Grandezas de entrada, de processo e resultado de trabalho no brunimento.



Fonte: adaptado de [8].

O brunimento é mais utilizado no acabamento de superfícies cilíndricas de furos, porém, também é aplicado a superfícies cilíndricas externas. Ele é empregado na produção de engrenagens, pistas de rolamentos, superfícies de componentes de válvulas, mancais de compressores herméticos, furos de bielas, camisas de cilindros de motores a combustão, cilindros de freios e eixos [2,8,9]. O processo tem a capacidade de usinar furos com uma ampla gama de diâmetros, desde 0,6 mm a 2000 mm [2,3].

Segundo Klocke [10], o processo de brunimento é dividido em três grupos principais:

- Brunimento de curso longo;
- Brunimento de curso curto ou superacabamento (*superfinishing*);
- Brunimento de engrenagens.

Na Tabela 2. 1 são apresentados alguns tipos e variações de brunimento com suas aplicações, vantagens e desvantagens.

Tabela 2. 1 - Tipos de brunimento e suas variações.

Método	Área de aplicação	Vantagens	Desvantagens
Brunimento de curso longo	Furos em bielas, camisas de cilindro, tambores de freios.	Curto tempo de brunimento, elevada taxa de remoção. Correção de erros circularidade, forma e dimensão.	Não é possível corrigir erros de posição e desalinhamento, limitada área de aplicação.
Brunimento de curso curto	Virabrequins, eixos no geral.	Possível brunimento de mergulho e longitudinal, pode ser executada em torno, brunimento de peças grandes.	Não adequada para produção em massa devido ao longo tempo de produção.
Brunimento <i>centerless</i> de mergulho	Eixos pequenos, eixos de uma forma geral.	Curto tempo de produção, centragem não é necessária, possibilidade de automação, boa qualidade da superfície usinada.	São necessários encostos laterais, defeitos dos cilindros de apoio podem ser transmitidos para superfície da peça.
Brunimento plano com cinemática de lapidação	Guias, vedação de superfícies, faces frontais de bombas de engrenagens.	Maior taxa de remoção de material comparado a lapidação, portanto, grande economia de tempo.	Aplicável apenas em casos especiais.
Brunimento de engrenagens	Acabamento de engrenagens.	Tempos curtos de produção, automação possível, erros existentes de forma são corrigíveis.	Não é adequado para produção unitária.
Brunimento <i>centerless</i> de passagem	Pinos, hastes, válvulas de pistão hidráulicos e pneumáticos para atuadores, eixos, rolamentos.	Tempo não produtivo mínimo, uso simultâneo de diversas pedras de brunir possível, automação possível, boa qualidade da superfície usinada.	Não é adequado para produção unitária.
Brunimento de perfil	Trajetórias internas e externas de pistas de rolamentos.	Automação possível, produção em grandes quantidades.	Erros existentes na forma do perfil não podem ser corrigidos.

Fonte: adaptado de [10].

A seguir serão descritos os dois principais tipos de brunimento utilizados na produção de cilindros e pistões, apresentados por Klocke [10]: o brunimento de curso curto e de curso longo.

2.2 BRUNIMENTO DE CURSO CURTO OU *SUPERFINISHING*

O brunimento de curso curto é caracterizado pela oscilação de alta frequência e baixa amplitude de uma pedra abrasiva sobre a superfície de uma peça em movimento relativo. O movimento pode ou não ser acompanhado de um curso longo complementar. O processo remove uma camada de material deixada pela operação anterior, expondo uma superfície com uma textura funcional e corrigindo pequenos desvios da forma da peça. Esse processo possibi-

lita a obtenção de superfícies opticamente refletivas, livres de metal fragmentado e resíduos das operações anteriores utilizando pastilhas abrasivas de granulometria extremamente finas. O processo é utilizado para peças esféricas e planas empregando ferramentas em forma de copo e disco [10].

O *superfinishing* é dependente das características da superfície da peça obtidas na operação anterior. Peças com rugosidade alta, mas com pouco material a ser removido podem não ter todas as irregularidades removidas e manter a tolerância dimensional. Por outro lado, peças com rugosidade muito baixa podem não fornecer uma pressão de contato inicial para que a ferramenta seja dressada na fase do contato inicial [11].

2.3 BRUNIMENTO DE CURSO LONGO

O brunimento de curso longo permite aumentar a precisão dimensional e de forma da peça, além de gerar uma topografia funcional na superfície apropriada para a aplicação do componente, de forma rápida e econômica. Neste processo, a ferramenta executa tanto o movimento de rotação quanto o movimento de avanço axial ou longitudinal. Esse processo é utilizado principalmente para o acabamento de superfícies cilíndricas de furos, porém, também é aplicado a superfícies cilíndricas externas [2,6].

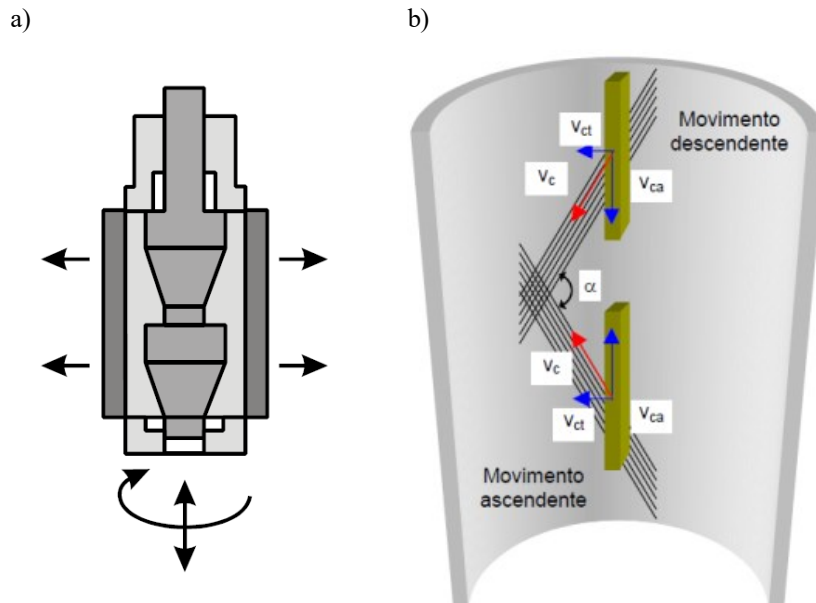
O brunimento de curso longo é dividido em dois grupos: brunimento convencional e brunimento de passe único. A diferença básica entre estas duas variantes do processo são os movimentos mecânicos realizados pela ferramenta [3].

2.3.1 Brunimento convencional

O processo de brunimento convencional é caracterizado por três movimentos conjuntos da ferramenta: rotação em torno do eixo, oscilação ao longo do eixo e avanço na direção radial (Figura 2. 2). Desse modo, a velocidade de corte (v_c) é calculada pela soma vetorial de duas componentes: a velocidade de rotação, periférica ou tangencial (v_{ct}) e a velocidade axial, de avanço ou de oscilação (v_{ca}).

O conhecimento da cinemática deste processo é importante, pois a velocidade de corte influencia na taxa de remoção de material, no desgaste da ferramenta, na qualidade da superfície e nas características geométricas da peça. A cinemática do processo proporciona a formação de riscos cruzados na superfície brunida [12].

Figura 2. 2 - a) Movimentos relativos no brunimento convencional. b) Velocidades no brunimento convencional e ângulo de cruzamento.



Fonte: [12] e [6].

O aumento da velocidade de corte influencia diretamente a taxa remoção de material no brunimento. A velocidade de oscilação afeta a ação do abrasivo, grandes velocidades de avanço aumentam a ação de autoafiação da pastilha abrasiva causando um aumento na rugosidade da superfície trabalhada. A ação de autoafiação consiste na recuperação da capacidade de corte através da remoção mecânica de grãos com gumes cegos, sendo que com este procedimento uma camada de abrasivos novos aflora na superfície de trabalho [8].

Altas velocidades de rotação contribuem para diminuir a precisão dimensional, superaquecendo a peça e cegando os abrasivos. O superaquecimento causa a deterioração do fluido de corte e distorções na peça, enquanto que o cegamento dos grãos afeta principalmente as dimensões finais [13]. O ângulo de cruzamento das ranhuras geradas pelo brunimento também é uma função das velocidades em grande parte dos casos, a cinemática do brunimento convencional proporciona uma superfície com linhas cruzadas que apresentam um valor de ângulo entre 45° e 60° [2,14].

Segundo Schmitt e Bähre [15], para o brunimento convencional de pequenos furos (\varnothing 2-12 mm) são utilizadas ferramentas de pastilha única equipadas com duas pedras guias. Com a rotação, o movimento axial do cone de avanço induz um movimento radial para as pastilhas de brunir. Este movimento é altamente importante para o processo de brunimento e pode ser controlado pela força ou pelo avanço da ferramenta.

A deformação elástica e plástica da peça, a formação de cavacos e a atrito entre a ferramenta e a peça influenciam as forças neste processo. Os esforços são fatores que afetam diretamente a taxa de remoção de material, a taxa de desgaste da pedra de brunir, a precisão da usinagem e a qualidade da superfície. Portanto, é importante a caracterização das forças no brunimento, pois elas são usadas para concluir sobre o mecanismo do brunimento, o desgaste da ferramenta, a interação entre peça e ferramenta, bem como sobre a superfície gerada. Com o conhecimento do comportamento das forças que atuam no brunimento e seus fatores é possível aperfeiçoar os parâmetros de processo. Atualmente, diversos estudos a respeito do processo de brunimento convencional estão ligados à modelagem computacional das variáveis do processo objetivando a otimização dos parâmetros de corte e assim da superfície gerada.

Biradar e Katikar [16] buscaram compreender quais os parâmetros de processo que afetavam mais os resultados do brunimento. Na análise da revisão da literatura realizada em seu trabalho, eles observaram que a maioria das pesquisas realizadas buscava melhorar os parâmetros de entrada como velocidade, tamanho do grão, pressão de contato, ângulo de cruzamento, tempo e número de cursos. Verificou-se também que os parâmetros mais significativos que afetam a rugosidade média (R_a) são a velocidade de corte, a pressão de contato e o tamanho do grão. O número de cursos não tem importância em termos de R_a . Já para a taxa de remoção de material o parâmetro mais significativo é a pressão de contato e o menos significativo é o número de cursos.

Moos e Bähre [17] fizeram um modelo analítico da ferramenta para estimar as forças e os momentos no brunimento considerando a força de avanço axial, o atrito e o torque constantes. Assim, eles verificaram que é possível, por meio deste modelo, melhorar o controle do processo, especialmente o controle do avanço da ferramenta, o que leva ao aumento da qualidade da superfície mesmo para tolerâncias pequenas.

Vrac *et al.* [18] verificaram a influência dos parâmetros de processo (v_c , granulometria da ferramenta e pressão específica do processo) sobre a qualidade da superfície, a produtividade e o ângulo de cruzamento no brunimento de cilindros de ferro fundido cinzento utilizando duas ferramentas com granulometrias distintas (D181 e D151). O estudo mostrou que os parâmetros mais influentes na profundidade máxima da rugosidade é a velocidade de corte para a ferramenta D181 e a pressão específica de brunimento para a ferramenta D151.

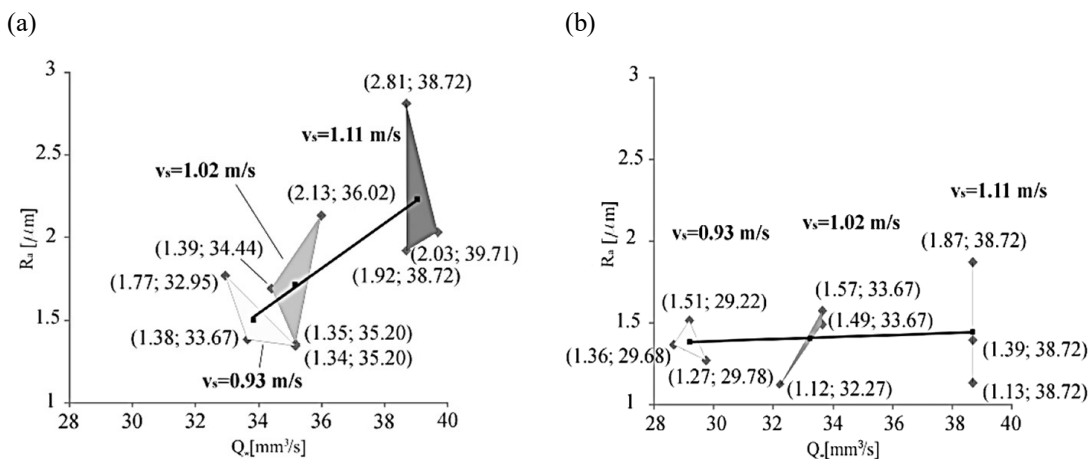
Esse estudo apresentou que os ângulos de cruzamento otimizados em cilindros de motores a diesel, aplicando o brunimento convencional estão entre 34° e 54° para a superfície das amostras brunidas com a ferramenta D181 e entre 36° e 55° para amostras brunidas com a ferramenta D151. Além disso, os autores observaram que é possível usar o brunimento con-

vencional para brunimento de desbaste e de acabamento e obter superfícies com uma boa qualidade.

Vrac, Sidjanin e Balos [19] estudaram a influência da velocidade de corte e do tamanho do grão na rugosidade e na taxa de remoção de material no brunimento. Eles concluíram que a velocidade de corte tem mais influência na relação entre a remoção de material e rugosidade em ferramentas com a granulometria maior do que em ferramentas de granulometria mais fina, ou seja, uma superfície com menores valores de rugosidade é obtida com mesma taxa de remoção de material por uma ferramenta com granulometria menor.

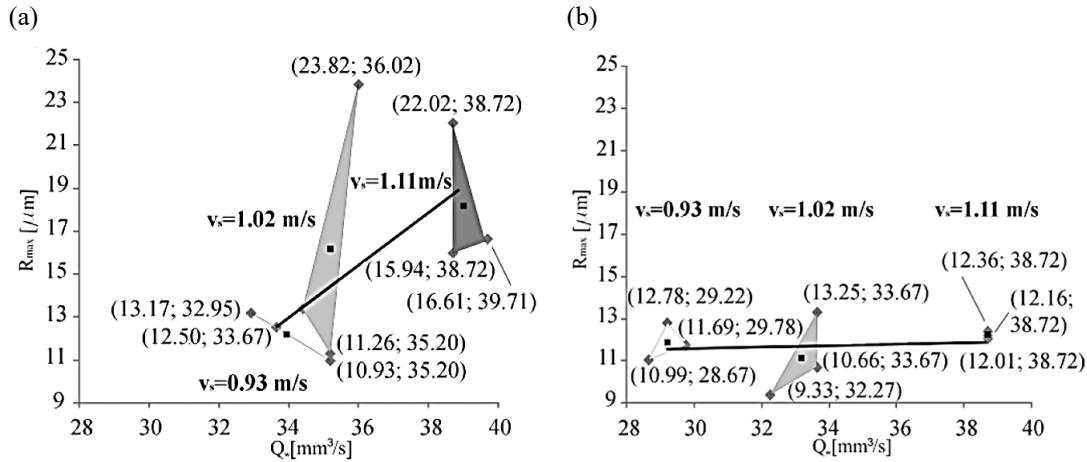
Nas Figura 2. 3 à Figura 2. 6 são apresentadas as relações dos parâmetros de rugosidade média e máxima (R_a e R_{max}) em relação à taxa de remoção de material. Os valores obtidos na investigação experimental são apresentados na forma de marcadores quadrados, enquanto os valores que correspondem à mesma velocidade de brunimento aplicada foram agrupados na forma triangular ou longitudinal. Os triângulos maiores indicam um maior desvio entre os resultados obtidos. Os centroides de cada triângulo definem linhas de tendência que descrevem a relação entre cada rugosidade e parâmetro de taxa de remoção de material. Segundo os autores, a linha horizontal corresponde ao caso em que o aumento da taxa de remoção de material não influencia o aumento da rugosidade [19].

Figura 2. 3 - Dependência entre o parâmetro de rugosidade (R_a) e a taxa de remoção de material (Q) para as ferramentas D181 (a) e D151 (b).



Fonte: [19].

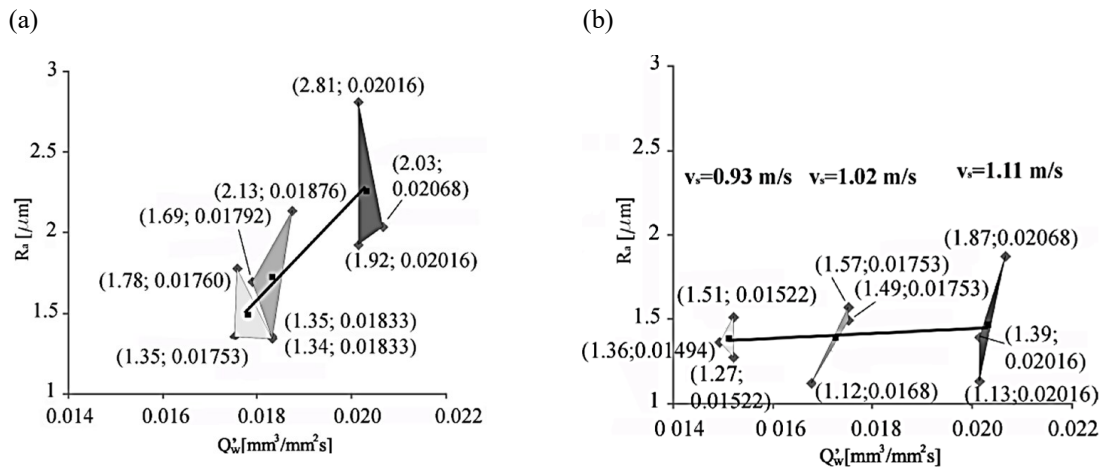
Figura 2. 4 - Dependência da rugosidade máxima (R_{max}) e a taxa de remoção de material (Q) para as ferramentas D181(a) e D151(b).



Fonte: [19].

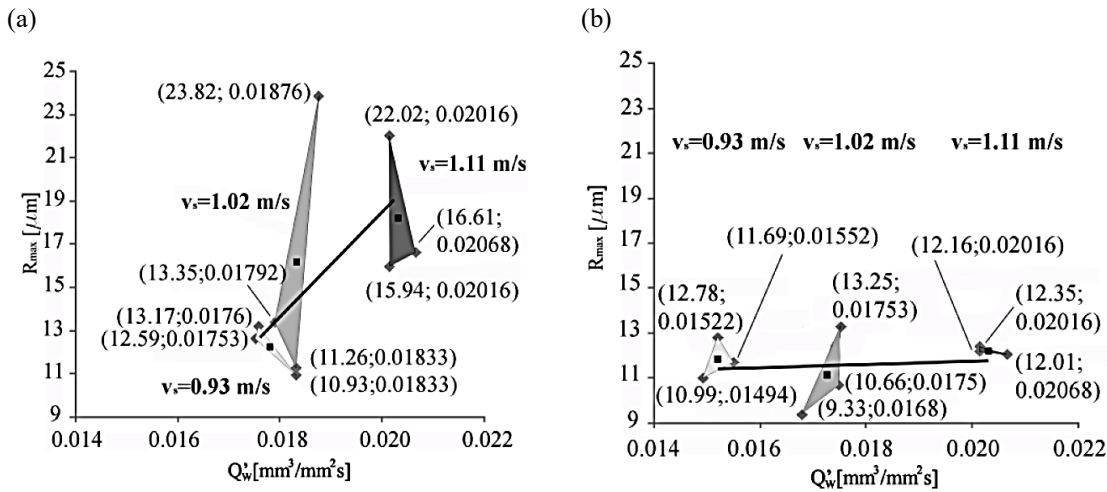
Os autores observaram que havia uma diferença considerável entre as ferramentas D181 e D151 com relação às linhas de tendência obtidas dos centroides dos triângulos. As linhas de tendência obtidas com a ferramenta D181 são mais inclinadas em comparação com as linhas de tendência correspondentes obtidas com a ferramenta D151, e as linhas de tendência obtidas a partir dos centroides com a ferramenta D151 são quase horizontais. Isto indica que a mudança no parâmetro de rugosidade é baixo quando há o aumento da taxa de remoção de material.

Figura 2. 5 - Dependência da rugosidade (R_a) e da taxa de remoção do volume específico de material (Q_w) para as ferramentas D181 (a) e D151 (b).



Fonte: [19].

Figura 2. 6 - Dependência da rugosidade máxima (R_{max}) e da taxa de remoção do volume específico de material (Q_w) para as ferramentas D181 (a) e D151 (b).



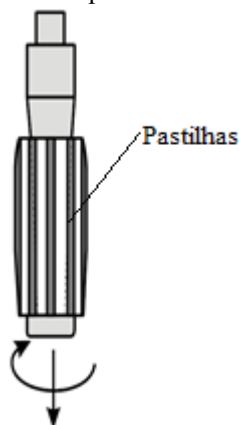
Fonte: [19].

As Figura 2. 3 à Figura 2. 6, mostram que os resultados de rugosidade média e máxima no pré-brunimento evidenciam diferenças mais significativas em um experimento com uma velocidade de brunimento constante para uma ferramenta com abrasivos com granulometria mais grossa do que para uma ferramenta com abrasivos com granulometria mais fina. Além disso, verificou-se que a ferramenta com abrasivos com granulometria mais fina e a velocidade de brunimento mais alta favorecem a obtenção de uma taxa de remoção de material maior com um aumento moderado dos parâmetros de rugosidade [19].

2.3.2 Brunimento de passe único

O brunimento de passe único ou *single pass honing* é uma variante do brunimento de curso longo. As principais diferenças entre ambos é o número de passes, a cinemática em cada passe e o diâmetro da ferramenta. Diferentemente do brunimento convencional, no processo de passe único a ferramenta não é expandida ao longo do processo: ela é rígida, e os movimentos realizados são apenas a rotação em torno do eixo e o avanço axial (Figura 2. 7) [3,14].

Figura 2. 7 - Movimentos relativos no brunimento de passe único.



Fonte: [12].

No brunimento de passe único, a ferramenta, que possui um diâmetro previamente ajustado, transpassa somente uma vez a peça usinada. Se uma quantidade maior de material necessita ser removida, o diâmetro da ferramenta deve ser ajustado novamente ou empregam-se várias ferramentas com diâmetros e granulometrias diferentes em sequência [3].

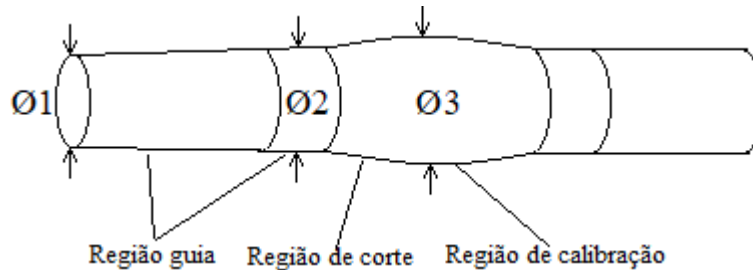
Em uma operação com várias ferramentas sequenciais, cada uma é ajustada para remover sua porção de material em quantidades sempre menores de acordo com a proximidade do diâmetro final do furo. Ferramentas com grãos maiores são utilizadas para maior remoção de material e ferramentas de grãos menores, para etapas de acabamento da superfície. Deste modo, a sequência de operações pode ser otimizada para uma maior eficiência do processo [3,14].

No processo com passe único, o volume de material que pode ser removido é limitado. Devido à alta rigidez das ferramentas, o volume de material a ser removido é baixo, exigindo que o volume e a dimensão dos cavacos produzidos sejam menores que o volume de poros vazios entre os grãos abrasivos da ferramenta. Se o volume dos cavacos for maior que o volume dos poros e espaços vazios entre os grãos, este volume é obstruído e o processo não tem mais continuidade, podendo levar ao engripamento da ferramenta dentro do furo. Por isso, o brunimento de passe único é recomendado em furos curtos, com pré-furos usinados com pequeno sobrematerial e estreitas tolerâncias dimensionais. O processo é muito empregado em peças de ferros fundidos [20,21].

O processo de brunimento de passe único utiliza uma ferramenta maciça, com um núcleo cônico. A parte ativa da ferramenta tem o formato de uma luva com furo cônico. O deslocamento da luva em relação ao núcleo permite ajustar o diâmetro de trabalho da ferramenta. A luva é recoberta com abrasivos de diamante ou cBN. Ela é configurada na parte frontal com

uma conicidade que permite que a ferramenta entre guiada no furo de modo a seguir a linha de centro do mesmo. A Figura 2. 8 apresenta uma ferramenta *Precidor* (*Präzisions Dorn Hohnen* - brunimento de precisão com ferramenta montada sobre mandril) após expansão estática através da movimentação do cone de avanço no interior de seu corpo.

Figura 2. 8 - Representação de uma ferramenta *Precidor* expandida.



Fonte: adaptado de [5]

A característica de baixo desgaste dos superabrasivos, permite ao processo de passe único manter o máximo controle do tamanho do furo e não exigir a expansão e contração da ferramenta durante o ciclo. Uma vez que este material é gradualmente removido pelos grãos distribuídos sobre toda a periferia da ferramenta, uma pequena quantidade de calor ou de níveis de tensão são gerados, possibilitando também um excelente controle da geometria do furo [2,3].

2.3.2.1 Cinemática do brunimento de passe único

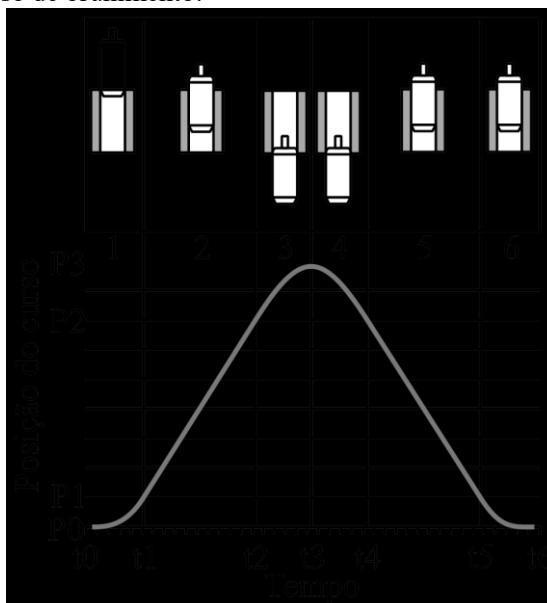
No brunimento de passe único dois movimentos regem o processo: a rotação e o avanço axial da ferramenta. A velocidade de corte (v_c) é formada pela soma vetorial de duas componentes: a velocidade de rotação, periférica ou tangencial (v_T) e a velocidade axial ou de oscilação (v_a), como apresentado na Equação 2.1.

$$v_c = \sqrt{v_a^2 + v_t^2} \quad (2.1)$$

O curso da ferramenta no brunimento possui seis fases (Figura 2. 9), sendo que cada fase corresponde a uma posição da ferramenta ao longo da profundidade do furo em um determinado tempo. A fase 1 representa o início do movimento (descida da ferramenta), quando a ferramenta se encontra no ponto morto superior P0 e começa a acelerar até chegar à velocidade do processo pré-determinada. A fase 2 começa na posição P1 e caracteriza o movimento de

descida da ferramenta com velocidade constante até o ponto P2, ponto em que a velocidade da ferramenta começará a diminuir. Na fase 3, começa a desaceleração da ferramenta do ponto P2 até o ponto morto inferior, P3. A fase 4 descreve o início do movimento de subida, onde a ferramenta acelera do ponto P3 de volta ao ponto P2, onde iniciará a fase 5. A fase 5 é caracterizada pelo movimento de subida com velocidade constante de P2 até P1. Na fase 6 ocorre, novamente, a desaceleração da ferramenta do ponto P1 de volta ao ponto morto superior P0 [22].

Figura 2. 9 - Fases do processo de brunimento.



Fonte: [5].

É notório que a velocidade de corte é uma grandeza de entrada que interfere significativamente no brunimento, pois sua alteração causa mudanças na taxa remoção de material do brunimento, no desgaste da ferramenta, na qualidade da superfície e nas características geométricas da peça. A textura da superfície também pode ser analisada como função da velocidade de corte.

Segundo Peres [2], ocorre uma redução da rugosidade com o aumento da velocidade de corte, assim, pode-se afirmar que a velocidade age de forma positiva sobre a qualidade da superfície da peça. O autor mostrou que a melhoria da cilindridade e da circularidade é também correlacionada com a composição da velocidade de corte.

A dependência entre o ângulo de cruzamento e o erro de forma é explicada pelo fato de que o volume efetivo usinado por unidade de tempo alcança valores maiores para o ângulo de cruzamento igual a 45° , na maioria dos processos de brunimento. Peres [2] observou que para

velocidades tangenciais mais baixas, o desgaste sofrido pela ferramenta era mais significativo que em altas velocidades, pois as solicitações mecânicas que incidem sobre os grãos, em tal condição, são elevadas e acarretam grandes níveis de desgaste.

2.3.2.2 Texturas produzidas pelo brunimento de passe único

A qualidade da superfície brunida é estabelecida em três níveis: macroscópico, microscópico e mesoscópico. A forma cilíndrica, no nível macroscópico, deve satisfazer os critérios dimensionais. A rugosidade, no nível microscópico, especificada em projeto deve ser alcançada e a aparência da textura da superfície, no nível mesoscópico, precisa ser atendida [14]. O brunimento proporciona uma topografia com rugosidades baixas, excelente comportamento de desgaste e redução significativa no nível de ruídos em motores a combustão. Ao longo do processo não ocorre oxidação e nem alteração da estrutura cristalina pela baixa geração de calor [2].

A superfície gerada com este processo proporciona uma boa área de suporte de carga e uma boa capacidade de retenção de óleo lubrificante. Tais requisitos são grandemente desejados para a aplicação desta textura em superfícies de deslizamento lubrificadas. Os processos de brunimento convencional e de passe único possuem capacidade para produzirem superfícies platafórmicas ou de platô. Onde, pequenos valores de Rpk , indicando grande capacidade de suporte, e grandes valores de Rvk , que indica a capacidade de retenção de lubrificante, são típicos [3].

No brunimento de passe único, o ângulo de cruzamento não é tão visível, pois a principal remoção de material é realizada pela ferramenta na entrada do furo. No retorno da ferramenta apenas poucos grãos mais protusos ainda realizam alguma remoção de material, provocando mais um efeito de alisamento do que de corte. O restante dos gumes apenas provocam uma deformação elástica do material na região de contato [2,3,5].

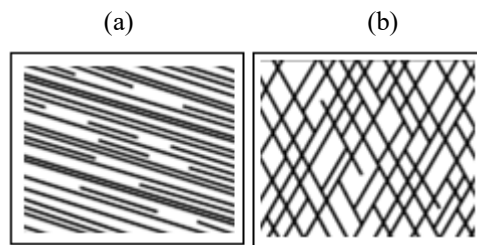
O ângulo de cruzamento, α , no brunimento é dependente das velocidades axial e tangencial do processo e é calculado através da Equação 2.2 [23]. Assim como no brunimento convencional, velocidades de oscilação mais altas criarão ângulos de cruzamento α maiores para uma velocidade periférica constante e, inversamente, aumentando a velocidade periférica para uma velocidade de oscilação constante, o ângulo de cruzamento α diminui [3].

$$\alpha = 2 \cdot \tan^{-1} \frac{v_a}{v_t} \quad (2.2)$$

No brunimento de passe único, o ângulo de cruzamento não é tão aparente devido à diferença de valor entre a velocidade tangencial e axial. A velocidade tangencial situa-se, normalmente, na faixa de 10 a 20 m/min e a velocidade axial em torno de 1 até 2 m/min. Este valor é praticamente constante ao longo de todo o curso de trabalho e se reduz a zero apenas nas proximidades dos pontos inferior e superior de reversão do curso [2,6].

A Figura 2. 10 (a) exhibe a textura obtida pelo processo de brunimento de passe único [2,3,24]. A Figura 2. 10 (b) apresenta o aspecto de uma textura produzida com brunimento convencional [23,25,26].

Figura 2. 10 - Textura obtida pelo processo de brunimento a) de passe único e b) convencional.



Fonte: baseado em [2,3,16,24 - 29]

2.3.2.3 Esforços no brunimento de passe único

As forças geradas ao longo do curso de brunimento de passe único estão relacionadas com a soma total de gumes cinemáticos em contato com as paredes do furo da peça. Portanto, a origem da força deve-se à deformação elástica e plástica do material, à formação de cavacos e ao atrito entre a ferramenta e a peça [27].

A força de corte (F_c) do processo está na direção da velocidade de corte. Ela é a força resultante da composição das forças normais e axiais ao longo do processo, ou seja, é calculada pela soma vetorial das forças normal (F_n), axial (F_a) e tangencial (F_t). Porém, a força normal é decorrente da deformação elástica do material da peça e, no caso do brunimento de passe único, seu módulo se anula por se utilizar uma ferramenta cilíndrica e rígida. As componentes de forças axial e tangencial se orientam nas direções das velocidades axial e tangencial, respectivamente. De modo que, a força de corte, F_c , é calculada pela Equação 2.3 [23,28].

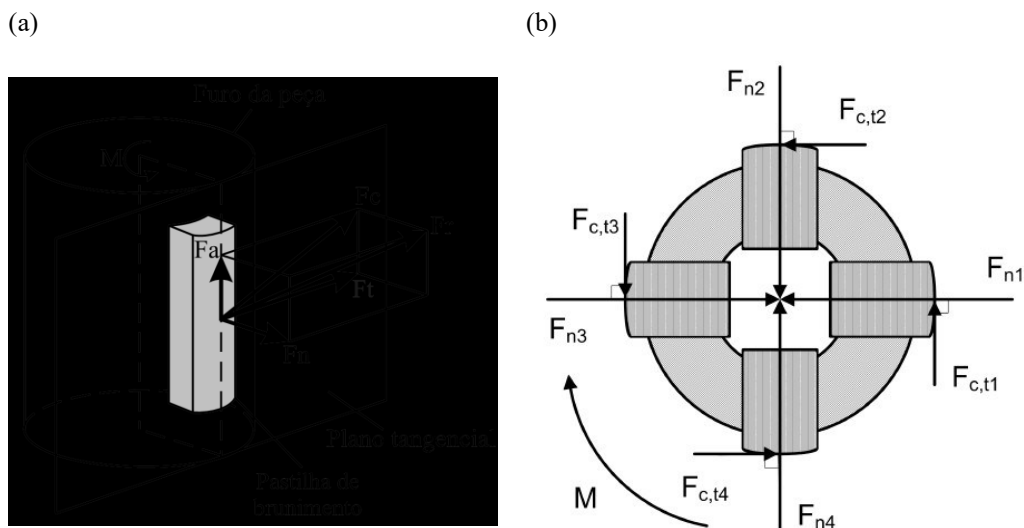
$$F_c = \sqrt{F_a^2 + F_t^2} \quad (2.3)$$

O momento de corte (M) necessário para o movimento de rotação da ferramenta é proporcional à força tangencial (F_t) e ao diâmetro da ferramenta. O módulo do momento M é aproximado de acordo com a Equação 2.4, na qual “ d ” é o diâmetro da ferramenta [23].

$$M = F_t \frac{d}{2} \quad (2.4)$$

A Figura 2. 11 (a) representa esquematicamente os esforços de usinagem gerados ao longo do processo de brunimento em uma pastilha abrasiva e a Figura 2.11 (b) apresenta a vista superior da ferramenta com a direção das forças e do momento gerados em cada pastilha.

Figura 2. 11 - (a) Esforços gerados no brunimento, (b) Direção das forças e do momento em uma ferramenta de múltiplas pastilhas.



Fonte: adaptado de [17].

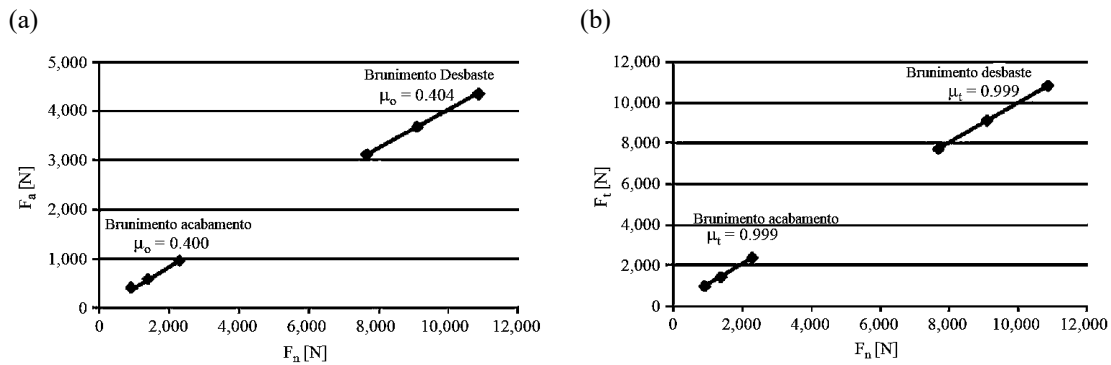
No brunimento a formação de cavaco é tratada como sendo uma interação por atrito, onde a Força Normal (F_n) corresponde às equações 2.5 e 2.6, μ_t é o coeficiente de atrito tangencial e μ_a é o coeficiente de atrito axial [17, 20, 33].

$$F_n = \frac{F_t}{\mu_t} \quad (2.5)$$

$$F_n = \frac{F_a}{\mu_a} \quad (2.6)$$

Vrac *et al.* [18] verificou a influência dos parâmetros de entrada do processo de brunimento sobre a qualidade da superfície, a produtividade, o ângulo de corte e os coeficientes de atrito. O autor calculou os valores dos coeficientes de atrito por meio das forças obtidas ao longo do processo e concluiu que os coeficientes de atrito são constantes, independentemente se o brunimento for de desbaste ou de acabamento, como apresentado na Figura 2. 12.

Figura 2. 12 - (a) Valores do coeficiente de atrito axial para os brunimentos de desbaste e de acabamento. (b) Valores do coeficiente de atrito tangencial para os brunimentos de desbaste e acabamento.

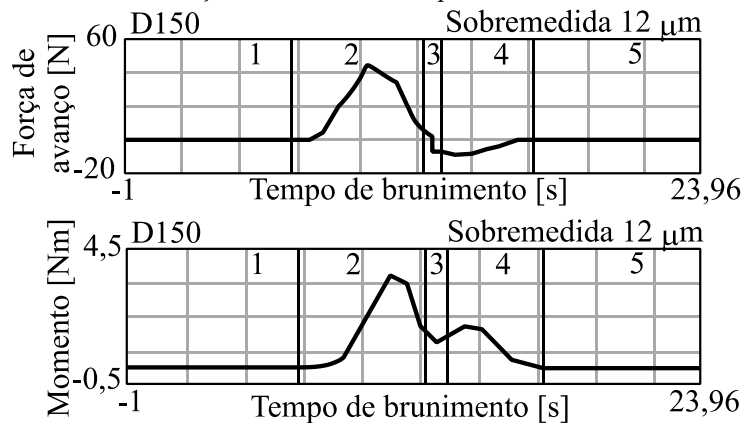


Fonte: [18].

Peres[2] também investigou o comportamento dos esforços do processo de brunimento com ferramenta *Precidor*. Em seu experimento, os esforços foram medidos com uma plataforma piezelétrica, para uma remoção de material de 12 μm do diâmetro do furo. De acordo com o autor, a região 1 da

Figura 2. 13 representa a entrada da ferramenta na peça, sendo que nesta etapa apenas pequenos picos de F_a e M_z são detectados, resultantes de eventuais toques da ferramenta no componente. A região 2 representa a porção do sinal que indica a remoção de material, caracterizando o crescimento de F_a e M_z , o que se deve ao aumento gradual do diâmetro da ferramenta. Na região 3 ocorre a inversão do sentido do avanço da ferramenta com sua desaceleração. Na região 4 existe o crescimento dos esforços durante a usinagem, uma vez que acontece o aumento gradual do diâmetro da ferramenta. A região 5 representa a saída da ferramenta do furo brunido.

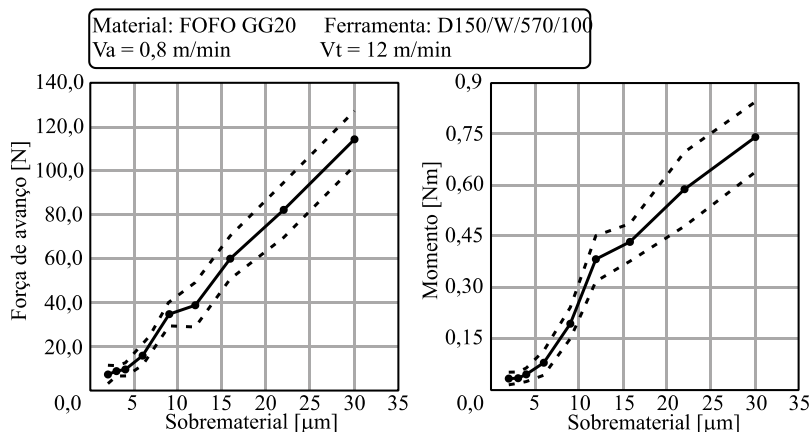
Figura 2. 13 - Comportamento dos esforços no brunimento de passe único.



Fonte: adaptado de [2]

Segundo Peres[2], o sobrematerial torna-se o fator dominante sobre o comportamento da força de corte, pois favorece os mecanismos de corte ao atingir pressões de contato mais elevadas, as quais são controladas pelo sobrematerial ajustado na ferramenta. A Figura 2. 14 apresenta o comportamento da força axial e do momento em função do sobrematerial removido do furo. É notório o aumento dos esforços durante o brunimento de passe único, com o aumento da seção de material removida do furo.

Figura 2. 14 - Variação da força de avanço e momento em relação ao sobrematerial removido no brunimento de passe único com a ferramenta *Precidor*.

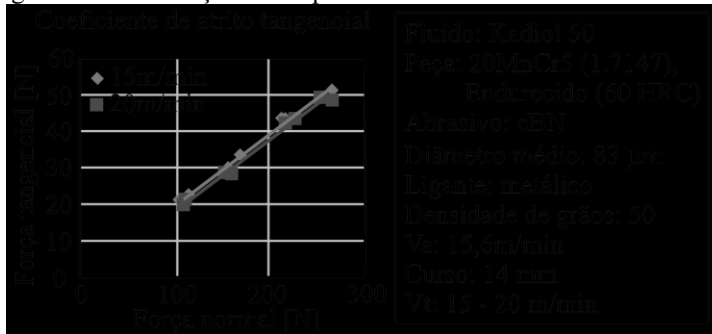


Fonte: adaptado de [2].

Schmitt e Bähre [15] realizaram a medição dos esforços de usinagem durante o processo de brunimento de superfícies cilíndricas externas e obtiveram o coeficiente de força tangencial experimentalmente. A ferramenta foi fixada em uma plataforma piezelétrica e os dados das forças axial e tangencial foram adquiridos, o coeficiente de força tangencial foi obtido para

duas velocidades de corte distintas, 15 e 20 m/min. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 2. 15.

Figura 2. 15 - Força tangencial versus força normal para diferentes velocidades de corte.



Fonte: adaptado de [15].

Neste estudo os autores verificaram que o coeficiente de atrito tangencial é aproximado por um mesmo valor, eles variam entre 0,1734 e 0,2060 para uma velocidade de corte de 15 m/min e entre 0,1817 e 0,1955 para uma velocidade de corte de 20 m/min. Assim, existe uma propensão deste coeficiente ser independente da velocidade tangencial. Entretanto, existe uma tendência de redução do coeficiente de atrito tangencial após determinado tempo de usinagem, o que acontece devido ao cegamento dos grãos superabrasivos levando à necessidade de realizar um novo dressamento da pastilha abrasiva.

Estimando a força normal (F_n) pode-se calcular a pressão de corte no processo de brunimento. A mesma define a profundidade de penetração dos grãos no material da peça, a formação dos cavacos, a taxa de remoção de material e a qualidade da superfície da peça usinada. A pressão de corte (p_n) é definida pela Equação 2.7, onde b_h é a largura da pastilha de brunimento e l_h é o comprimento de contato entre a pastilha de brunimento e a peça [19, 34, 35].

$$p_n = \frac{F_n}{b_h \cdot l_h} \quad (2.7)$$

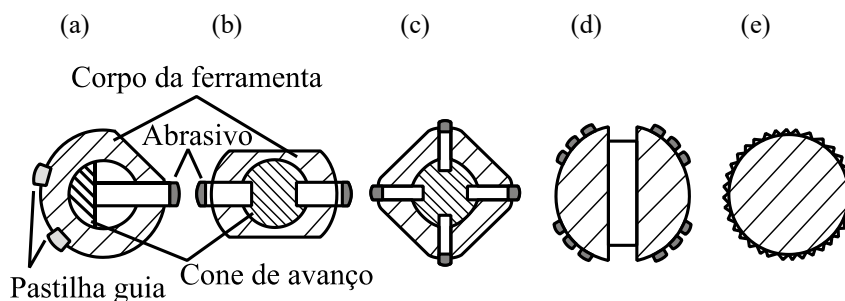
2.3.2.4 Ferramentas do brunimento de passe único

As ferramentas de brunimento de passe único são compostas por grãos superabrasivos, como o Nitreto de boro cúbico (cBN) ou diamantes, ligados por meio de uma matriz metálica. Esse tipo de ligante é utilizado devido à maior ancoragem dos grãos abrasivos quando comparado com os ligantes vitrificados ou resinoides convencionais. Além disso, ele oferece uma

boa resistência ao desgaste na usinagem de materiais frágeis, maior resistência mecânica e térmica que os resinoides e maior resistência ao impacto que os vitrificados [12, 36]

De acordo com Paucksch [23], uma forma fácil de categorizar as ferramentas de brunimento de curso longo é de acordo com o número de pastilhas (Figura 2. 16). Entretanto, essa forma não consegue classificar todos os tipos de ferramentas. As ferramentas maciças e adaptativa e as ferramentas revestidas com camada única de abrasivos não se encaixam nesta classificação.

Figura 2. 16 - Ferramentas de brunimento com a) pastilha única b) duas pastilhas c) múltiplas pastilhas d) bucha abrasiva e) maciça (*single layer*).



Fonte: adaptado de [29, 41]

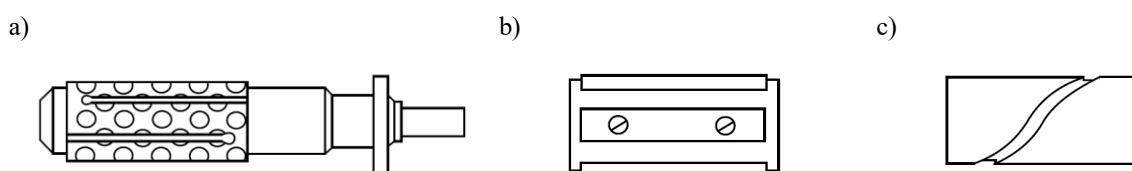
Segundo Peres[2], para o brunimento de curso longo, as ferramentas são divididas em cinco categorias principais segundo sua composição: ferramentas com uma e múltiplas pastilhas, ferramenta maciça, tipo bucha ou casca e ferramenta *Precidor*. Essa classificação é mais completa se comparado com a apresentado por Paucksch [23].

As ferramentas mais usuais no processo de brunimento de curso longo e passe único são as ferramentas tipo bucha, ferramenta *Precidor* (ou de múltiplas pastilhas) e as maciças. As ferramentas do tipo bucha e *Precidor* não são expansíveis no momento da usinagem, como as habituais do brunimento de curso longo, elas são expandidas antes do brunimento para ajustar o diâmetro necessário para aplicação[32].

Ferramentas maciças galvanizadas não são ajustáveis, possuem limitada protrusão de grãos e uma distribuição estocástica dos grãos abrasivos. Estas propriedades restringem o espaço para o acesso do lubrificante assim como para remoção de cavacos. Em ferramentas maciças, a superfície de corte pode ser completamente coberta com superabrasivos ligados com metal ou podem ser divididas em faixas longitudinais abrasivas, como uma ferramenta de pastilhas. As ferramentas maciças servem principalmente para rebarbar e alisar pequenos furos e podem ser adaptadas para o desbaste de materiais como aços, metal duro, fundidos, vidros e metais leves [2, 25, 28].

As ferramentas tipo bucha superabrasiva se constituem de dois componentes principais: um mandril e uma bucha. A bucha pode ter diferentes geometrias, podendo ser formada por camisa cilíndrica com um rasgo ao longo de todo o seu comprimento (Fig. 2.17 (a)), formada por pastilhas posicionadas rigidamente sobre um a casca semicilíndrica (Fig. 2.17 (b)) ou ainda podem ser constituídas de dois semicilindros fixados através de parafusos no corpo da ferramenta (Fig. 2.17 (c)). Esse tipo de ferramenta é considerada não expansível, visto que ao longo do brunimento ela permanece rígida, sendo que seu diâmetro é pré-ajustado para a remoção desejada [2, 3].

Figura 2. 17 - Ferramenta de bucha abrasiva (a) com camisa cilíndrica; (b) com pastilhas; (c) com bucha seccionada helicoidalmente.



Fonte: adaptado de [2].

Quando a ferramenta é formada por um mandril cônico e bucha cônica, a porção de corte é retificada na forma de barril (cilíndrica na região central e cônica nas extremidades) e possui canais helicoidais ou retos, por onde passa o fluido de corte. O cone do furo da bucha encaixa no mandril com a mesma conicidade. Com a bucha montada sobre o mandril, o diâmetro pode ser ajustado pelo deslocamento da bucha ao longo do eixo do mandril através de uma porca e uma contra-porca localizada nas extremidades da bucha. A conicidade da parte frontal da bucha é projetada de forma que ela entre no furo existente e garanta que a ferramenta seja guiada pelo furo. Uma vez que a ferramenta entra no furo, uma quantidade específica de material é sucessivamente removida ao longo do comprimento restante da ferramenta [33].

O abrasivo empregado na fabricação das buchas é geralmente o diamante ou o cBN. Esses abrasivos apresentam um baixo desgaste e, devido à pouca renovação de gumes, proporcionam um grau de acabamento superior e permitem elevadas taxas de brunimento. Essas ferramentas são empregadas para reduzir marcas causadas por vibrações e ondulações, pois em seu emprego não ocorrerão vibrações e o desgaste da ferramenta é reduzido. A escolha do tipo de ferramenta a se utilizar está relacionada com o material a ser usinado, com a remoção e o acabamento desejado [6].

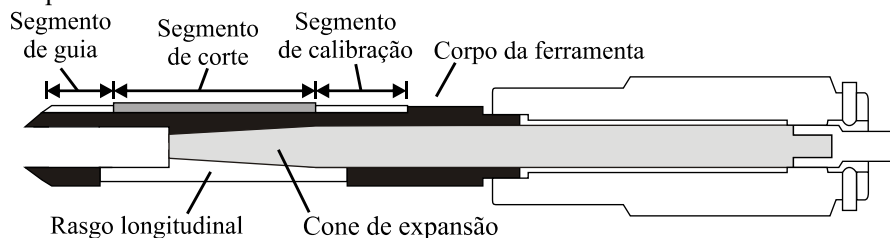
As ferramentas rígidas com múltiplas pastilhas desenvolvidas pelo fabricante Nagel, são denominadas *Precidor tools*, são ferramentas de brunimento montadas sobre um mandril. Se-

melhante às ferramentas do tipo bucha, elas não se expandem ao longo do brunimento, e seu diâmetro é pré-ajustado. A ferramenta antes do processo pode ser expandida alguns micrometros para compensar os efeitos de desgaste dos grãos abrasivos, sendo que tal expansão depende da capacidade de deformação de seu corpo. Tais ferramentas podem ser empregadas em combinação com processos de brunimento convencional ou em vários estágios, com objetivo de se atingir condições de alto volume de material removido [36, 38].

Nas ferramentas *Precidor* todo o corpo tem o diâmetro expandido, diferentemente dos tipos de ferramentas para brunimento convencional, onde a expansão se dá pelo deslocamento radial das pastilhas de brunir. Essas ferramentas possuem 3 divisões. A primeira parte da ferramenta é cônica para o posicionamento correto dentro do furo a ser brunido. A segunda parte, onde fica a pastilha abrasiva, é ligeiramente cônica e é a região de corte onde efetivamente ocorre a remoção do material. A terceira parte é cilíndrica e responsável pela calibração do furo [2, 3, 25].

A forma construtiva da ferramenta é apresentada na Figura 2. 18. Os rasgos longitudinais estão presentes ao longo do corpo da ferramenta, para facilitar a expansão da zona de corte da ferramenta [2].

Figura 2. 18 - Esquema da ferramenta *Precidor*.



Fonte: baseado em [35].

As ferramentas *Precidor* são constituídas por pastilhas superabrasivas brasadas sobre um corpo rígido de aço. As pastilhas apresentam elevado tempo de vida e podem brunir até 100.000 furos. Ao se utilizar esse tipo de ferramenta é possível alcançar precisão dimensional e geométrica menor que 0,001mm no brunimento de furos cilíndricos com diâmetros na faixa de 20 mm de ferro fundido [2, 38].

No brunimento de passe único, inicialmente, a ferramenta *Precidor* é guiada pelo furo. A ferramenta continua seu movimento até entrar o suficiente no furo e passa a ser guiada pelo conjunto brunidor, composto pelo mandril e pelas pastilhas de brunimento. Por isso, é importante definir uma condição inicial apropriada, como velocidade e posicionamento da ferramenta, para obter um bom resultado final no brunimento [36].

Utilizando ferramentas *Precidor* com abrasivos de diamante é reportado o brunimento de furos na faixa de diâmetros de 4 a 101 μm . Em relação aos parâmetros de processo, a velocidade tangencial empregada varia entre 8 a 96 m/min, para velocidade de avanço axial geralmente emprega-se uma faixa entre 1 a 5 m/min [3, 6, 8, 40].

Yang *et al* [37] apresentaram um modelo analítico que prevê o tempo de vida útil da ferramenta com baixa rigidez no brunimento de passe único. Para isso, foi feito o contorno de projeção 2D da ferramenta pela medição por projeção de luz paralela. Ao extrair os parâmetros do contorno da projeção 2D foi estabelecida a relação entre o contorno e os parâmetros de distribuição dos grãos na superfície da ferramenta. Baseado no parâmetro de distribuição de grãos e a distribuição da altura radial máxima, foi desenvolvido um modelo de caracterização de contorno 3D da ferramenta.

Ao analisar o contato microscópico entre a peça e a ferramenta, os autores estabeleceram uma relação entre os parâmetros de usinagem e os parâmetros da ferramenta. A previsão da evolução do desgaste foi realizada por simulação, o desvio entre o contorno da ferramenta previsto e o medido foi inferior a 2 μm . Assim, a equação empírica da relação entre a ferramenta e o diâmetro do furo foi ajustada e verificada, o que possibilitou o controle do diâmetro do furo e do desgaste da ferramenta. Os autores verificaram que ao aumentar a tolerância de dressamento da ferramenta pode-se prolongar o tempo de vida útil da ferramenta, mas aumenta o custo. Portanto, o tempo de vida útil da ferramenta e o custo do dressamento devem ser considerados de forma abrangente para reservar uma tolerância de revestimento adequada [37].

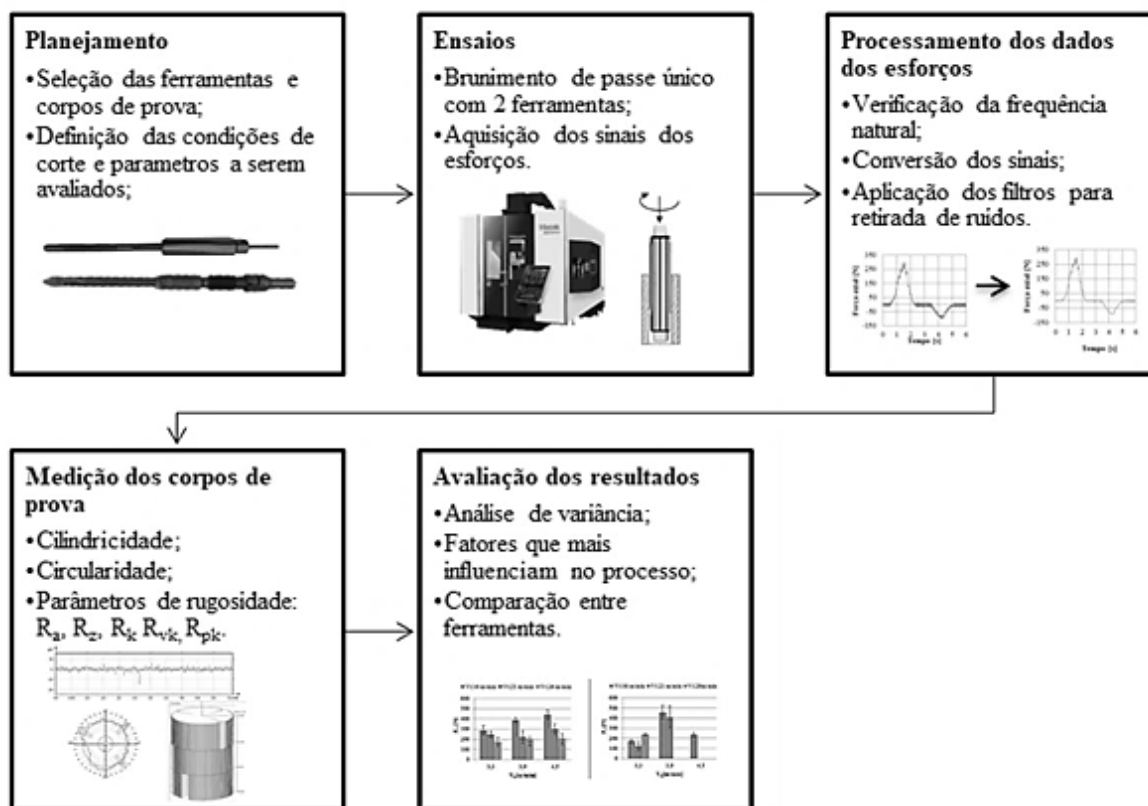
Diante dos estudos avaliados, verificou-se que não há na literatura trabalhos que avaliem ou comparem os tipos de ferramentas existentes no mercado. Sendo assim, este trabalho buscou estudar dois tipos de ferramenta de desbaste avaliando a influência dos parâmetros de corte (velocidade tangencial e axial) sobre os esforços de corte, a rugosidade, os desvios de circularidade e cilindridade ao longo do brunimento de passe único em mancais de deslizamento. Na próxima seção serão apresentados os materiais e a metodologia utilizada na realização de tal estudo.

3 MÉTODOS, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Neste capítulo são apresentados os equipamentos utilizados no desenvolvimento deste trabalho, assim como o planejamento e a execução experimental. Na Figura 3. 1 é apresentada a sequência de atividades realizadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente, fez-se a seleção das ferramentas e dos parâmetros de corte para avaliação do desempenho das ferramentas. Após esta seleção fez-se o brunimento de passe único com cada uma das ferramentas nas dependências da empresa parceira. As componentes das forças e o momento foram adquiridos ao longo do processo.

As componentes das forças foram processadas por filtragem para verificar a frequência natural do processo e os valores médios. Em seguida, na avaliação dos furos brunidos, foram medidos os desvios de forma e os parâmetros de rugosidade. Com os resultados das forças, de cilíndricidade, de circularidade e de parâmetros de rugosidade foi possível avaliar e quantificar o comportamento de cada ferramenta.

Figura 3. 1 - Sequência das atividades realizadas no desenvolvimento do trabalho.



Fonte: Autor.

O estudo do brunimento de passe único com diferentes ferramentas foi realizado no escopo de uma parceria do Laboratório de Mecânica de Precisão (LPM) da Universidade Fede-

ral de Santa Catarina (UFSC) com a empresa parceira. A empresa parceira viabilizou o uso da infraestrutura necessária para realização dos ensaios. O LMP disponibilizou um sistema de medição de forças piezométrico para medição das componentes de força e momento no brunimento que foi integrado na máquina-ferramenta na empresa parceira. As medições após o brunimento da textura, geometria e forma dos corpos de prova foram realizadas no Laboratório de Materiais (LABMAT - UFSC). Os corpos de prova para os ensaios e as ferramentas de brunimento foram disponibilizados pela empresa parceira.

3.1 MÉTODOS E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Esta seção descreve os ensaios executados com fins de atingir os objetivos geral e específicos desta pesquisa. A operação de brunimento da peça analisada na produção industrial é feita em múltiplos estágios. O desbaste foi o estágio escolhido em razão de se esperar os maiores esforços e devido à disponibilidade fornecida pela empresa parceira.

Como as ferramentas apresentam formas distintas, porém realizam a mesma função, buscou-se verificar qual ferramenta apresenta o melhor desempenho no brunimento em termos de menores esforços, qualidade da superfície (menor rugosidade) e com menores erros de forma apropriados à utilização do componente. Para isto, os ensaios foram divididos em dois tipos: ensaios com a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas e ensaios com a ferramenta tipo bucha. Ambas as ferramentas foram ajustadas para retirar 15 μm de material do diâmetro mancal, tomando como base o diâmetro médio dado pela Tabela 3. 4.

Os ensaios envolvidos no experimento fatorial fracionado visam identificar e quantificar os efeitos causados pelos parâmetros de entrada sobre o resultado do processo de brunimento com ferramentas do tipo bucha diamantada e rígida de múltiplas pastilhas. Os parâmetros e os resultados estudados estão apresentados na Tabela 3. 1, sendo que esses parâmetros foram selecionados de acordo com as condições de corte da produção do mancal de deslizamento que eram diferentes para cada uma das ferramentas. Uma das ferramentas era utilizada na unidade europeia da empresa parceira e a outra era utilizada na unidade brasileira.

Tabela 3. 1 - Parâmetros de entrada e resultados do processo analisado.

Parâmetros de entrada	Resultados do processo
1. Velocidade axial;	1. Força de corte;
2. Velocidade tangencial;	2. Momento;
3. Ferramenta;	3. Erro de cilindridade final;
4. Erro de circularidade inicial;	4. Erro de circularidade final;
5. Erro de cilindridade inicial;	5. Ra final;
6. Ra inicial;	6. Rz final;
7. Rz inicial;	7. Rk final;
8. Rk inicial;	8. Rvk final;
9. Rvk inicial;	9. Rpk final.
10. Rpk inicial.	

Fonte: Autor.

Para saber qual fator apresenta maior influência nas forças, na qualidade da superfície e forma dos furos, utilizou-se a análise de variância. Inicialmente, o planejamento fatorial 3^2 com dois fatores (velocidades axial e tangencial) e três níveis (alto, central e baixo) seria usado para analisar o efeito do tipo de ferramenta e dos parâmetros de corte sobre a força de usinagem e a superfície gerada no brunimento dos mancais de deslizamento. Porém, ao se realizar os ensaios, verificou-se que a ferramenta do tipo bucha não foi capaz de suportar os níveis mais altos previamente escolhidos a partir dos parâmetros utilizados na produção da peça. Não foi possível refazer os ensaios com os níveis mais altos de velocidade, devido à falta de datas disponíveis para uso da máquina-ferramenta na empresa parceira.

Devido a essa impossibilidade, a nova estratégia usada para analisar os resultados obtidos foi avaliar a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas com planejamento fatorial 3^2 e comparar os resultados das ferramentas nas condições de corte que ambas puderam suportar. Os parâmetros usados para realização dos ensaios estão descritos na Tabela 3. 2.

Tabela 3. 2 - Fatores e níveis utilizados nos ensaios de brunimento.

Fatores	Ferramenta	v_a (m/min)	v_t (m/min)
			16
		3,3	21
			26
	Múltiplas pastilhas	3,9	16
			21
			26
Níveis		4,5	16
			21
			26
	Bucha	3,3	16
			21
			26
		3,9	16
			21
		4,5	16

Fonte: Autor.

Para ferramenta rígida de múltiplas pastilhas, os fatores avaliados nos ensaios foram: velocidade axial, v_a e velocidade tangencial, v_t da ferramenta. Tais fatores foram testados em três níveis apenas: baixo, central e alto. Para garantir a independência entre os eventos fez-se necessário a execução de duas repetições, executadas de maneira aleatória.

Os parâmetros apresentados na Tabela 3. 2 geraram 9 condições de ensaios para a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas, executados em 3 ensaios (ensaio mais duas repetições). A Tabela 3. 2 contém todas as combinações de parâmetros de entrada testadas. Para cada combinação mediu-se a força de corte axial e o momento de corte. Com os valores máximos obtidos, calculou-se a força de corte máxima em cada condição apresentada.

Para ferramenta bucha, o fator avaliado foi a velocidade tangencial da ferramenta, v_t . Para tal fator foram testados três níveis apenas: baixo, central e alto. Os parâmetros apresentados na Tabela 3. 2 geraram 3 condições de ensaios, executados em um ensaio e duas repetições. Para cada combinação também se mediu a força de corte axial, momento de corte e calculou-se a força de corte máxima em cada condição apresentada. Após o processo de brunimento e a aquisição das forças, as peças foram medidas quanto à circularidade, cilindricidade e rugosidade para verificação das condições de forma e superfície obtidas.

Além dessas condições de corte, a ferramenta bucha suportou outras 3 condições de corte que são apresentadas em negrito na Tabela 3. 5. Estas condições foram realizadas para ava-

liação do comportamento da força e momento gerados no brunimento com a ferramenta bucha e para comparação entre as ferramentas. Porém, não foi possível avaliar a superfície e os erros de forma do furo dos corpos de prova nestas condições de corte devido a problemas logísticos.

Para analisar quais fatores mais contribuíram para a variabilidade na resposta para a ferramenta com pastilhas, utilizou-se o gráfico de Pareto dos efeitos calculados para cada parâmetro de saída analisado. Nesse gráfico é possível verificar a influência exercida por cada fator e interação de fatores através da linha de referência que indica se os efeitos mostrados são significativos. Os efeitos são dispostos em ordem decrescente de seus valores absolutos e considerando uma confiança de 95%.

3.2 MÁQUINA-FERRAMENTA

O ensaio de brunimento dos mancais de deslizamento foram realizados em um centro de usinagem de cinco eixos modelo Variaxis J-600 do fabricante MAZAK (Figura 3. 2). O centro de usinagem possui uma potência de acionamento do eixo árvore de 11 kW, podendo atingir rotações máximas de 12000 min^{-1} e possui o comando numérico computadorizado Mazatrol Smooth X.

Como fluido lubrificadorrefrigerante foi empregada uma emulsão do tipo “*Milky White*” com concentração de 5%, composição do tipo “*Hazy Brown Oil*” e pH entre 8,9 e 9,5. Esse fluido foi escolhido, pois é o mesmo aplicado no brunimento na produção do componente analisado.

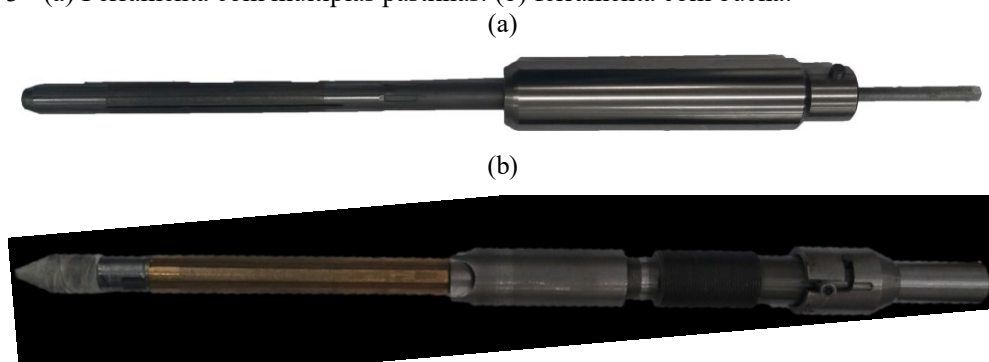
Figura 3. 2 - Centro de usinagem CNC 5 eixos MAZAK Variaxis J-600.



3.3 FERRAMENTAS DE CORTE

Nos ensaios foram empregadas duas ferramentas novas com seu diâmetro calibrado para o valor pré-estabelecido, fornecidas pela empresa parceira. Uma ferramenta com múltiplas pastilhas (Figura 3. 3 (a)) e a outra com bucha superabrasiva (Figura 3. 3 (b)). As ferramentas escolhidas atendem aos requisitos de remoção de material dos componentes, pois trazem às peças as dimensões, rugosidade e forma exigidas na fabricação.

Figura 3. 3 - (a) Ferramenta com múltiplas pastilhas. (b) ferramenta com bucha.



Fonte: autor.

As principais diferenças entre essas duas ferramentas são: tamanho, ligante e área de contato com a peça. Nos próximos itens será apresentado o detalhamento das características de cada uma das ferramentas utilizadas neste estudo.

3.3.1 Ferramenta de brunimento com múltiplas pastilhas

A ferramenta rígida de múltiplas pastilhas é munida de cinco pastilhas dispostas simetricamente em torno de sua circunferência. As pastilhas são brasadas ao corpo da ferramenta. A especificação da ferramenta é apresentada na Tabela 3.3. O diâmetro nominal apresentado corresponde ao diâmetro médio do seguimento de corte da ferramenta.

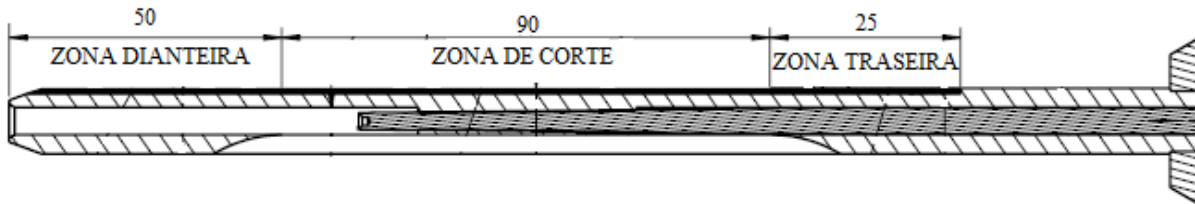
Tabela 3.3 - Especificações da ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.

Tipo	Diâmetro nominal	Granulometria	Ligante	Dimensões	Zona de corte	Curso
Pastilha	13 mm	D107	Metálico (Cu-Sn-Fe-Ni)	Régua 3X165 mm	90 mm	195 mm

Fonte: Autor.

A ferramenta é munida de 5 pastilhas abrasivas com uma largura de 3 mm, espessura de 1,5 mm e comprimento de 165 mm. O comprimento da pastilha é dividido em 3 zonas (Figura 3. 4): zona de entrada (dianteira) (50 mm), zona de corte (90 mm) e zona de saída (traseira) (25 mm). A área de contato máxima com a peça é de 735 mm² (cálculo no Apêndice A). O curso para o ensaio de brunimento de curso único com esta ferramenta foi de 195 mm para que toda a zona de corte transpassasse o furo do mancal da peça.

Figura 3. 4 - Divisões das zonas na ferramenta rígida com múltiplas pastilhas.



Fonte: adaptado de [35].

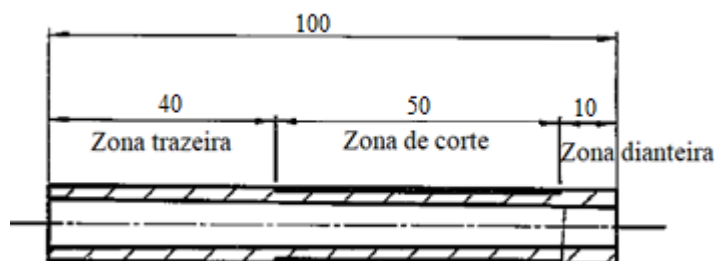
As pastilhas da ferramenta são obtidas por sinterização e compostas por grãos abrasivos de diamante sintético, e os mesmos possuem um diâmetro médio de 100 µm (D107, especificação FEPA). Os grãos abrasivos são adequados para operações de desbaste. A ferramenta possui um diâmetro médio da zona de corte já condicionado de $12,980 \pm 0,005$ mm.

A ferramenta utilizada é semelhante à avaliada no trabalho de Freitas [5], com pastilhas compostas por grãos de diamante inseridos em um ligante metálico. O autor verificou a composição química do ligante das pastilhas da ferramenta via espectroscopia de energia dispersiva (EDS) no microscópio eletrônico de varredura (MEV) e concluiu que o material do ligante é uma liga metálica friável com as seguintes composições em massa: cobre (44,01%), estanho (3,60%), ferro (25,82%) e níquel (26,56%).

3.3.2 Bucha Superabrasiva

A segunda ferramenta utilizada neste estudo é do tipo bucha, constituída por uma haste de metálica, na qual uma bucha superabrasiva com comprimento de 100 mm é montada. A bucha pode ser dividida em três áreas: zona dianteira (10 mm), zona de corte (50 mm), zona traseira (40 mm) como apresentado na Figura 3. 5.

Figura 3. 5 - Divisões das zonas na ferramenta bucha.



Fonte: adaptado de [39].

A bucha é obtida por um revestimento galvânico e possui em sua zona de corte grãos de diamante com tamanho médio D91 (FEPA). Após o seu condicionamento, a ferramenta tipo Bucha possui diâmetro médio da zona de corte de $12,980 \pm 0,005$ mm. Suas principais características são dadas pela Tabela 3. 4.

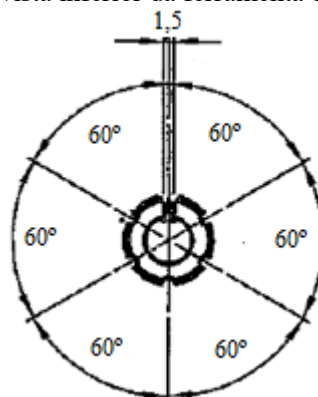
Tabela 3. 4 - Especificações técnicas da ferramenta bucha.

Tipo	Diâmetro nominal	Granulometria	Ligante	Dimensões	Zona de corte	Curso
Bucha	13 mm	D91	Metálico (Bronze)	6X100 mm	50 mm	130 mm

Fonte: Autor.

A bucha, conforme apresentado na Figura 3. 6, dispõe de uma abertura lateral de 1,5 mm para possibilitar a sua expansão. Além disso, possui 5 rasgos com largura de 1,7 mm ao longo de sua circunferência para facilitar a passagem do fluido de corte [3]. A área de contato total da bucha é de $1499,4$ mm² (cálculo no Apêndice A). O curso estabelecido da ferramenta é 130 mm, de forma que toda a zona de corte transpassasse o furo.

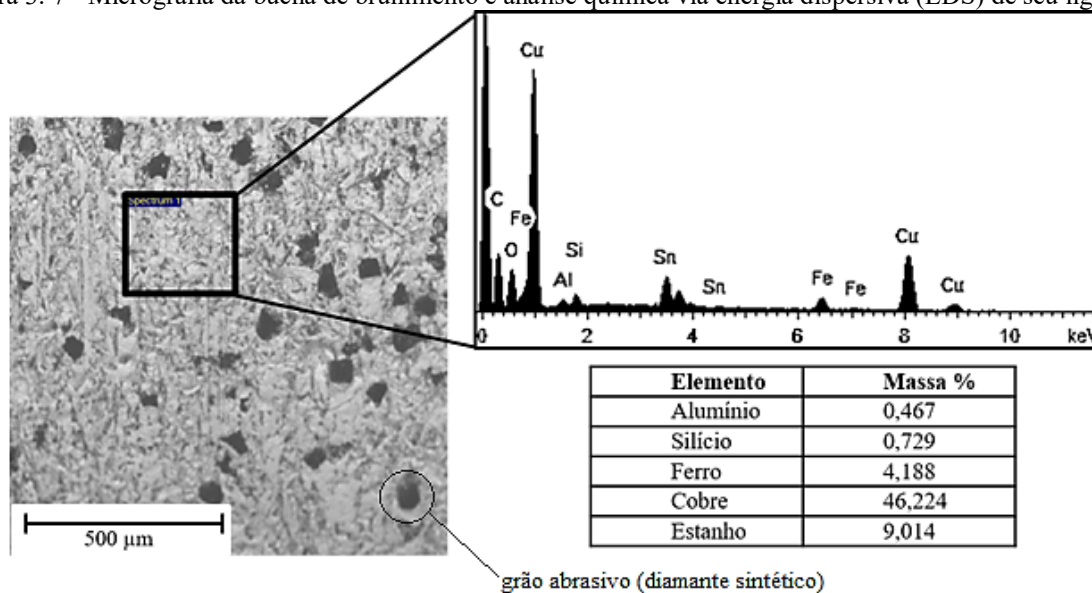
Figura 3. 6 - Desenho esquemático da vista inferior da ferramenta bucha com as divisões dos rasgos.



Fonte: [39].

A fim de comparar a composição química do ligante entre as ferramentas, também foi feita a espectroscopia de energia dispersiva (EDS) da bucha no microscópio eletrônico de varredura. Os valores do percentual de massa de cada elemento, assim como o espectro de energia do ligante da ferramenta, são dados pela Figura 3. 7. Através desses dados, verifica-se que o ligante da bucha é o bronze (Cu – Sn).

Figura 3. 7 - Micrografia da bucha de brunimento e análise química via energia dispersiva (EDS) de seu ligante.



Fonte: Autor.

Ao se comparar os ligantes metálicos das ferramentas, é notório que a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas possui maior quantidade de ferro e níquel na composição de seu ligante, ao passo que a ferramenta bucha possui mais cobre e estanho, ou seja, o ligante é de bronze. O ferro e o níquel intensificam a retenção do grão [40], ou seja, na ferramenta com pastilhas, há maior retenção do grão devido à maior quantidade de ferro e níquel se comparado com a ferramenta bucha.

3.4 CORPO DE PROVA

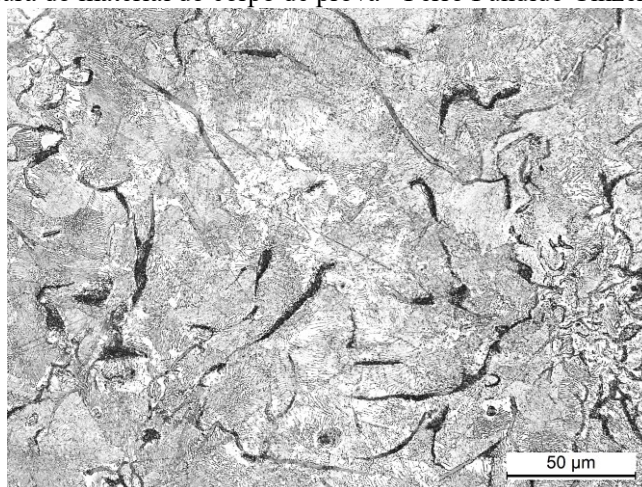
Utilizaram-se corpos de prova neste estudo fornecidos pela empresa parceira. Os corpos de prova são fabricados em ferro fundido (FoFo) cinzento GG20 com grafita lamelar do tipo B, conforme metalografia apresentada na Figura 3. 8.

Segundo a documentação de produto padrão, fornecida pela empresa parceira, para a produção do ferro fundido cinzento do mancal avaliado a quantidade de ferrita deve ser no máximo 20% com o restante sendo de perlita. Quanto à resistência à tração, a força mínima

para aceitação do produto é 250 N determinada de acordo com a norma ABNT NBR ISO 06892. A dureza deve estar entre 160 e 230 HB sendo obtida de acordo com a NBR NM 00187-1 (dureza Brinell).

A confecção dos furos dos corpos de prova por furação e alargamento, operações que precedem o brunimento, foram realizadas fora do escopo deste trabalho. Este procedimento de usinagem têm o objetivo de trazer variações mínimas no sobrematerial da peça, assim como para garantir tolerâncias dimensionais e de forma em níveis requeridos para o brunimento.

Figura 3. 8 - Microestrutura do material do corpo de prova - Ferro Fundido Cinzento GG20.



Fonte: Autor.

A composição química típica do material dos corpos de prova pode variar de acordo com os percentuais mostrados na Tabela 3. 5. Os valores apresentados proporcionam a obtenção deste ferro fundido de acordo com as normas ASTM A48/A48M-03 [41], DIN EN 1561 [42] e DIN 1691[43].

Tabela 3. 5 - Composição química típica do FoFo GG20

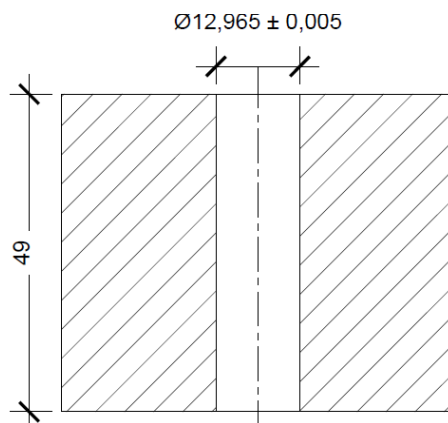
FoFo	Composição Química				
	C(%)	Mn (%)	Si (%)	P (%máx.)	S (%máx.)
GG20	2,8 – 3,7	0,2 – 0,8	2,0 – 2,7	0,25	0,12

Fonte: [41–43].

As dimensões do corpo de prova são apresentadas na Figura 3. 9. O diâmetro do furo após a operação de alargamento é de $12,965 \pm 0,005$ mm e o comprimento é de 49 mm. O diâmetro de todos os corpos de prova foi medido antes do brunimento para verificar a quantidade

de sobrematerial removido com um micrômetro do fabricante Mitutoyo, modelo interno de três pontas, com capacidade de medir de 12 a 20 mm, resolução de 0,005 mm e exatidão de $\pm 2\mu\text{m}$. Após as medições foi calculada a média aritmética e o desvio padrão de todos os corpos de prova.

Figura 3. 9 - Dimensões iniciais do corpo de prova utilizado nos ensaios em mm.

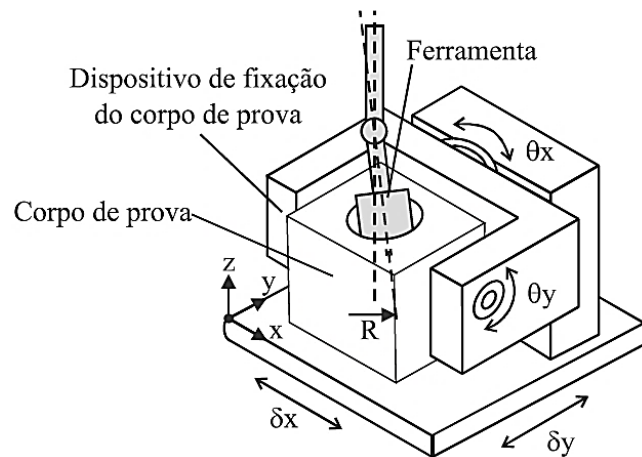


Fonte: Autor.

3.4.1 Fixação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram fixos numa plataforma pendular especialmente projetada e fabricada pela empresa parceira para a realização dos ensaios. Este dispositivo possibilita o alinhamento do furo com a ferramenta e o ajuste dos ângulos para direcionamento da ferramenta no início do processo. A plataforma, fixada em posição referencial na mesa da máquina-ferramenta, tem objetivo de minimizar os desvios de posicionamento e retitude entre a peça e a ferramenta, apresenta dois graus de liberdade: rotação em torno do eixo X e em torno do eixo Y para permitir o ajuste fino do alinhamento do furo do corpo de prova com o eixo da ferramenta de brunimento. A Figura 3.10 apresenta um desenho esquemático da plataforma de fixação do corpo de prova.

Figura 3. 10 - Esquema do sistema de fixação dos corpos de prova.



Fonte: adaptado de [5].

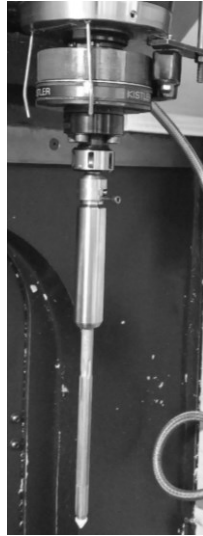
Apesar dos erros de posicionamento e retitude estarem presentes entre furo das peças e o eixo de rotação da máquina-ferramenta é fundamental evitá-los o máximo possível, uma vez que eles podem causar vibrações que aumentam os desvios de forma do furo. Para reduzir estes desvios de posicionamento faz-se necessário adicionar graus de liberdade na fixação da peça e na fixação da ferramenta [36,44].

Os graus de liberdade permitem a correção de forma e posicionamento no componente e possibilitam que a ferramenta realize uma pressão uniforme na parede do furo brunido, de forma que a influência das vibrações da máquina-ferramenta ou do ambiente sejam reduzidas. Assim, se o eixo de giro da ferramenta não coincidir com o eixo longitudinal do furo os graus de liberdade possibilitam que a ferramenta exerça uma força lateral (R) no furo durante a sua aproximação causando uma translação do corpo de prova que causa o ajuste de centros e o alinhamento desejado [5,9,21,45].

A ferramenta de brunimento foi fixa ao dinamômetro rotativo com um dispositivo flutuante para deixá-la com certo grau de liberdade (conforme Figura 3. 11). Dessa forma, a ferramenta apresenta a capacidade de se inclinar por pequenos ângulos evitando batimentos e vibrações durante o processo, corrigindo erros devido ao ângulo de incidência da ferramenta sobre o eixo do furo a ser brunido.

Porém, os graus de liberdade na fixação da peça e da ferramenta podem gerar instabilidade no processo, uma vez que há sobreposição de tolerâncias. Os graus de liberdade do dispositivo da ferramenta são representados pela rótula na Figura 3.10 [10].

Figura 3. 11 - Ferramenta rígida de múltiplas pastilhas fixa ao dinamômetro rotativo.



Fonte: Autor

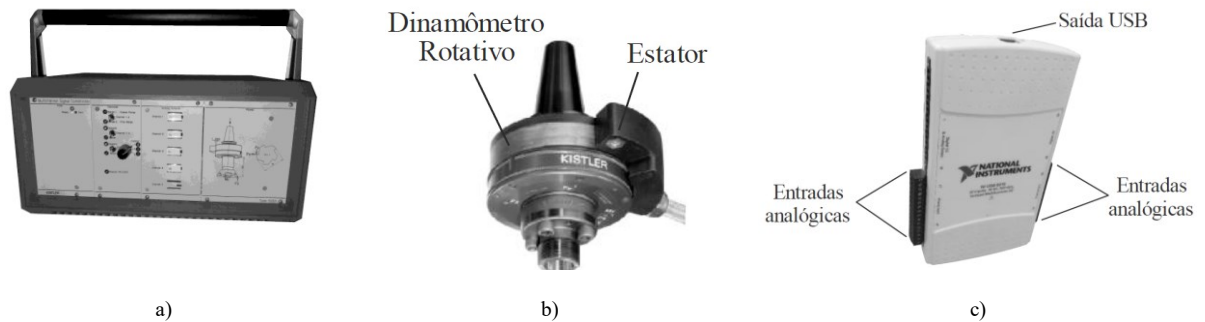
3.5 MEDIÇÃO DAS COMPONENTES DE FORÇA E MOMENTO

A bancada experimental para medição das componentes de forças e momento torçor era composta com os seguintes dispositivos: Centro de usinagem, um sistema de medição de forças de usinagem, um Dispositivo para Aquisição de Dados (DAD) e um computador portátil.

Ao longo do brunimento, a medição da componente axial da força de corte (F_a) e do momento de corte (M_z) foi feita pelo sistema de medição de força de usinagem da marca KISTLER INSTRUMENTS®. Esse sistema é constituído por um dinamômetro rotativo modelo 9123C1111, um estator modelo 5221B1 e um condicionador de sinais com múltiplos canais modelo 5223B.

O condicionador de sinais foi acoplado em um dispositivo de aquisição de dados do fabricante NATIONAL INSTRUMENTS®, modelo NI USB-6218, com 32 entradas analógicas e resolução de 16 bits. A faixa de tensão que as entradas analógicas do DAD podem receber varia entre ± 10 V. A Figura 3. 12 apresenta esses equipamentos.

Figura 3. 12 - a) Condicionador de sinais b) Dinamômetro rotativo e estator (c) Dispositivo para aquisição de dados (DAD).

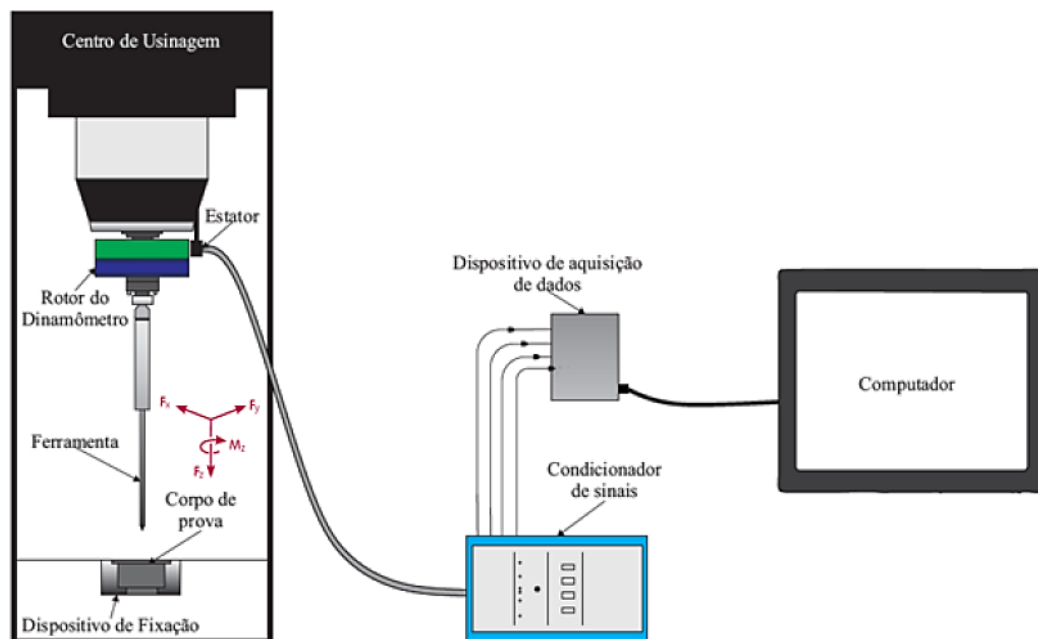


Fonte: baseado em [46,47].

O dinamômetro rotativo possui alta rigidez, ou seja, dispõe de uma elevada frequência natural. Ele permite medir três componentes de força (F_x , F_y e F_z) e o momento torçor em torno do eixo de rotação (M_z). O certificado de calibração do dinamômetro utilizado é mostrado Anexo I deste documento.

A Figura 3. 13 apresenta o esquemático do sistema de medição montado. Para a medição dos esforços, o rotor do dinamômetro foi acoplado no centro de usinagem, o estator foi fixado concentricamente em relação ao rotor a uma distância máxima de 2 mm (folga requerida pelo fabricante $\approx 1-2$ mm) entre o dinamômetro e o estator [48]. O cabo de transmissão de sinal foi acoplado entre o estator e o condicionador de sinal.

Figura 3. 13 - Esquemático da montagem do sistema de medição.



Fonte: Autor.

O condicionador de sinal é a unidade de controle para o dinamômetro rotativo que fornece os sinais analógicos para o DAD por meio de quatro cabos, cada um referente a um esforço medido. Além disso, ele executa a filtragem passa-baixa nos sinais analógicos com a frequência de corte de 1 kHz.

Após a filtragem analógica no condicionador, o sinal é amostrado pelo DAD, convertendo-se para o domínio digital (A/D). A taxa de amostragem foi ajustada para um valor de 10 kHz no algoritmo de aquisição de dados desenvolvido no software *LabView*TM. Esta taxa foi definida de acordo com o Teorema de Nyquist para evitar o efeito de *aliasing* no sinal adquirido. Depois de adquiridos e condicionados, os sinais foram enviados para um computador para armazenamento e pós-processamento para a avaliação da força de corte do processo de brunimento.

Antes da realização do brunimento e aquisição dos dados, verificou-se o valor da frequência natural do sistema montado com cada ferramenta, conforme recomendado pelo fabricante do dinamômetro. Notou-se que a frequência natural para ambas ferramentas era semelhante, com valor de aproximadamente $f_n = 542$ Hz.

Após a montagem do sistema de medição, mediram-se as forças F_x , F_y , F_z e M_z durante o processo de brunimento. As forças F_x e F_y atuam sobre o corpo de prova no momento do ajuste entre os centros de rotação da ferramenta e do furo. A componente F_z é a força axial (F_a) que representa a força existente resultante da remoção de material na direção axial do movimento da ferramenta.

M_z representa o momento torçor devido ao atrito entre a ferramenta e a peça decorrente da rotação. O momento torçor permite estabelecer o valor da força tangencial, F_t , como função do raio da ferramenta. Sabendo-se o valor da força axial, -se calcular a força de corte, F_c , através da Eq. 2.3, descrita no Capítulo 2 item 2.3.3.

3.5.1 Processamento dos dados

Os dados foram processados em um algoritmo elaborado no software *LabView*TM, sendo que o mesmo foi aplicado da mesma forma para todos os sinais. Esse software foi escolhido devido à facilidade de configuração do programa de aquisição e de processamento dos sinais.

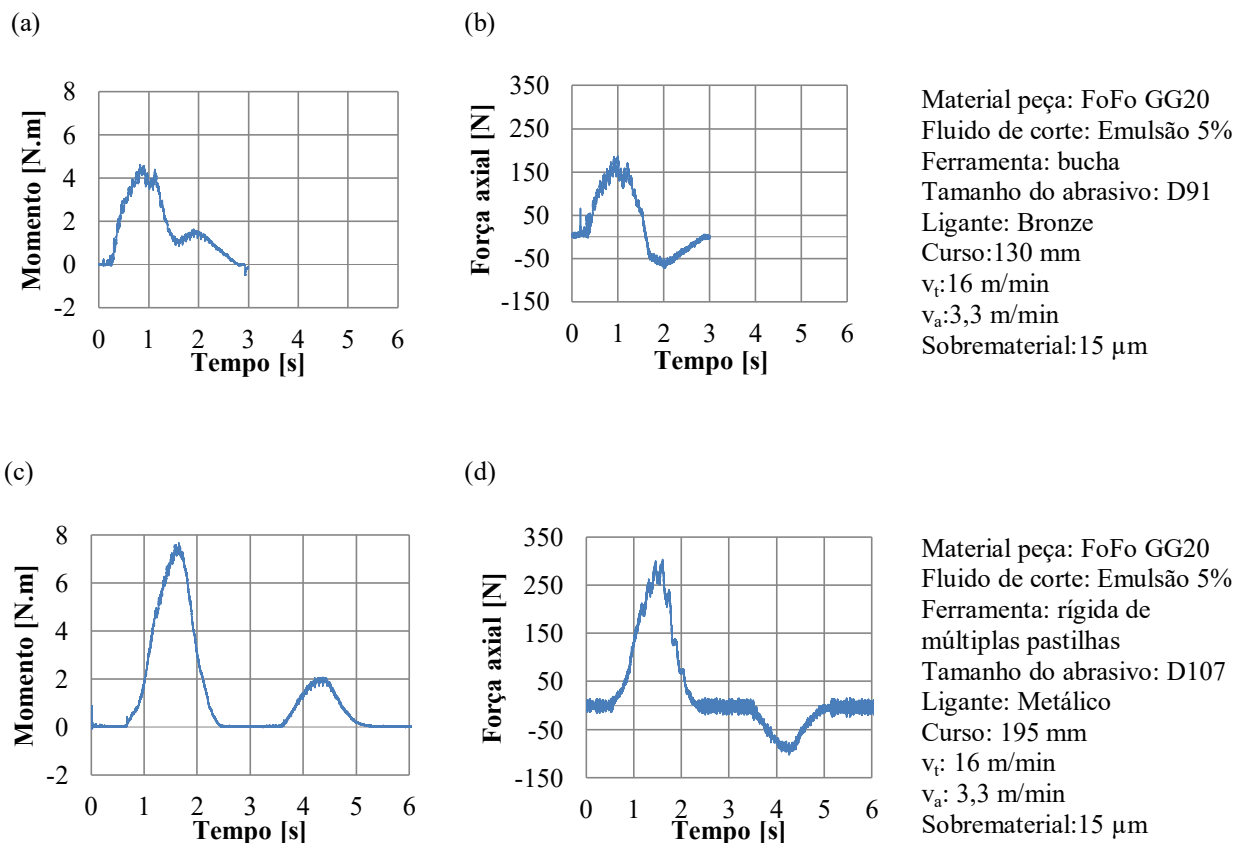
Os sinais foram adquiridos com modo de aquisição contínuo, e a taxa de aquisição de amostragem (Q) foi de 10 kHz. Tal taxa de aquisição de sinais foi utilizada, pois no canal de saída dos dados há um filtro passa-baixa de 1kHz. A leitura de amostras, ou seja, a contagem

de quantas amostras que devem ser recuperadas foi 300, e os valores máximos e mínimos de entrada possíveis variaram de -10 a 10 Volts.

O espectro de frequência é usado para apresentar as frequências de todo o sistema de forma que ao serem analisadas possa se obter as frequências que não pertencem ao processo, estas serão filtradas. Para desenvolvimento do espectro das frequências foi usada a Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* – FFT), usando a janela Hamming, com modo RMS, número de médias utilizadas foi igual a 10, com ponderação exponencial.

Os sinais, sem filtros, de força axial e momento para ambas as ferramentas, adquiridos ao longo do ciclo de brunimento, são mostrados na Figura 3.14. Os parâmetros de corte que geraram as forças apresentadas a seguir são: $v_a = 3,3$ m/min e $v_t = 16$ m/min.

Figura 3. 14 - (a) Momento referente à ferramenta bucha. (b) Força axial referente à Bucha. (c) Momento correspondente à ferramenta com pastilhas. (d) Força axial equivalente à ferramenta com pastilhas.



Fonte: Autor.

Após a aquisição dos dados aplicou-se no sinal uma sequência de filtros do tipo passa baixa de *cut-off* 70 Hz, e uma estrutura de filtros em série foi aplicada em todos os sinais adquiridos de força axial e momento para aumentar o número de coeficientes do filtro.

Essa magnitude do filtro foi definida, pois, de acordo com o fabricante do dinamômetro rotativo. Os valores aproximados aplicados ao erro de amplitude ou a precisão atingida das medições é uma função da frequência. Assim, a expressão do erro associado à medição de força axial e momento dependerá das frequências presentes no espectro de frequência do sinal adquirido, assim como da frequência natural do sistema.

A Tabela 3. 6 [48] apresenta o erro associado às medições utilizando o dinamômetro rotativo. Como a frequência de *cut-off* do filtro passa-baixa é de 70 Hz e a frequência natural do sistema montado equivale a 542 Hz. Isto resulta em uma razão ($F_{cut-off}/f_n$) de 0,13. Esta razão se aproxima mais da segunda faixa de erro, 1% do valor medido. Desta forma, pode-se calcular o erro associado a medição.

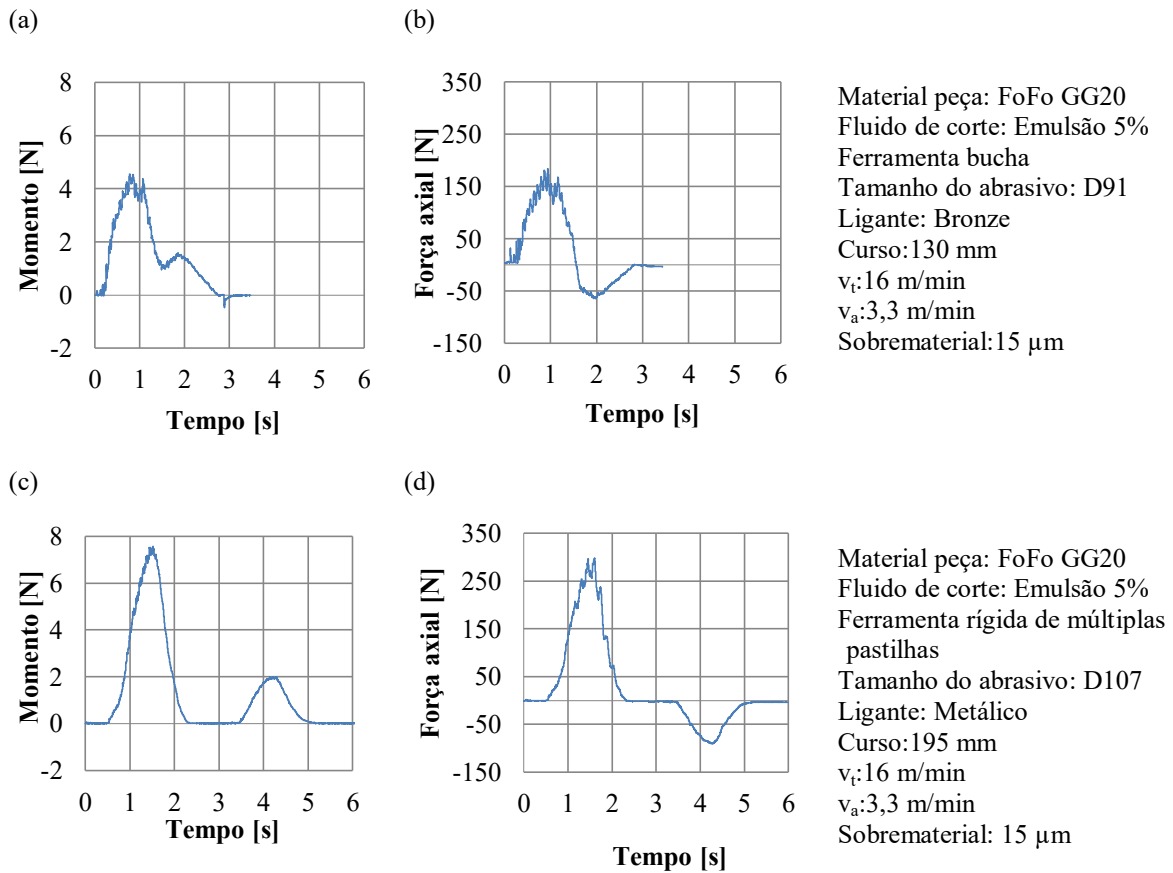
Tabela 3. 6 - Erro associado à medição com dinamômetro rotativo.

Erro	$F_{cut-off}/f_n$
10%	0,3
5%	0,2
1%	0,1

Fonte: [48].

Em todos os procedimentos de filtragem buscou-se preservar a amplitude do sinal no tempo, pois esta característica é importante com relação às forças de processo. Devido à frequência natural ser sete vezes maior que as frequências de interesse avaliadas, até 70 Hz, o fabricante do dinamômetro rotativo garante que os erros associados à medição são de, aproximadamente, 1% do valor medido. O sinal da força axial e do momento após o processo de filtragem com os filtros passa-baixa em série são apresentados na Figura 3. 15. Os parâmetros de corte que geraram os sinais apresentados são os mesmos apresentados anteriormente: $v_a = 3,3$ m/min e $v_t = 16$ m/min.

Figura 3. 15 - Sinais filtrados com passa-baixa 70 Hz.



Fonte: Autor.

3.6 MEDIÇÃO DOS ERROS DE FORMA

Os erros de forma medidos foram: circularidade e cilindricidade. Esses parâmetros foram escolhidos para verificar como a variação de parâmetros de usinagem e do tipo de ferramenta interferem na redução desses erros, pois o brunimento pode melhorar a circularidade e cilindricidade de um componente [8].

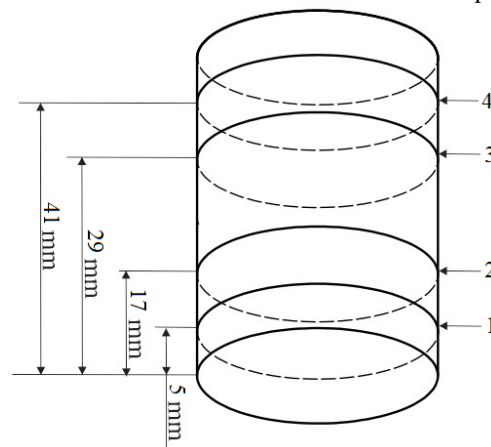
As medições foram realizadas em uma máquina de medir por coordenadas da empresa Zeiss, modelo CMM MICURA 5/5/5, utilizando um apalpador esférico com diâmetro de 3 mm. O equipamento está instalado nas dependências do Laboratório de Materiais (LABMAT - UFSC).

O software usado para adquirir as medidas geradas foi o Zeiss Calypso. As medições foram realizadas de acordo com a norma ISO 12180 [49,50] e sob a orientação apresentada através das medições iniciais realizadas pela empresa parceira.

Antes de realizar as medições foi feita a aferição da máquina, de acordo com a norma ISO 10360 [51] utilizando o escaneamento de uma esfera de cerâmica de diâmetro 30 mm. Após a aferição mediu-se primeiramente a circularidade e depois a cilindricidade.

Quanto à circularidade, mediram-se quatro circunferências ao longo do furo (posição 1, 2, 3 e 4), igualmente espaçadas em intervalos de 12 mm, iniciando as medições a 5 mm da parte inferior do furo, conforme apresentado na Figura 3.16. A estratégia usada para medir a cilindricidade foi semelhante à da medição de circularidade. O erro de cilindricidade foi gerado a partir da medição de quatro circunferências igualmente espaçadas ao longo do cilindro (Figura 3. 16). Este método está de acordo com a norma ISO 12.180-2 [49].

Figura 3. 16 - Posições de medição de circularidade e cilindricidade dos compôs de prova.



Fonte: Autor.

Foram realizadas três repetições da medição de circularidade e cilindricidade para cada peça, os valores utilizados para análise de tais erros foi a média aritmética e o desvio padrão dessas medições.

3.7 MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE

A medição da rugosidade foi feita no Labmat empregando um perfilômetro Form Talysurf, modelo i120, fabricado pela empresa Taylor Robson (Figura 3. 17). O instrumento possui um apalpador de cone esférico com ponta de diamante com raio de 2 μm , resolução 16 nm e carga de 1 mN. O procedimento de medição dos parâmetros de rugosidade foi amparado pelas normas ISO 4288 [52] e ISO 13565-2 [25].

O comprimento total varrido pelo apalpador foi de 40 mm, porém as áreas analisadas foram as iniciais e finais dos furos, pois são nas áreas as quais há maior apoio do mancal. Fize-

ram-se 3 medições de cada peça, e o valor dos parâmetros medidos é representado pela média aritmética desses valores medidos nas duas regiões analisadas. Os valores de rugosidade foram obtidos utilizando-se um *cut-off* de 0,8 mm, sendo que o comprimento amostrado foi de 5,6 mm com comprimento de avaliação (l_n) de 4 mm.

Figura 3. 17 - Perfilômetro Taylor Robson modelo Form Talysurf i120.



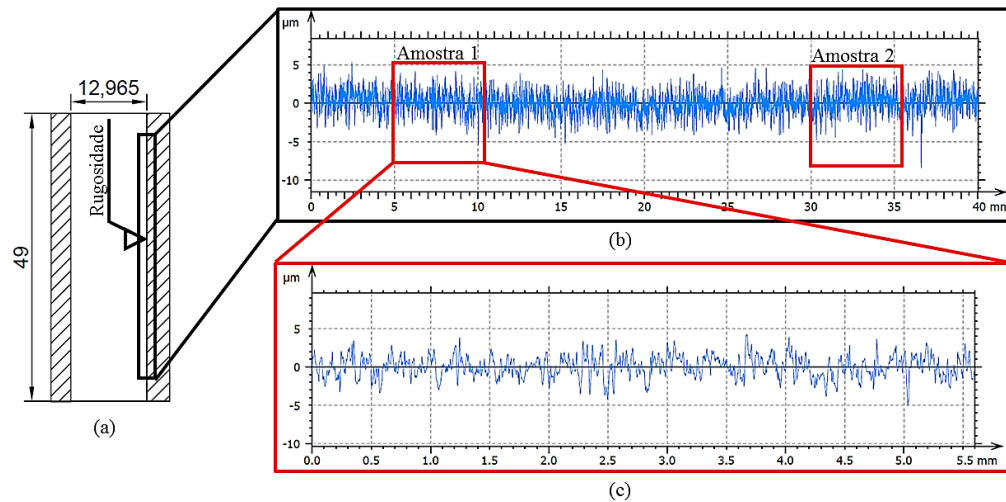
Fonte: Autor.

Foram medidos e analisados os seguintes parâmetros de rugosidade:

- Ra: Rugosidade aritmética média do perfil.
- Rz: Rugosidade de pico a vale no intervalo de amostragem.
- Rpk: Altura reduzida dos picos.
- Rk: Profundidade de rugosidade central.
- Rvk: Profundidade reduzida dos vales.

Os parâmetros Ra e Rz foram medidos, pois com eles é possível fazer o monitoramento do processo através da alteração de médias e *drifts* da média. Porém não é possível fazer a distinção entre picos e vales. Esses dois parâmetros não respondem a uma redistribuição de material acima e abaixo da linha média, por isso foram escolhidos os parâmetros da curva de abbot (Rk, Rpk e Rvk) para fazer essa distinção. A Figura 3.18 apresenta o esquema do procedimento para obtenção do perfil de rugosidade.

Figura 3. 18 - Perfil de rugosidade representativo para os diferentes ensaios, onde (a) corpo de prova, (b) sinal bruto do perfil, (c) perfil de rugosidade: filtro Gaussiano; *cut-off*: 0,8; \ln : 4mm.



Fonte: Autor.

A seguir são apresentados e discutidos os resultados dos esforços de corte, dos erros de forma e dos parâmetros de rugosidade, conforme planejamento e procedimentos apresentados.

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos ao longo da pesquisa com suas devidas análises. Ele está segmentado em quatro subdivisões: caracterização do processo, resultados das medições de forças e momento, resultados das medições dos erros de forma e da rugosidade. Os resultados das forças e momento e o intervalo de confiança associados à medição para cada um dos ensaios são apresentados no Apêndice B.

Os erros de forma e os parâmetros de rugosidade gerados com a ferramenta bucha foram analisados com os seguintes parâmetros de corte:

1. $v_a=3,3$ m/min $v_t=16$ m/min;
2. $v_a=3,3$ m/min $v_t=21$ m/min;
3. $v_a=3,3$ m/min $v_t=26$ m/min.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO

O brunimento dos furos de mancais de deslizamento foi feito com duas ferramentas distintas: ferramenta rígida de múltiplas pastilhas e do tipo bucha. Com o processo de brunimento, removeu-se um sobremetal de $7,5$ μm de material do diâmetro do furo, em um único curso da ferramenta.

Cada ferramenta apresentou um tempo de usinagem devido ao seu comprimento. A ferramenta do tipo bucha realizou todo o processo com o tempo médio de 3 segundos, já a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas, por ter maior comprimento, realizou o processo com tempo médio de 5 segundos. Com o aumento das velocidade axial, o tempo de processo diminuiu.

Segundo Juchem *apud* Schmidt [3], no brunimento convencional, a pastilha da ferramenta deve ter um comprimento igual a $2/3$ do comprimento do furo. Ela deve sair do furo durante a operação no máximo $1/3$ de seu comprimento total para evitar erros de forma no furo, como os formatos estrangulados e em barril. Entretanto, como as ferramentas de brunimento de passe único possuem 3 regiões distintas (guia, corte e calibração), a pastilha abrasiva deve sair completamente do furo ou pelo mesmo a sua região de corte deve passar pelo furo como no caso da ferramenta tipo bucha. Isto garante que todo o comprimento do furo será calibrado e terá as tolerâncias de dimensão, forma e textura respeitadas.

Na Figura 4.1 é apresentado um dos perfis de força axial e de momento ao longo do tempo gerados no brunimento de passe único com a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas e

mostra as etapas do processo. No início do brunimento (etapa 1), a ferramenta se aproxima do furo de forma que sua guia inferior esteja apoiada na parede do furo, pois dessa forma é possível realizar o pré-ajuste entre os centros da ferramenta e do furo. Além disso, evita oscilações laterais excessivas da ferramenta, uma vez que a mesma possui grau de liberdade em seu plano transversal XY. Terminado o movimento de aproximação e ajuste de centros de todo o conjunto, inicia-se a etapa de avanço axial (etapa 2).

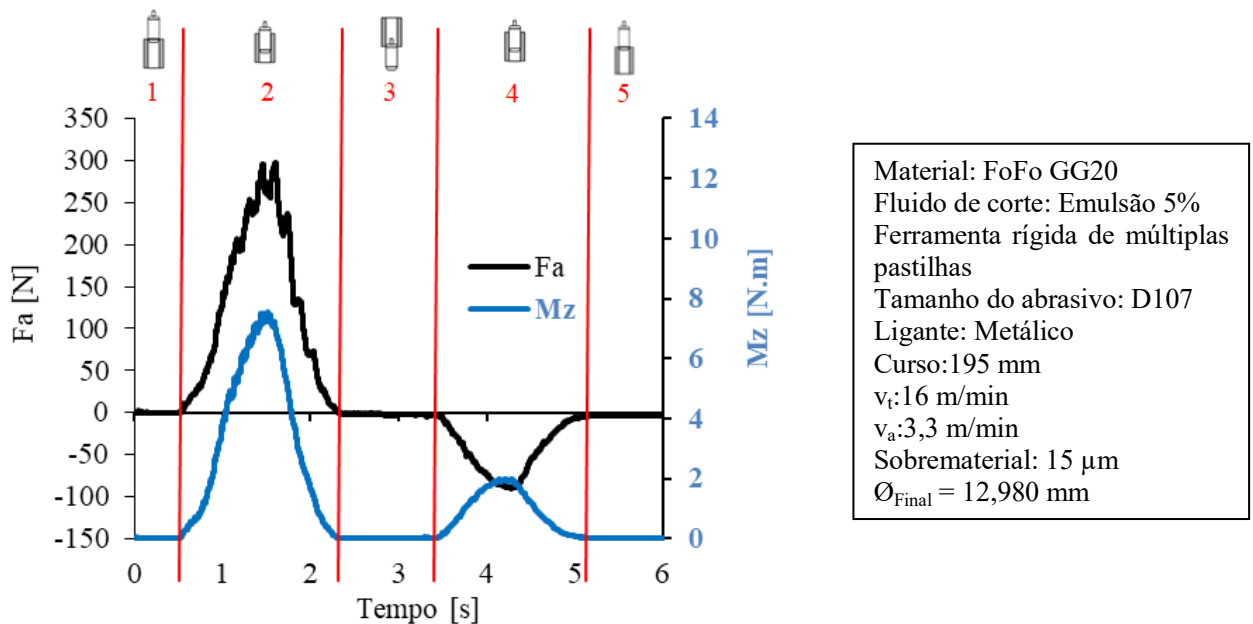
Na etapa 2, ocorre o movimento de avanço axial positivo onde há a remoção de grande parte do material gerando uma força axial (F_a) de maior magnitude, representando o processo em um único ciclo de oscilação. O fato de F_a assumir valores positivos durante o avanço axial para baixo pode ser explicado pelo sentido da força de reação que está no sentido Z^+ de medição do dinamômetro rotativo.

Após o movimento de avanço, inicia-se a etapa 3, na qual a ferramenta sai do fundo do furo. Neste momento não há remoção de material, por isso, os esforços são nulos. Na etapa 4 ocorre o retorno da ferramenta, portanto caso não houvesse deformação elástica no corpo de prova, teoricamente, deveria existir um esforço extremamente baixo durante o movimento de retorno da ferramenta devido ao atrito das pontas dos grãos abrasivos, pois todo o material já deveria ter sido removido no movimento de descida da ferramenta. Porém, verifica-se que a força axial e o momento, no retorno da ferramenta, não têm valores extremamente baixos.

Quando se trata de deformação, duas componentes estão envolvidas: plástica e elástica. A parcela plástica do material deformado é removida pelos grãos abrasivos de diamante. A parcela elástica deformada não é removida, conseqüentemente, ocorre um retorno elástico do material logo após a ferramenta sair do furo e atingir o ponto morto inferior de seu curso.

Desta forma, durante o retorno da ferramenta para a posição inicial, a porção de material decorrente do retorno elástico gera uma força resultante de resistência a este movimento. Esses esforços no retorno influenciam na dimensão, rugosidade e forma do corpo de prova.

Figura 4. 1 – Comportamento da força axial e do momento em relação ao tempo na operação de brunimento de passe único com a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.



Fonte: Autor.

Na etapa 5, a ferramenta fez o seu retorno e está fora do furo, por isso os valores dos esforços também são nulos. Os valores negativos visualizados na Figura 4.1 de F_a podem ser explicados pela alteração do sentido da força de reação exercida pelo furo brunido sobre a ferramenta, assumindo o sentido Z- de medição do dinamômetro. O mesmo comportamento descrito acima também foi verificado para o momento (M_z), porém, permanece Z+ (escala da direita) tanto no avanço quanto no retorno da ferramenta, pois o sentido de rotação não muda.

Para todas as condições de corte o ângulo formado foi aproximadamente $3,13 \pm 0,026^\circ$. Calculou-se este ângulo de acordo com a Equação 2.2 do Capítulo 2. Pode-se verificar que os ângulos formados no brunimento de passe único são significativamente menores se comparados aos ângulos de cruzamento formados no brunimento convencional devido à composição de velocidades e a cinemática do processo.

4.2 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DA FORÇA E DO MOMENTO DE USINAGEM

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados das forças de corte e momento máximos gerados ao longo dos ensaios conforme o planejamento experimental. Os resultados das forças associadas à medição para cada um dos ensaios são apresentados na Tabela B.1 no Apêndice B. Todos os resultados são representados com um intervalo de confiança associado à medição, com nível de confiança de 95%. Os valores de força e momento da bucha para

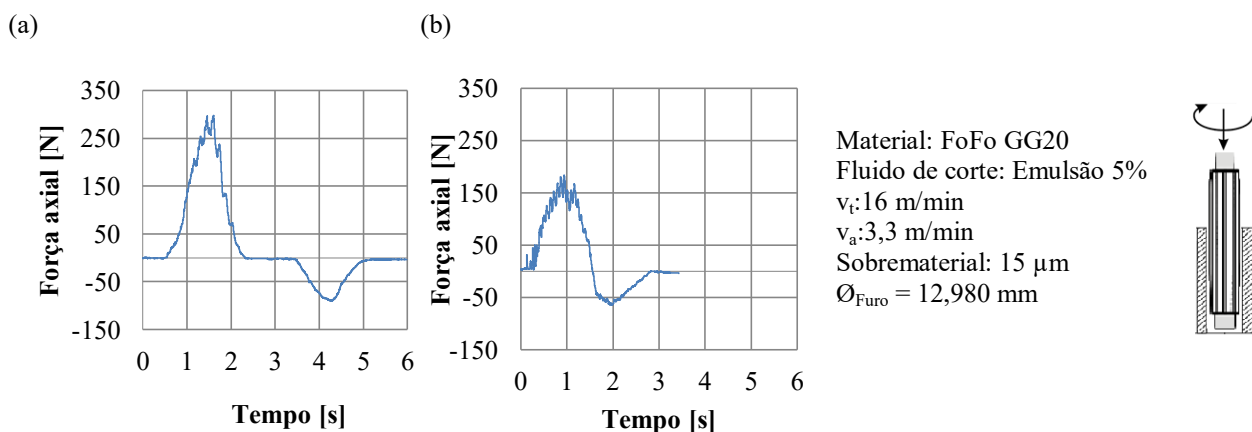
as condições de corte onde a velocidade axial é 3,9 m/min e 4,5 m/min são apresentadas para analisar o comportamento da ferramenta e não foi possível comparar o resultado com a ferramenta de múltiplas pastilhas, pois esta não suportou os todos os valores de velocidade tangencial selecionados.

A Figura 4. 2 e a Figura 4. 3 apresentam, respectivamente, a força axial e o momento para cada uma das ferramentas analisadas. Ao se comparar gráficos de forças geradas para cada ferramenta, verificou-se que existiu uma diferença entre os mesmos, visto que o tempo de usinagem é distinto devido às características das ferramentas.

No brunimento de passe único, a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas deve sair completamente do furo, pois garante que todo o comprimento do mesmo tenha as tolerâncias de dimensão, forma e textura respeitadas. Porém, não foi possível transpassar a ferramenta bucha totalmente através do furo, devido ao seu comprimento e sua montagem no mandril que poderiam levar a uma colisão com a estrutura da máquina-ferramenta. Garantiu-se que toda a zona de corte da ferramenta transpassasse o furo.

Para todas as condições de corte existe um padrão no perfil da força axial e do momento. Na Figura 4. 2 é apresentado o sinal da força axial para cada uma das ferramentas. Por ter menor comprimento e menor curso, o tempo de usinagem com a ferramenta bucha é menor.

Figura 4. 2 - Força axial equivalente à (a) ferramenta rígida de múltiplas pastilhas (b) à ferramenta tipo Bucha.



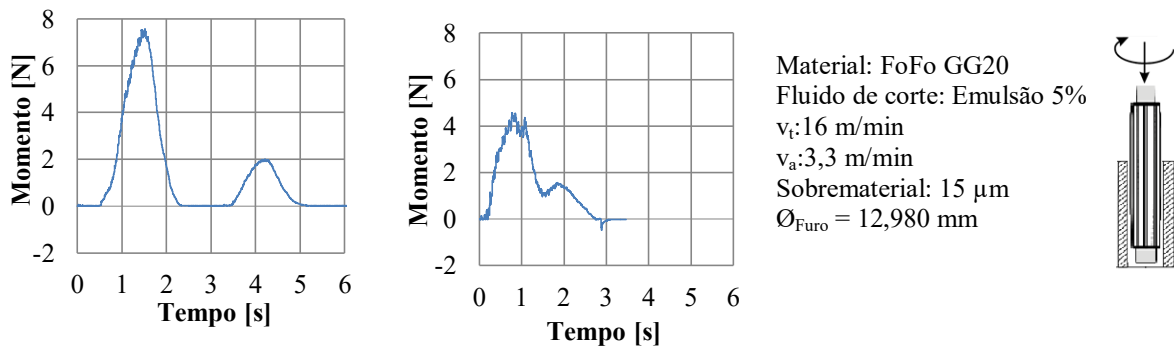
Fonte: autor.

Para a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas na condição de corte apresentada na Figura 4. 2 (a), verifica-se que entre o tempo 2 e 4 segundos, o valor da força axial é nulo visto que é o momento em que a pastilha sai completamente do furo brunido. Para a ferramenta bucha não é possível verificar esse comportamento (Figura 4. 2 (b)). Para a ferramenta com

pastilhas a força axial é nula por aproximadamente 1,5 segundos até o início de reversão do curso. Durante o intervalo sem contato entre ferramenta e amostras não existe remoção de material.

O sinal filtrado do momento, para cada uma das ferramentas, é exibido na Figura 4. 3. Para a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas (Figura 4. 3 (a)), o momento se iguala a zero em torno de 3 segundos, isso acontece, pois também é o instante que a ferramenta transpassa totalmente o furo, sem retirar material da peça. Este comportamento não é visível durante o brunimento com a ferramenta tipo Bucha, visto que a mesma não transpassa o furo completamente.

Figura 4. 3 - Momento equivalente à (a) ferramenta rígida de múltiplas pastilhas; (b) à ferramenta tipo Bucha.



Fonte: autor.

Nas próximas seções serão avaliados os resultados de força de corte e momento para cada ferramenta. Para tal, serão considerados os valores máximos dos esforços adquiridos segundo os perfis gerados com cada ferramenta no brunimento de passe único nas condições de corte pré-determinadas.

4.2.1 Força de Corte e Força axial no brunimento

A média dos valores máximos das forças de corte e axial, assim como o intervalo de confiança associado à medição, são apresentados na Tabela B.1, Apêndice B. A Figura 4. 4(a) e a Figura 4. 5 (a) mostram que, para a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas, há uma tendência de redução no valor médio das forças de corte e axial conforme o aumento da velocidade tangencial. A redução das forças apenas com o aumento da velocidade tangencial ocorre

em virtude da diminuição da seção do cavaco e também da redução do número de gumes cinemáticos atuando.

Ao se aumentar somente a velocidade tangencial da ferramenta, a taxa de remoção de material se mantém constante. Sendo assim, um mesmo grão penetra no material da peça com menor profundidade, uma vez que passa por uma mesma região da peça mais vezes por unidade de tempo. Ou seja, a quantidade de material removida por rotação da ferramenta se reduz e a seção de cavaco é reduzida. Como a quantidade de material removida por grão é menor, ou seja, uma menor penetração de corte, a quantidade de gumes cinemáticos atuando sobre a peça também se reduz. Tais alterações favorecem a obtenção de menores forças [6].

Esse comportamento também é verificado por Freitas [5], que observou um comportamento linear inversamente proporcional entre a força de corte e a velocidade tangencial e diretamente proporcional entre F_c e a velocidade axial. Além disso, o autor concluiu que para a força de corte não há interação entre as velocidades tangencial e axial, sendo elas independentes entre si.

Figura 4. 4 - Resultados das forças axiais no brunimento com a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas (a) e com a ferramenta bucha (b) em função das velocidades tangenciais e de avanço.

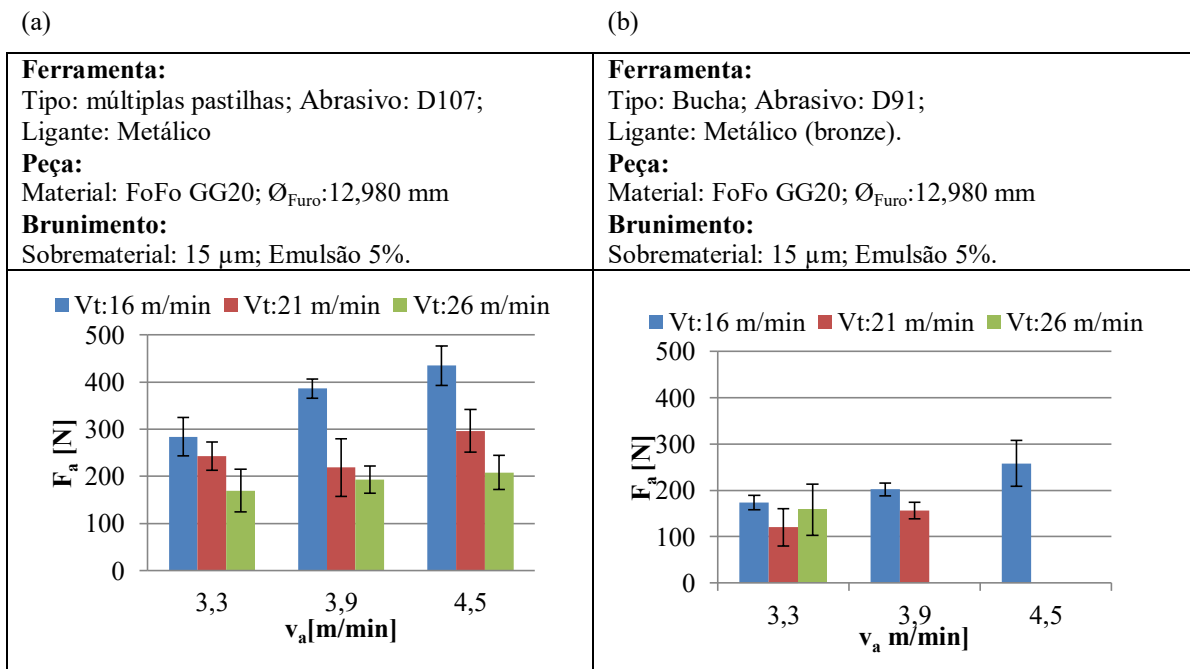
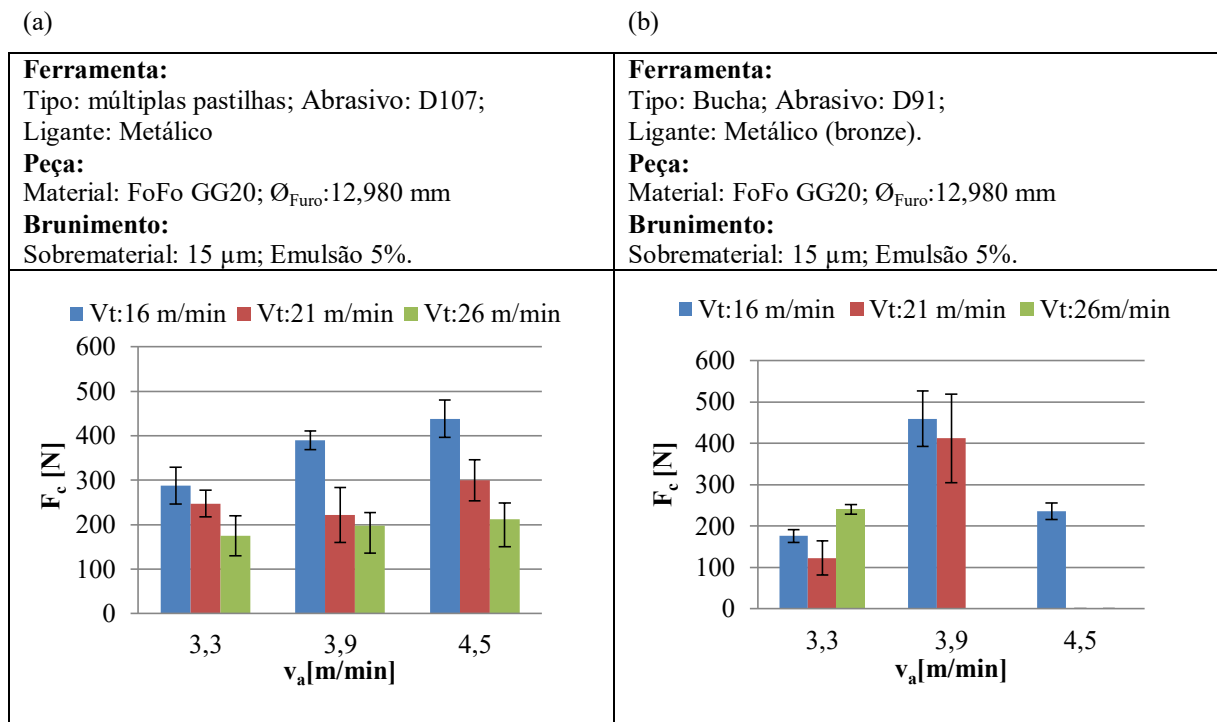


Figura 4. 5 - Resultados das Forças de corte com a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas (a) e para ferramenta bucha (b) em função das velocidades tangenciais e de avanço.



Fonte: Autor.

Além da relação das forças com a velocidade tangencial, nota-se que o valor médio das forças cresce com o aumento da velocidade axial para a condição $V_t=16$ m/min. Esse comportamento era esperado, visto que a ferramenta remove uma mesma quantidade de material em um menor intervalo de tempo. Desse modo, cada grão abrasivo remove uma maior quantidade de material, o que aumenta as contribuições do atrito e deformações do material da peça sobre a força de corte.

Pela Equação 4.1 é possível verificar como há um aumento da força de corte com o aumento da velocidade axial, o que acontece devido ao aumento da taxa de remoção de material. A equação representa a taxa de remoção de material no processo de brunimento de passe único.

$$\dot{Q} = \frac{1}{240} \pi (D^2 - d^2) v_a \quad (4.1)$$

Onde:

\dot{Q} : taxa de remoção de material [mm^3/s]

D: diâmetro ajustado na ferramenta [mm]

d: diâmetro do furo de entrada [mm]

v_a : velocidade axial [mm/min]

Considerando o diâmetro ajustado na ferramenta igual a 12,980 mm e o diâmetro do furo igual a 12,965, o valor da taxa de remoção de material para cada velocidade axial analisada é dado pela Tabela 4. 1.

Tabela 4. 1 - Valor da taxa de remoção de material.

v_a [m/min]	\dot{Q} [mm ³ /s]
3,3	16,76
3,9	19,84
4,5	22,92

Fonte: Autor.

Por ter uma área de contato maior que a ferramenta de múltiplas pastilhas, esperava-se que as forças geradas com a ferramenta bucha fossem maiores [8]. Porém, as forças geradas com a esta segunda ferramenta foram menores. Além disso, o comportamento de aumento linear da força de corte apresentado no emprego com ferramenta rígida de múltiplas pastilhas não foi verificado no emprego com ferramenta bucha. Para a ferramenta tipo bucha (Figura 4. 5(b)) não foi observada uma tendência clara com estas condições de corte. O que pode ser percebido é que para uma velocidade tangencial de 21 m/min e velocidade axial (v_a) de 3,3 m/min há uma redução significativa no valor médio da força de corte.

Ademais, a força aumenta consideravelmente para uma velocidade axial igual a 3,9 m/min. A variação de força pode ser justificada por se tratar dos instantes iniciais da ferramenta, já que nos instantes iniciais de vida da ferramenta de brunimento existe uma grande aleatoriedade na magnitude dos parâmetros da força, característica esta que foi observada no emprego da ferramenta tipo bucha. Quando o intervalo de confiança é avaliado, nota-se sua alta taxa de variação.

A explicação para tal comportamento é correlacionada ao emprego da ferramenta em condições de início do tempo de vida da ferramenta [5]. O emprego da ferramenta no início de seu tempo de vida foi responsável pela grande flutuação do intervalo de confiança. Não foi possível obter ferramentas já condicionadas, pois as mesmas foram fornecidas pela empresa parceira, sendo que a ferramenta tipo bucha não é utilizada nos processos de fabricação dos mancais de deslizamento na unidade da empresa no Brasil. A Tabela 4.2 apresenta a porcentagem de aumento, para valores positivos e redução, para valores negativos, das forças axiais (F_a) e de corte (F_c) em relação às velocidades tangencial (v_t) e axial (v_a) para cada ferramenta analisada.

Tabela 4. 2 - Porcentagem de variação das forças em relação às velocidades tangencial e axial para ferramenta com pastilhas e com bucha.

	Ferramenta:		Pastilhas		Bucha	
	v_t (m/min)		Força axial (F_a)	Força de corte (F_c)	Força axial (F_a)	Força de corte (F_c)
$v_a:3,3$ m/min	16 → 21		-15%	-14%	-31%	-30%
	21 → 26		-30%	-29%	32%	30%
	16 → 26		-40%	-39%	-9%	-9%
$v_a:3,9$ m/min	16 → 21		-43%	-43%	-23%	-22%
	21 → 26		-12%	-11%		
	16 → 26		-50%	-49%		
$v_a:4,5$ m/min	16 → 21		-32%	-32%		
	21 → 26		-30%	-29%		
	16 → 26		-52%	-52%		
	v_a (m/min)		Força axial (F_a)	Força de corte (F_c)	Força axial (F_a)	Força de corte (F_c)
$v_t:16$ m/min	3,3 → 3,9		36%	35%	17%	16%
	3,9 → 4,5		13%	12%	28%	27%
	3,3 → 4,5		53%	52%	49%	48%
$v_t:21$ m/min	3,3 → 3,9		-10%	-10%	30%	30%
	3,9 → 4,5		35%	35%		
	3,3 → 4,5		22%	21%		
$v_t:26$ m/min	3,3 → 3,9		14%	13%		
	3,9 → 4,5		8%	7%		
	3,3 → 4,5		23%	21%		

Fonte: Autor.

É possível verificar com a Tabela 4.2 que com o aumento da velocidade tangencial é pode-se obter uma redução de até 50% no valor das forças para a ferramenta com pastilhas. Porém, as forças pode aumentar na mesma intensidade quando a velocidade axial é aumentada. Quanto a ferramenta com bucha não é possível verificar um padrão de variação, por isto com esta ferramenta é necessário avaliar a composição das velocidades para analisar as forças. Nota-se que para esta ferramenta a composição de velocidades que geram as menores forças é $v_t=21$ m/min e $v_a=3,3$ m/min. Para a ferramenta com pastilhas a composição de velocidade que geram as menores forças é $v_t=26$ m/min e $v_a=3,3$ m/min.

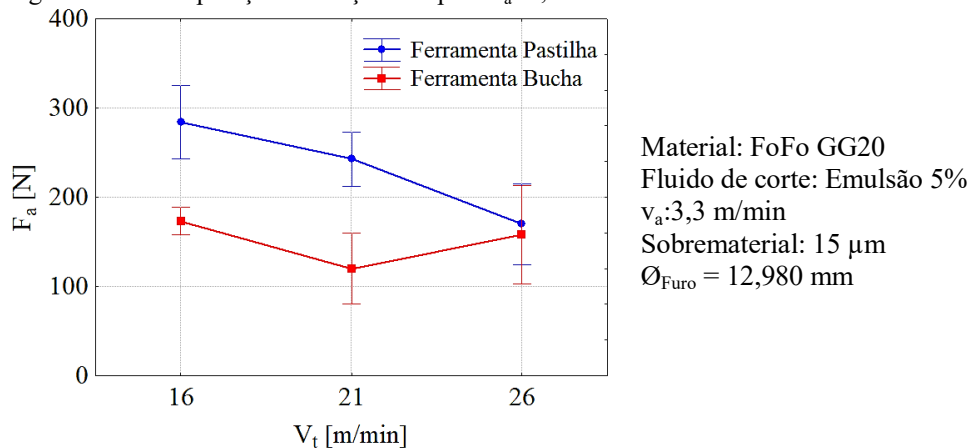
Para comparar as forças geradas por cada uma das ferramentas fixou-se o valor de $v_a=3,3$ m/min e se variou v_t , pois essas são as condições de corte com respostas geradas para ambas às ferramentas. Neste caso, o ensaio com a ferramenta bucha deveria ser feito, porém devido as questões de taxa de ocupação da máquina-ferramenta devido à alta produtividade da empresa parceira não foi possível realizar os testes novamente.

Analisando a Figura 4. 6 e a Figura 4. 7 verifica-se que F_a e F_c para a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas possuem maior magnitude quando comparadas com as forças geradas com a ferramenta tipo Bucha. Apesar da área de contato da bucha ser maior que a da ferramenta com pastilhas, o que poderia gerar maiores forças, pois uma maior quantidade de grãos estariam atuando na remoção do material, as forças geradas com a ferramenta bucha foram menores.

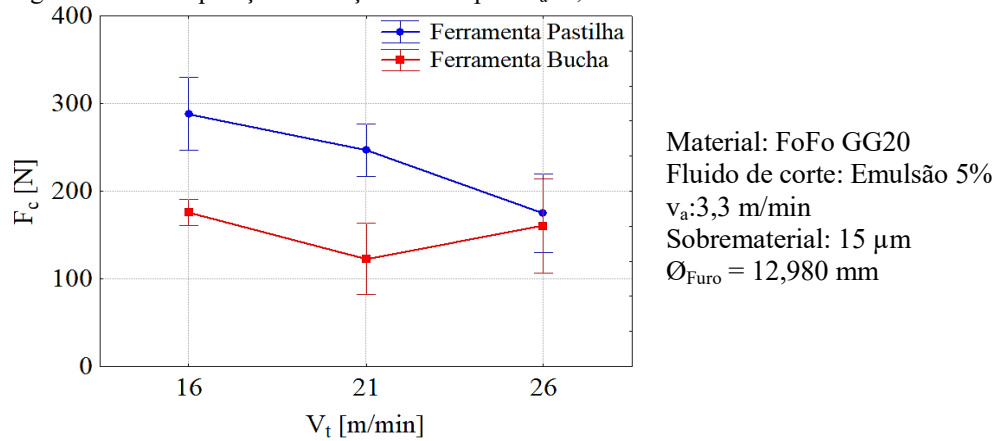
Alguns fatores conjuntos fizeram com que as forças geradas com a bucha fossem de menor magnitude que a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas, sendo eles: o tamanho médio do abrasivo da bucha é menor e o ligante da ferramenta de múltiplas pastilhas intensifica a retenção do grão [2]. Assim, a pressão específica no brunimento com a ferramenta bucha é menor, ou seja, o grão não penetra o suficiente. Além disso, a ferramenta com bucha é obtida por um revestimento galvânico e em decorrência tem um volume de poros maior que a ferramenta com pastilhas. As pastilhas são obtidas por sinterização e o volume de poros se estabelece pelo atrito dos cavacos com o ligante, de forma que a força de corte é composta tanto pela ação do corte como também pelo atrito dos cavacos com o fundo dos vales entre os grãos.

Apesar do tamanho do grão abrasivo das pastilhas ser maior que o da bucha, o que leva a uma espessura de cavaco maior para a mesma taxa de remoção, a força resultante esperada deveria ser menor. No entanto, em ferramentas sinterizadas, o atrito do cavaco com o ligante se torna mais intenso e em decorrência disso, ocorre o aumento da força. Na ferramenta com bucha o volume de poros é menor, pelo processo de fabricação, o que diminui o atrito, logo a força de corte gerada é menor.

Figura 4. 6 - Comparação da força axial para $v_a=3,3$ m/min.



Fonte: Autor.

Figura 4. 7 - Comparação da força de corte para $v_a=3,3$ m/min.

Fonte: Autor.

Como somente a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas suportou todas as condições de corte selecionadas, foi feita a análise de variância com os dados obtidos para verificar quais fatores mais influenciaram na força de corte e nos demais parâmetros estudados. A Tabela 4.3 apresenta a análise de variâncias obtida a partir dos dados presentes no Apêndice B. Utilizando o software StatisticaTM realizou-se a análise de variância com o objetivo de verificar o tipo de interação entre os fatores, a resposta (quadráticas ou lineares) e qual fator mais influencia no valor de F_c .

Tabela 4. 3 - Análise de Variâncias de experimento quadrático completo para F_c da ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.

Fator	SS	v	MS	F	p
v_a (L)	28840,8	1	28840,8	17,26327	0,000595
v_a (Q)	4803,2	1	4803,2	2,87507	0,107189
v_t (L)	144087,1	1	144087,1	86,24626	0,000000
v_t (Q)	4351,3	1	4351,3	2,60456	0,123950
v_a (L)/ v_t (L)	5441,4	1	5441,4	3,25707	0,087874
Falta de Ajuste	12265,0	3	4088,3	2,44715	0,097056
Erro Puro	30071,7	18	1670,6		
Total	222910,2	26			

Legenda: (L): Linear - (Q): Quadrático

V_a : Velocidade axial - V_t : Velocidade tangencial. SS: Soma dos quadrados;

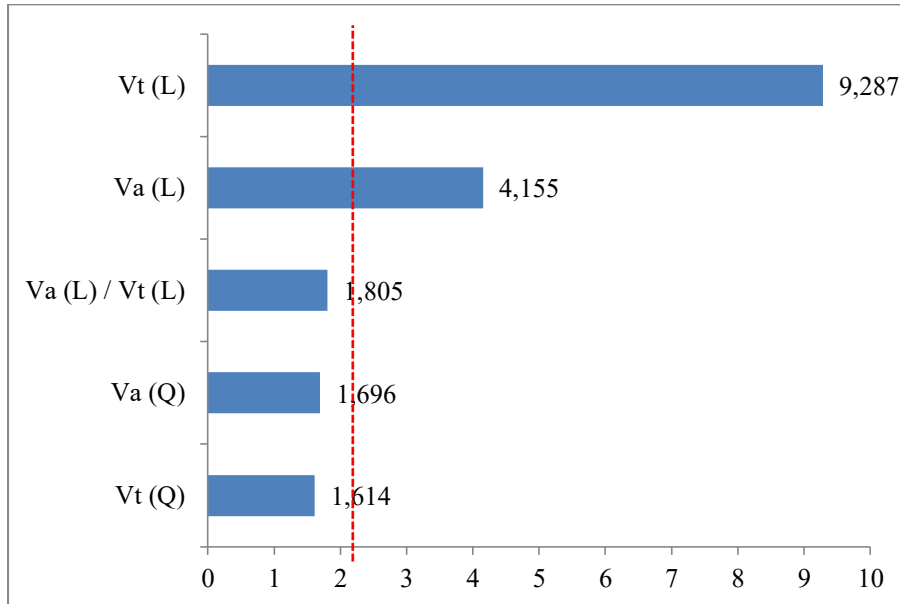
v: graus de liberdade; MS: média quadrática

Fonte: autor

Observa-se na Figura 4. 8 que os fatores que exercem maior influência sobre a F_c são as velocidades tangencial e axial, ambas de forma linear. A linha tracejada vertical na Figura 4. 8 apresenta o valor absoluto dos efeitos padronizados 2,2 e indica quais os efeitos mostrados

são significativos. O parâmetro “ $v_a(L)/v_t(L)$ ” apresentado no gráfico é referente à interação linear entre as velocidades tangencial e axial.

Figura 4. 8 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para F_c para a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.



Legenda:(L): Linear - (Q): Quadrático - v_a : Velocidade axial - v_t : Velocidade tangencial

$v_a(L)/v_t(L)$: interação $v_t v_a$

Fonte: autor.

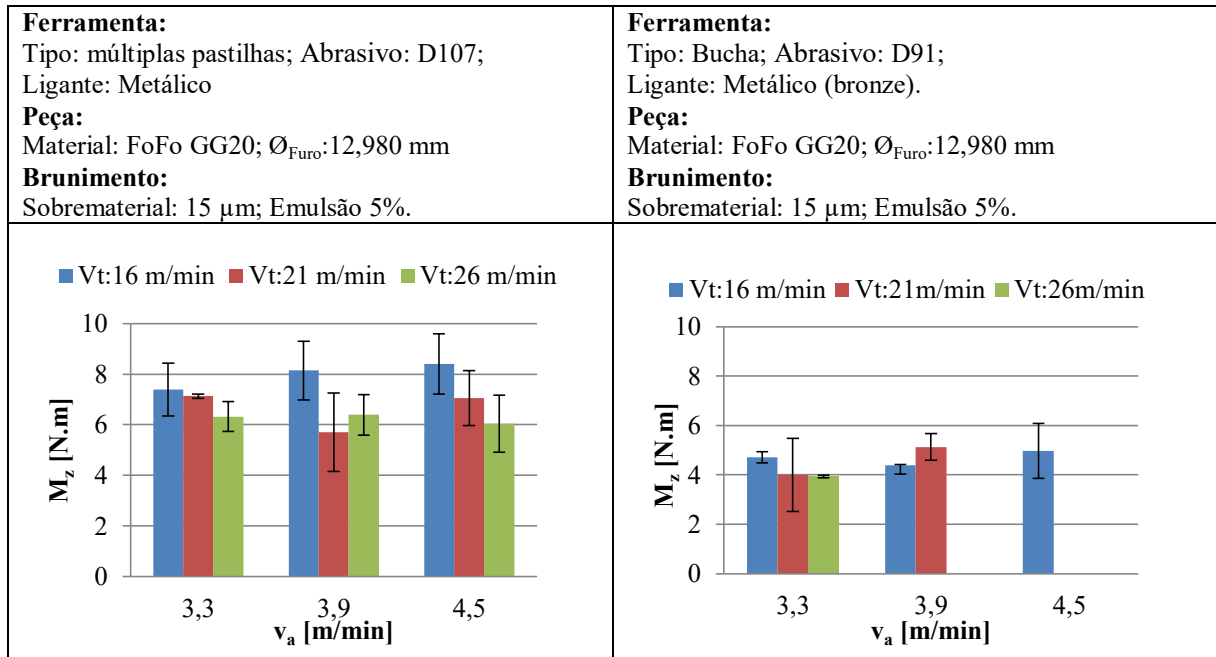
4.2.2 Momento Torçor no brunimento

Por ser dependente da força tangencial (Equação 2.4), o comportamento do momento, ao se variar as condições de corte, é regido pelo comportamento da força tangencial (Equação 2.3). Considerando os valores médios do momento para a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas, verifica-se a tendência de redução do momento com o aumento da velocidade tangencial como é mostrado na Figura 4.9. Ao se analisar o comportamento do momento quanto à velocidade axial, não é verificado um padrão de comportamento. Quanto à ferramenta bucha, nota-se que o valor médio do momento diminui com o aumento da velocidade tangencial para $v_a=3,3$ m/min.

Figura 4. 9 - Momentos no brunimento com a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas (a) e para ferramenta bucha (b) para as distintas velocidades tangenciais e de avanço.

(a)

(b)



Fonte: Autor.

A avaliação do intervalo de confiança associado à medição, não há diferença significativa entre os momentos em todas as condições de corte. Esse alto valor de intervalo de confiança pode ser causado pelo desvio de posicionamento que há entre a ferramenta e a peça, pela variação de sobrematerial removido e pelo início da vida da ferramenta [5].

Na Tabela 4.4 é apresentado o valor de redução e aumento do momento (M_z) em relação às velocidades axial (v_a) e tangencial (v_t) para cada ferramenta utilizada. Com a tabela 4.4 é possível verificar que a variação do momento é menor se comparado com a variação das forças quando as velocidades são aumentadas.

Tabela 4. 4 - Porcentagem de variação do momento em relação a variação da velocidade axial e tangencial para ferramenta com pastilhas e com bucha.

	Ferramenta:	Pastilhas	Bucha
	v_t (m/min)	Momento (M_z)	Momento (M_z)
$v_a:3,3$ m/min	16 → 21	-3%	-17%
	21 → 26	-11%	-2%
	16 → 26	-14%	-18%
$v_a:3,9$ m/min	16 → 21	-30%	17%
	21 → 26	12%	
	16 → 26	-21%	
$v_a:4,5$ m/min	16 → 21	-16%	
	21 → 26	-14%	
	16 → 26	-28%	
	v_a (m/min)	Momento (M_z)	Momento (M_z)
$v_t:16$ m/min	3,3 → 3,9	10%	-9%
	3,9 → 4,5	3%	14%
	3,3 → 4,5	14%	4%
$v_t:21$ m/min	3,3 → 3,9	-20%	28%
	3,9 → 4,5	24%	
	3,3 → 4,5	-1%	
$v_t:26$ m/min	3,3 → 3,9	1%	
	3,9 → 4,5	-5%	
	3,3 → 4,5	-4%	

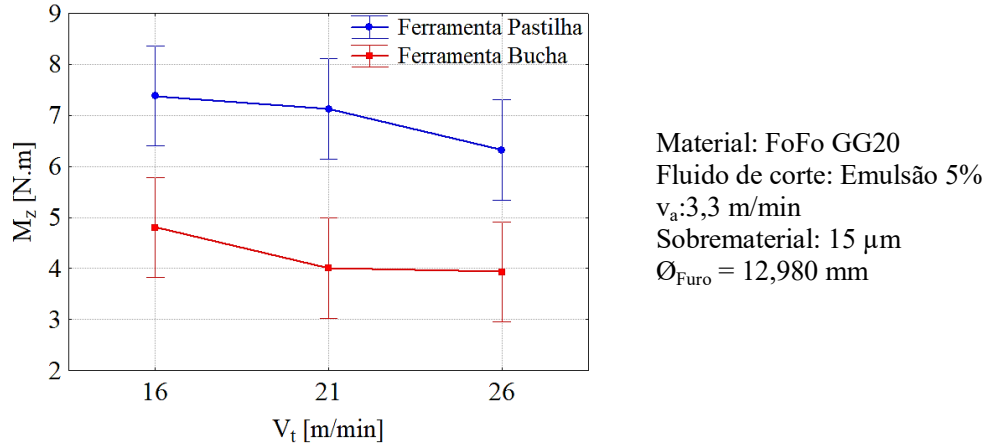
Fonte: Autor.

Para comparar os resultados dos momentos para cada ferramenta, considerou-se $V_a=3,3$ m/min e a velocidade tangencial foi variada. Na Figura 4. 10 é possível observar que os momentos gerados com a ferramenta com pastilhas são maiores que os medidos na usinagem com a ferramenta tipo bucha. Esse comportamento está relacionado com as forças geradas no brunimento, como exposto, as forças na usinagem com a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas foram maiores que as geradas com a bucha. Isto ocorre devido ao tamanho do grão, ao tipo de fabricação das ferramentas e ao tipo do ligante de cada ferramenta.

O ligante metálico da ferramenta com múltiplas pastilhas consegue reter melhor o grão quando comparado com o ligante da ferramenta bucha; ademais os grãos da ferramenta rígida de múltiplas pastilhas são maiores. As ferramentas com bucha, produzidas por galvanoplastia apresentam um volume de poros maior permitindo que o cavaco formado seja armazenado no volume de poros. As pastilhas sinterizadas apresentam um volume de poros gerado pelo pró-

prio escoamento dos cavacos, de forma que ocorre um atrito significativo entre os cavacos e o ligante dos grãos abrasivos.

Figura 4. 10 - Comparação de momento no brunimento dos furos para $v_a=3,3$ m/min.



Fonte: Autor.

Como não foi possível fazer a análise de variância considerando o tipo de ferramenta como um fator de influência sobre os parâmetros analisados, devido ao comportamento da ferramenta bucha que não suportou todas as condições de corte. Esse comportamento limitou a quantidade de dados adquiridos. Por isso, fez-se a análise de variância da ferramenta rígida de múltiplas pastilhas considerando as velocidades como fatores com três níveis cada. A Tabela 4. 5 contém os dados obtidos pela análise de variância para o momento com a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas. Nota-se que o fator que mais influenciou de forma linear no valor do momento foi a velocidade tangencial.

Tabela 4. 5 - Análise de Variâncias de experimento quadrático completo para M_z da ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.

Fator	SS	v	MS	F	p
v_a (L)	0,22894	1	0,22894	0,21318	0,649816
v_a (Q)	0,18160	1	0,18160	0,16910	0,685765
v_t (L)	14,18999	1	14,18999	13,21333	0,001894
v_t (Q)	1,41135	1	1,41135	1,31421	0,266645
v_a (L)/ v_t (L)	0,91810	1	0,91810	0,85491	0,367398
Falta de Ajuste	4,00368	3	1,33456	1,24271	0,323527
Erro Puro	19,33047	18	1,07391		
Total	39,83980	26			

Legenda: (L): Linear - (Q): Quadrático

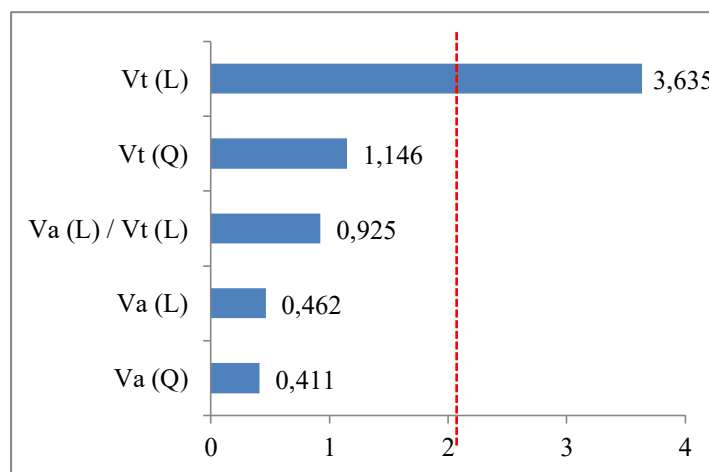
v_a : Velocidade axial - v_t : Velocidade tangencial. SS: Soma dos quadrados;

v: graus de liberdade; MS: média quadrática.

Fonte: autor

A Figura 4. 11 ilustra o diagrama de Pareto demonstrando os efeitos de cada um dos 2 fatores analisados, bem como o efeito das interações entre os fatores, para a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas. O diagrama demonstra claramente que a velocidade tangencial contribui com a parcela mais significativa sobre o momento torçor gerado pela força tangencial. Essa contribuição acontece de forma inversa, de modo que ao aumentar v_t diminui-se M_z . Com o aumento da velocidade de corte, aumenta-se a densidade do fluxo de calor para a peça, elevando a temperatura que causa um amolecimento do material da peça, segundo Gao *et al* [53]. Esse comportamento pode causar uma redução na força de corte e no momento.

Figura 4. 11 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para M_z para a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.



Legenda: (L): Linear - (Q): Quadrático - v_a : Velocidade axial - v_t : Velocidade tangencial

v_a (L)/ v_t (L): interação v_t v_a

Fonte: autor.

4.3 ERROS DE FORMA

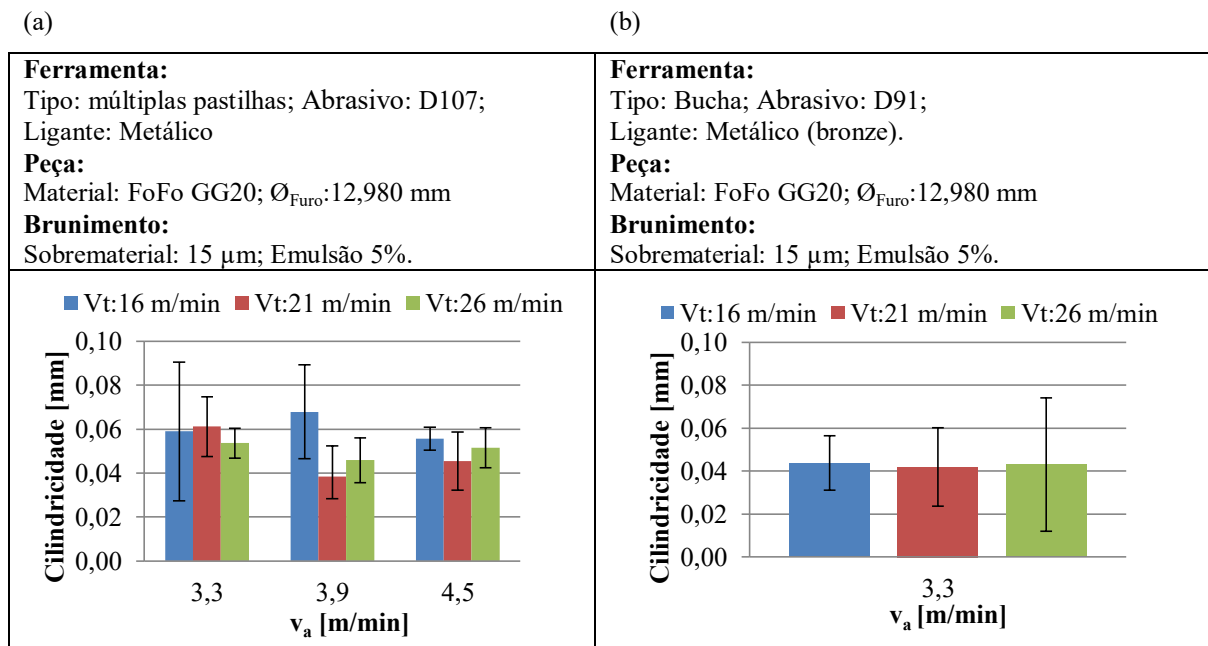
Os desvios de forma considerados nesta seção compreendem a cilindricidade de pico a vale e a circularidade de pico a vale, descritos no Anexo II. Esse capítulo será dividido em dois, um referente ao desvio de cilindricidade e o outro referente à circularidade, gerados no brunimento de passe único com cada ferramenta analisada.

4.3.1 Cilindricidade

Nos gráficos da Figura 4.12 são apresentados os efeitos da variação das velocidades na cilindricidade dos furos brunidos dos corpos de prova. Como pode ser observado, existe uma aleatoriedade nos resultados do valor médio do desvio de cilindricidade. Para a ferramenta bucha o valor médio da cilindricidade se mantém constante apesar do aumento da velocidade tangencial, a variação máxima da cilindricidade neste caso é de 4% (Tabela 4.6).

O intervalo de confiança para ambas foi maior que o esperado; esse comportamento ocorreu, pois o desvio de cilindricidade obtido no furo durante a estabilização da ferramenta tem um comportamento aleatório [5]. Ademais, o ajuste do centro das ferramentas com o furo da peça era limitado, o que gerou vibrações que também influenciaram no desvio de cilindricidade.

Figura 4. 12 - Resultados da cilindridade com a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas (a) e para ferramenta bucha (b) para as diferentes velocidades tangenciais e de avanço.



Fonte: Autor.

Ao se comparar os resultados dos desvios de cilindridade nas mesmas condições de corte (Figura 4. 13) verifica-se que o valor médio das cilindridades gerado com a ferramenta bucha é menor que o valor produzido com a rígida de múltiplas pastilhas. Porém considerando o valor do intervalo de confiança, analisando este parâmetro, não há diferença significativa entre as ferramentas.

Na Tabela 4.6 é apresentado o valor das porcentagens referentes à variação da cilindridade para cada ferramenta ao se variar as velocidades. Pode-se observar que existe uma maior variabilidade da cilindridade gerada com a ferramenta com pastilhas do que com a ferramenta com bucha.

Tabela 4. 6 - Variação em porcentagem da cilindricidade com a variação das velocidades para ferramenta com pastilhas e com bucha.

	Ferramenta:	Pastilhas	Bucha
	v_t (m/min)	Cilindricidade	Cilindricidade
$v_a:3,3$ m/min	16 → 21	49%	-4%
	21 → 26	-12%	3%
	16 → 26	31%	-2%
$v_a:3,9$ m/min	16 → 21	-32%	
	21 → 26	19%	
	16 → 26	-19%	
$v_a:4,5$ m/min	16 → 21	-18%	
	21 → 26	14%	
	16 → 26	-7%	
	v_a (m/min)	Cilindricidade	Cilindricidade
$v_t:16$ m/min	3,3 → 3,9	37%	
	3,9 → 4,5	-1%	
	3,3 → 4,5	36%	
$v_t:21$ m/min	3,3 → 3,9	-37%	
	3,9 → 4,5	18%	
	3,3 → 4,5	-26%	
$v_t:26$ m/min	3,3 → 3,9	-14%	
	3,9 → 4,5	12%	
	3,3 → 4,5	-4%	

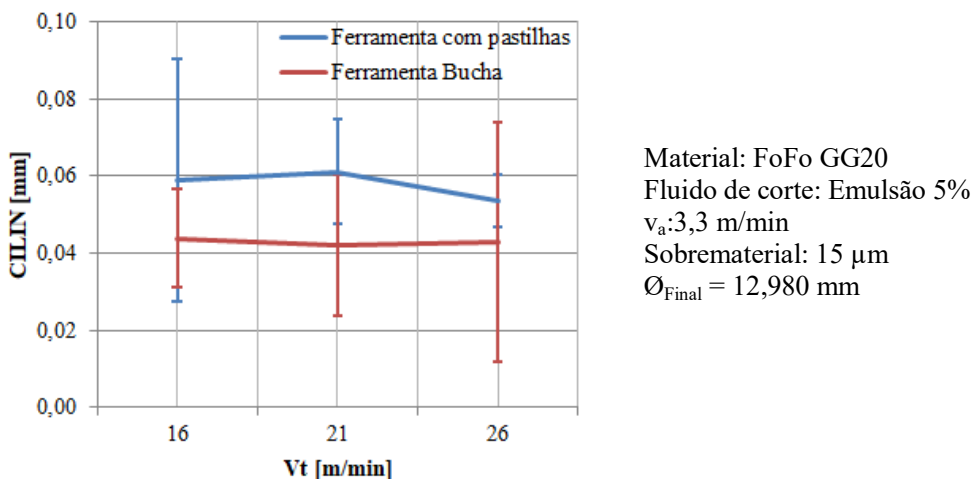
Fonte: Autor.

Segundo Schmidt [3], para ferramentas do tipo bucha, a interação entre velocidade periférica baixa e curso pequeno resulta em erros de cilindricidade menores. Como as velocidades são as mesmas para as ferramentas, o curso influenciou na redução do desvio de cilindricidade, pois o curso da ferramenta bucha é menor que o da rígida de múltiplas pastilhas. Segundo o autor, o efeito prejudicial causado pelo curso mais longo e pela velocidade periférica mais elevada sobre a geometria do furo brunido deve-se ao “chicoteamento” da ferramenta.

Peres [2] verificou um comportamento diferente em relação ao curso da ferramenta; segundo o autor, que estudou a variação de cilindricidade com a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas, menores cursos podem gerar erros de forma mais elevados enquanto que com o curso maior são obtidos os menores erros de cilindricidade na fabricação das peças. Como a comparação é feita com ferramentas diferentes e a cilindricidade da ferramenta bucha que possui um menor curso em relação à de múltiplas pastilhas, observou-se que neste caso o curso menor gerou um menor desvio de cilindricidade.

Além desses fatores, por ter maior comprimento, a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas tem maior ângulo de inclinação se comparada com a ferramenta bucha, o que implica em maiores vibrações e pode intensificar os erros de forma. Outro fator que influenciou para a redução da cilindridade na utilização da ferramenta bucha foram as forças do processo. As forças no processo de brunimento de passe único com a ferramenta bucha são menores, o que pode gerar menores vibrações. Estas vibrações podem piorar significativamente a cilindridade do furo das peças [36].

Figura 4. 13 - Comparação da cilindridade dos furos brunidos dos corpos de prova para $v_a=3,3$ m/min.



Fonte: autor.

A Tabela 4. 7 e o gráfico de Pareto (Figura 4. 14) foram gerados com os dados obtidos no brunimento de passe único com a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas. Eles confirmam que a velocidade tangencial e axial não tem influência significativa sobre a cilindridade. Esse comportamento pode ser claramente visto quando se analisam os resultados dos valores médios da cilindridade obtidos com a ferramenta bucha.

Segundo König [6], no brunimento convencional, a melhoria da cilindridade e da circularidade está correlacionada com a velocidade resultante, ou seja, o valor das velocidades tangencial e axial pode ser aperfeiçoado para gerar menores erros de forma. Esse comportamento não se aplica ao brunimento de passe único, visto que nesse processo a ferramenta transpassa o furo somente uma vez. Portanto, a relação entre o curso e as velocidades tem maior influência na redução do desvio de cilindridade, como visto por Schmidt [3].

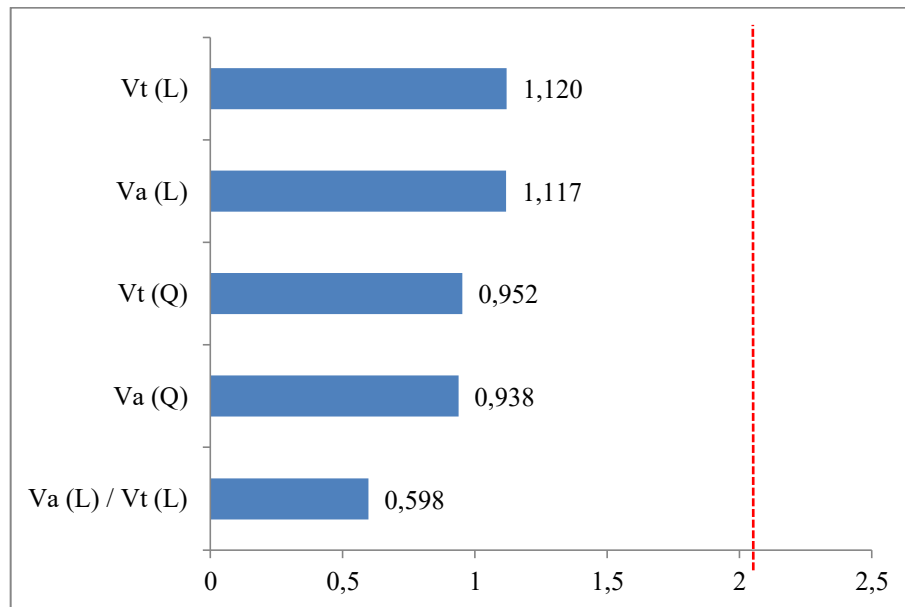
Tabela 4. 7 - Análise de Variâncias de experimento quadrático completo para cilindridade da ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.

Fator	SS	v	MS	F	p
v_a (L)	0,000223	1	0,000223	0,879071	0,360867
v_a (Q)	0,000230	1	0,000230	0,906342	0,353697
v_t (L)	0,000317	1	0,000317	1,253702	0,277565
v_t (Q)	0,000316	1	0,000316	1,247967	0,278631
v_a (L)/ v_t (L)	0,000090	1	0,000090	0,357281	0,557466
Falta de Ajuste	0,000752	3	0,000251	0,989845	0,419852
Erro Puro	0,004558	18	0,000253		
Total	0,006512	26			

Legenda: (L): Linear - (Q): Quadrático - v_a : Velocidade axial - v_t : Velocidade tangencial.

Fonte: autor.

Figura 4. 14 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para cilindridade para a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.



Legenda:(L): Linear - (Q): Quadrático - v_a : Velocidade axial - v_t : Velocidade tangencial

v_a (L)/ v_t (L): interação $v_t v_a$

Fonte: autor.

4.3.2 Circularidade

Na Figura 4. 15 são apresentados os resultados das medições da circularidade obtidos com ambas as ferramentas nas condições de corte que cada uma suportou. Na Figura 4. 16 têm-se os valores médios de circularidade com seus respectivos desvios padrão para as ferramentas rígidas de múltiplas pastilhas e bucha nas mesmas condições de corte. Ao se analisar as circularidades geradas percebe-se que, assim como nos resultados de cilindridade, existe

uma aleatoriedade nos valores médios dos desvios para ambas as ferramentas, ou seja, é possível verificar que não existe uma tendência no comportamento da circularidade quando as velocidades axiais são variadas. Porém, ao se analisar o comportamento da circularidade para $v_t=16\text{m/min}$ verifica-se que há uma tendência de redução na circularidade com o aumento da velocidade axial.

De maneira semelhante ao desvio de cilindridade, o intervalo de confiança foi maior do que o esperado. Isso aconteceu devido a vibrações geradas pelo desvio de posição entre o eixo da ferramenta e do furo da peça. De acordo com Arunachalam *et al.* [36], os fatores que mais afetam a circularidade são: circularidade inicial, agentes externos do processo como vibrações e o tamanho do grão da ferramenta de brunimento. Segundo o autor, a força de corte reflete claramente no processo de remoção de material, e qualquer força ou variação de força irá influenciar na superfície gerada. Na Tabela 4.8 contém os dados referentes à porcentagem de variação da circularidade em relação ao aumento das velocidades para cada ferramenta analisada.

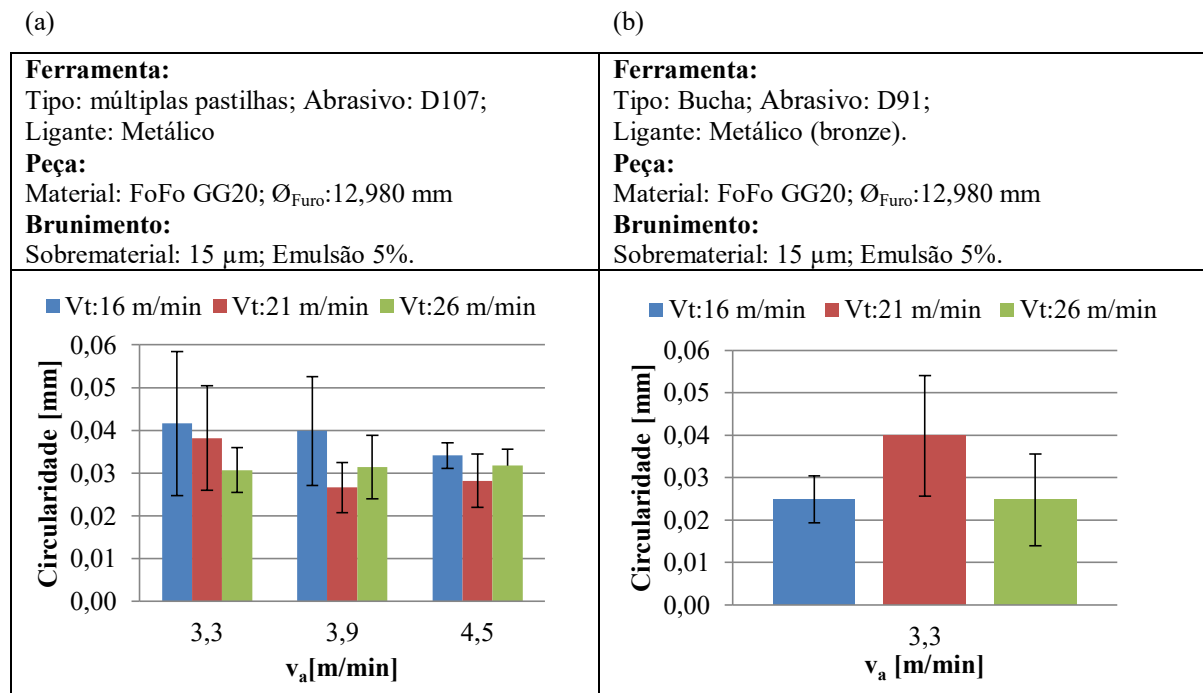
Tabela 4. 8 - Porcentagem de variação da circularidade em relação às velocidades tangencial e axial para ferramenta com pastilhas e com bucha.

	Ferramenta:	Pastilhas	Bucha
	v_t (m/min)	Circularidade	Circularidade
$v_a:3,3$ m/min	16 → 21	-1%	60%
	21 → 26	-3%	-23%
	16 → 26	-5%	24%
$v_a:3,9$ m/min	16 → 21	-19%	
	21 → 26	2%	
	16 → 26	-17%	
$v_a:4,5$ m/min	16 → 21	-17%	
	21 → 26	13%	
	16 → 26	-7%	
	v_a (m/min)	Circularidade	Circularidade
$v_t:16$ m/min	3,3 → 3,9	2%	
	3,9 → 4,5	4%	
	3,3 → 4,5	6%	
$v_t:21$ m/min	3,3 → 3,9	-16%	
	3,9 → 4,5	6%	
	3,3 → 4,5	-11%	
$v_t:26$ m/min	3,3 → 3,9	-11%	
	3,9 → 4,5	17%	
	3,3 → 4,5	3%	

Fonte: Autor.

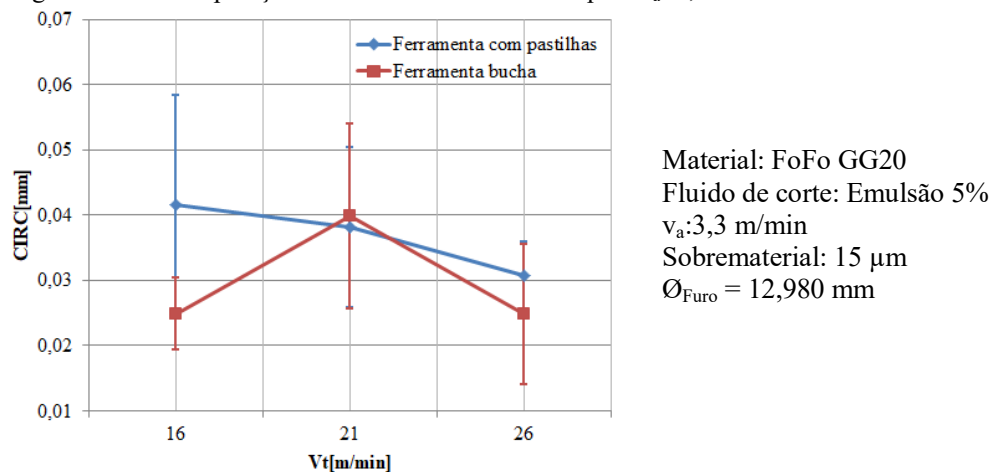
Apesar da flutuação característica do conjunto máquina ferramenta de brunimento, a irregularidade do comportamento do brunidor afeta a circularidade e a cilindridade. Quando há alguma força externa, a peça é forçada a oscilar para um lado fazendo com que a ferramenta corte mais em um lado do furo. Além disso, o desvio de circularidade obtido durante a estabilização da ferramenta tem um comportamento aleatório e a magnitude do desvio de circularidade, nesta etapa de vida da ferramenta, é alta [5,36].

Figura 4. 15 - Resultados da circularidade com a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas (a) e para ferramenta bucha (b) para as diferentes velocidades tangenciais e de avanço.



Fonte: Autor.

Figura 4. 16 - Comparação da circularidade dos furos para $v_a=3,3$ m/min.



Fonte: Autor.

Analisando os dados da ferramenta rígida de múltiplas pastilhas contidos da Tabela 4. 9 e Figura 4. 17, observa-se que as velocidades tangencial e axial e a interação entre elas não influenciam significativamente o valor da circularidade. Os fatores que, possivelmente, mais influenciaram o valor da circularidade nestas condições são as forças de corte, as vibrações geradas no processo devido ao ajuste de centros da ferramenta e do furo e o início da vida da ferramenta.

Tabela 4. 9 - Análise de Variâncias de experimento quadrático completo para circularidade da ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.

Fator	SS	v	MS	F	p
v_a (L)	0,000134	1	0,000134	1,559894	0,227680
v_a (Q)	0,000078	1	0,000078	0,910887	0,352522
v_t (L)	0,000146	1	0,000146	1,697242	0,209071
v_t (Q)	0,000091	1	0,000091	1,058493	0,317187
v_a (L)/ v_t (L)	0,000053	1	0,000053	0,620171	0,441231
Falta de Ajuste	0,000129	3	0,000043	0,499806	0,687109
Erro Puro	0,001550	18	0,000086		
Total	0,002207	26			

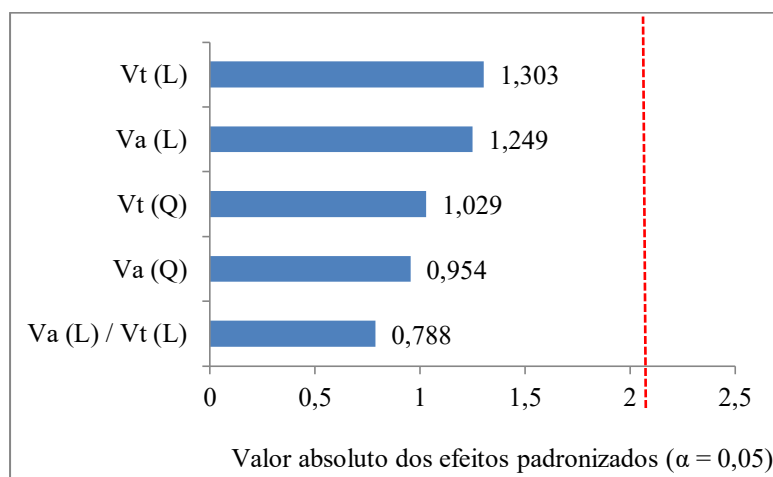
Legenda: (L): Linear - (Q): Quadrático

v_a : Velocidade axial - v_t : Velocidade tangencial. SS: Soma dos quadrados;

v: graus de liberdade; MS: média quadrática

Fonte: Autor

Figura 4. 17 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para circularidade para a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.



Legenda: (L): Linear - (Q): Quadrático - v_a : Velocidade axial - v_t : Velocidade tangencial

v_a (L)/ v_t (L): interação $v_t v_a$

Fonte: autor.

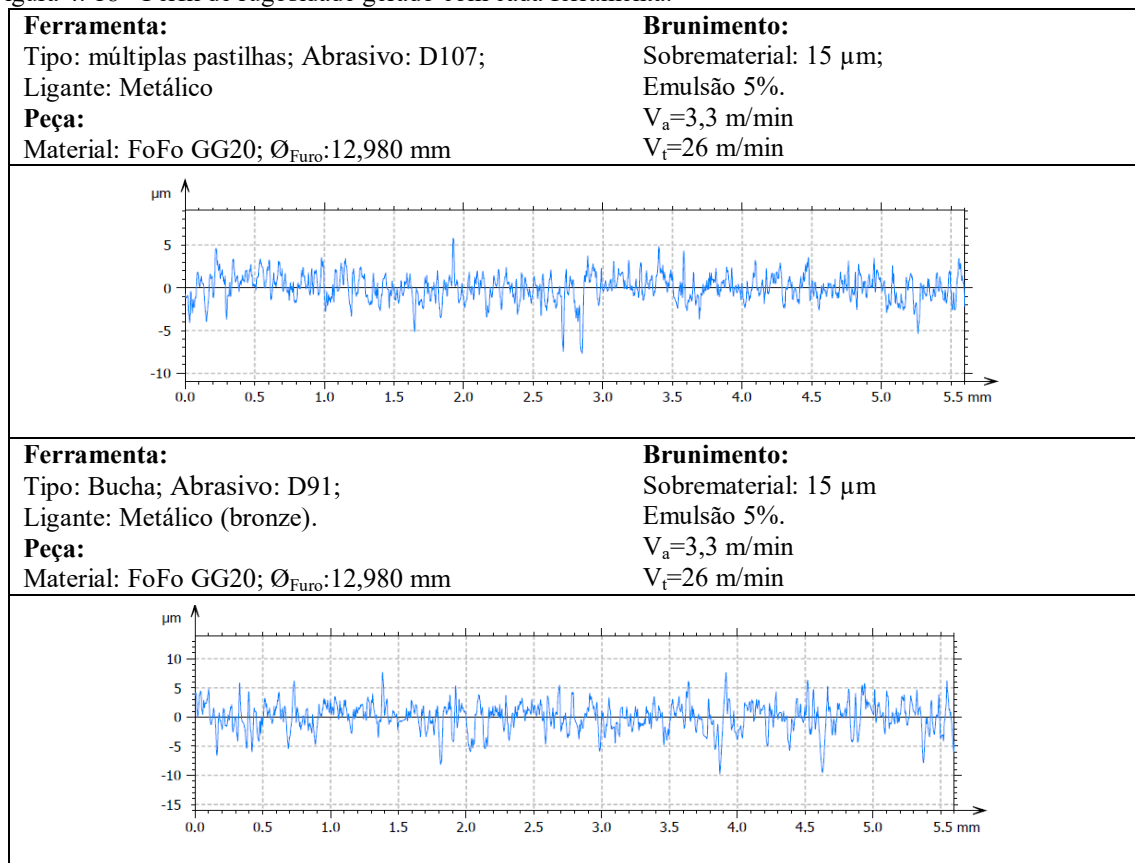
4.4 RUGOSIDADE

Para estudar a textura da superfície produzida no furo pelo brunimento de passe único com as duas ferramentas avaliaram-se os seguintes parâmetros de rugosidade 2D: Ra, Rz, Rk, Rpk e Rvk. Na tabela B.3 e B.4, no Apêndice B, estão as médias e os intervalos de confiança dos dados apresentados neste capítulo.

Nos próximos itens serão apresentados os resultados de cada parâmetro de rugosidade analisado. Em suma, todos os valores médios dos parâmetros de rugosidade gerados com a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas foram menores que os produzidos no brunimento de passe único com a ferramenta bucha, apesar das forças geradas com a de múltiplas pastilhas serem maiores.

Além disso, como já esperado, é possível verificar que o aumento da velocidade tangencial reduz o valor de rugosidade média, pois nas velocidades mais elevadas, um maior número de grãos atua num mesmo comprimento brunido, ocasionando a redução dos parâmetros de rugosidade, como Ra e Rmax (altura máxima do perfil) [2,18,21,58–60]. A Figura 4. 18 mostra o perfil de rugosidade gerado com cada ferramenta.

Figura 4. 18 - Perfil de rugosidade gerado com cada ferramenta.

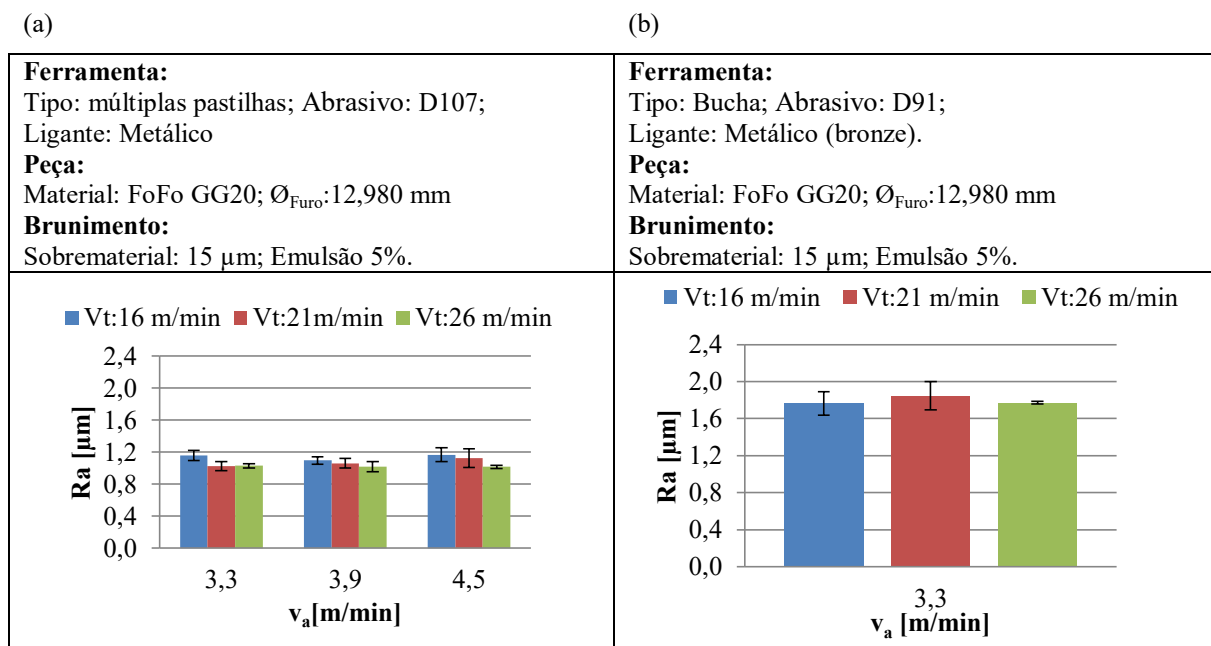


Fonte: Autor.

4.4.1 Rugosidade aritmética média do perfil (Ra) e da Rugosidade de pico a vale (Rz)

Avaliaram-se os parâmetros Ra e Rz, pois são estes parâmetros utilizados pela empresa parceira para avaliar as superfícies dos corpos de prova na produção. A Figura 4. 19 ilustra o comportamento da rugosidade aritmética média gerada com cada ferramenta. Existe uma tendência de redução do valor médio do parâmetro Ra com o aumento da velocidade tangencial. Porém, ao se analisar os dados da Figura 4. 16 (a) não se observa uma variação significativa da rugosidade com a variação da velocidade axial.

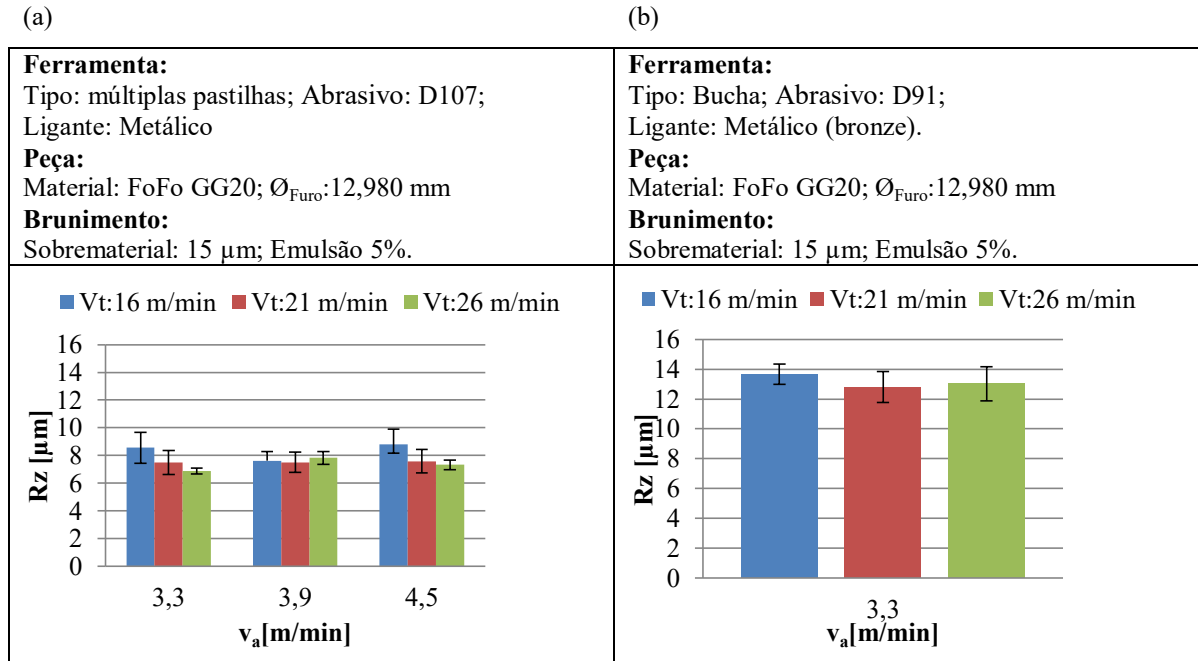
Figura 4. 19 - Resultados do parâmetro Ra gerados com a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas (a) e com a ferramenta Bucha (b).



Fonte: Autor.

Os resultados do processo de brunimento quanto ao parâmetro de rugosidade Rz apresentados na Figura 4.20, mostram que também há uma redução de Rz com o aumento da velocidade tangencial assim como verificado para o parâmetro Ra. Esse comportamento pode ser explicado devido ao aumento de número de grãos atuando em uma mesma área usinada reduzindo ou removendo os picos formados pela rebarba levantada durante a passagem dos grãos de diamante anteriores.

Figura 4. 20 - Resultados do parâmetro Rz gerados com a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas (a) e com a ferramenta Bucha (b).



Fonte: Autor.

Por meio da Figura 4.21 e da Figura 4.22 é possível verificar que, para as mesmas condições de corte, os parâmetros Ra e Rz gerados com a ferramenta bucha são significativamente maiores que os produzidos com a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas. Na Tabela 4.10 contém a variação de Ra e Rz em porcentagem com a variação das velocidades para cada ferramenta. É possível verificar com a Tabela 4.10 que a taxa de variação das rugosidades não é superior a 20%, ou seja, pode-se aumentar a taxa de remoção de material e de velocidade sem que haja um aumento significativo das rugosidades.

Tabela 4. 10 - Porcentagem de variação de Ra e Rz em relação a variação da velocidade axial e tangencial para ferramenta com pastilhas e com bucha.

	Ferramenta:	Pastilhas		Bucha	
	v_t (m/min)	Ra	Rz	Ra	Rz
$v_a:3,3$ m/min	16 → 21	-11%	-12%	5%	-6%
	21 → 26	0%	-8%	-4%	2%
	16 → 26	-11%	-20%	0%	-5%
$v_a:3,9$ m/min	16 → 21	-3%	-1%		
	21 → 26	-4%	4%		
	16 → 26	-7%	3%		
$v_a:4,5$ m/min	16 → 21	-4%	-14%		
	21 → 26	-10%	-3%		
	16 → 26	-13%	-17%		
	v_a (m/min)	Ra	Rz	Ra	Rz
$v_t:16$ m/min	3,3 → 3,9	-5%	-11%		
	3,9 → 4,5	7%	16%		
	3,3 → 4,5	1%	3%		
$v_t:21$ m/min	3,3 → 3,9	4%	0%		
	3,9 → 4,5	6%	1%		
	3,3 → 4,5	10%	1%		
$v_t:26$ m/min	3,3 → 3,9	-1%	14%		
	3,9 → 4,5	0%	-6%		
	3,3 → 4,5	-1%	7%		

Fonte: Autor.

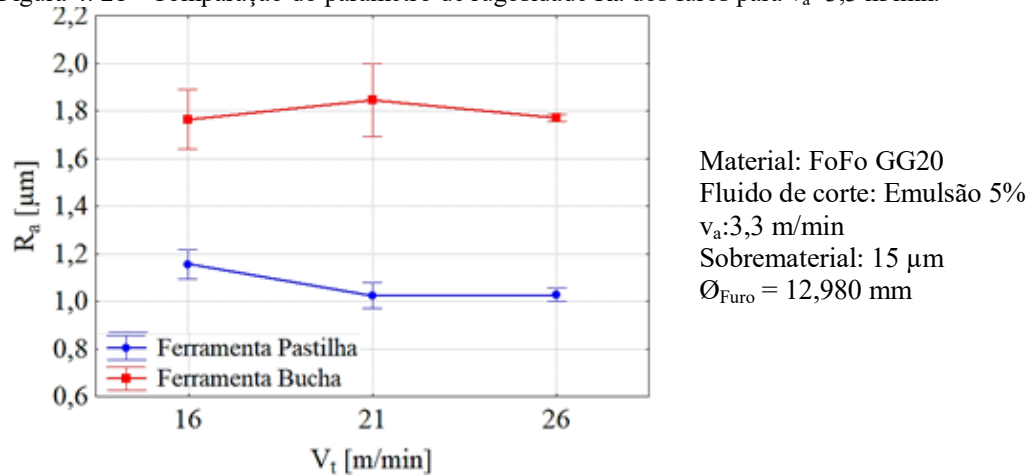
Algumas hipóteses podem ser levantadas a respeito das causas que influenciaram para que houvesse essa diferença no valor desses parâmetros como o curso, o ligante, o tamanho e a quantidade de grãos de cada ferramenta.

Os ligantes das ferramentas são diferentes, o ferro e o níquel presentes no ligante da ferramenta rígida de múltiplas pastilhas intensificam a retenção dos grãos [44], e isso faz com que menos grãos se soltem da matriz durante a usinagem se comparado à ferramenta bucha. Os grãos que se soltam da ferramenta têm trajetórias imprevisíveis sobre a superfície da peça, produzindo vincos irregulares, piorando a rugosidade.

Desse modo, a superfície gerada com a ferramenta bucha tem rugosidade maior que a produzida com a de múltiplas pastilhas. A ferramenta de brunimento do tipo bucha não foi condicionada para o processo e empregada conforme fornecida, no estado novo. Na técnica de deposição galvânica, apesar de se empregarem abrasivos rigorosamente selecionados em forma e tamanho, devido às formas geométricas distintas em uma classe de grãos, dependentemente do seu posicionamento sobre a bucha durante a fabricação, alguns grãos se apresentam

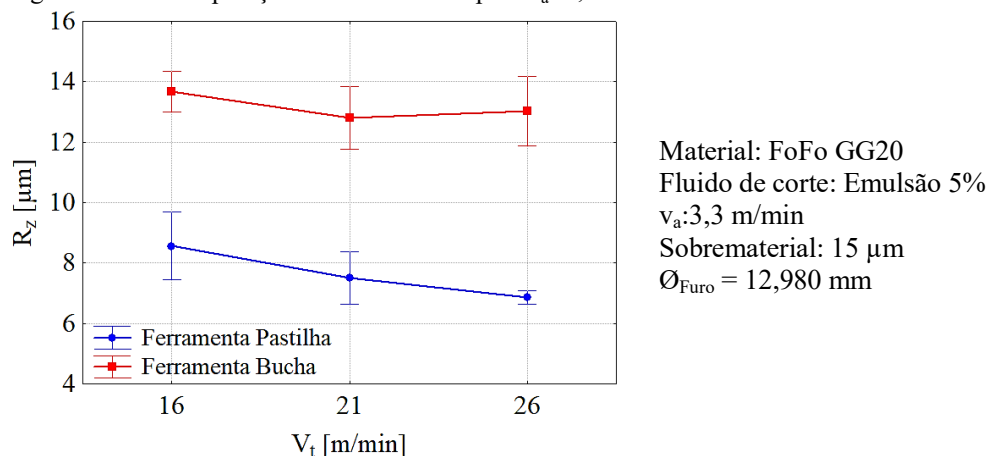
mais protusos que os demais, o que leva a uma rugosidade maior. Não houve a oportunidade de se avaliar a ferramenta com bucha após um período de utilização (metade do tempo de vida, por exemplo), visto que na unidade de fabricação da empresa parceira estas ferramentas não são empregadas. Além disso, de acordo com Peres [2], o curso da ferramenta é um fator de forte influência sobre a característica da superfície das peças. Consta-se que para o menor curso a rugosidade apresentada é mais elevada, diminuindo com o uso do curso maior.

Figura 4. 21 - Comparação do parâmetro de rugosidade R_a dos furos para $v_a=3,3$ m/min.



Fonte: Autor.

Figura 4. 22 - Comparação de R_z dos furos para $v_a=3,3$ m/min.



Fonte: Autor.

Separadamente, analisou-se a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas de modo a verificar quais fatores ou interação de fatores influenciaram a magnitude de R_a e R_z . Conforme mostrado na Tabela 4. 11 e na Figura 4. 23 é possível verificar que o fator que mais influenciou de maneira linear no parâmetro R_a foi a velocidade tangencial. Esse comportamento era esperado visto que os grãos passam mais vezes sob uma mesma área diminuindo a seção do

cavaco. Era esperado que a velocidade axial também influenciasse de forma significativa o valor da rugosidade [54], o que não aconteceu neste caso.

Tabela 4. 11 - Análise de Variâncias de experimento quadrático completo para Ra da ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.

Fator	SS	v	MS	F	p
v_a (L)	0,004576	1	0,004576	1,03626	0,322181
v_a (Q)	0,000719	1	0,000719	0,16286	0,691291
v_t (L)	0,065041	1	0,065041	14,72870	0,001205
v_t (Q)	0,000657	1	0,000657	0,14874	0,704259
v_a (L)/ v_t (L)	0,002400	1	0,002400	0,54339	0,470532
Falta de Ajuste	0,012874	3	0,004291	0,97179	0,427724
Erro Puro	0,079487	18	0,004416		
Total	0,168858	26			

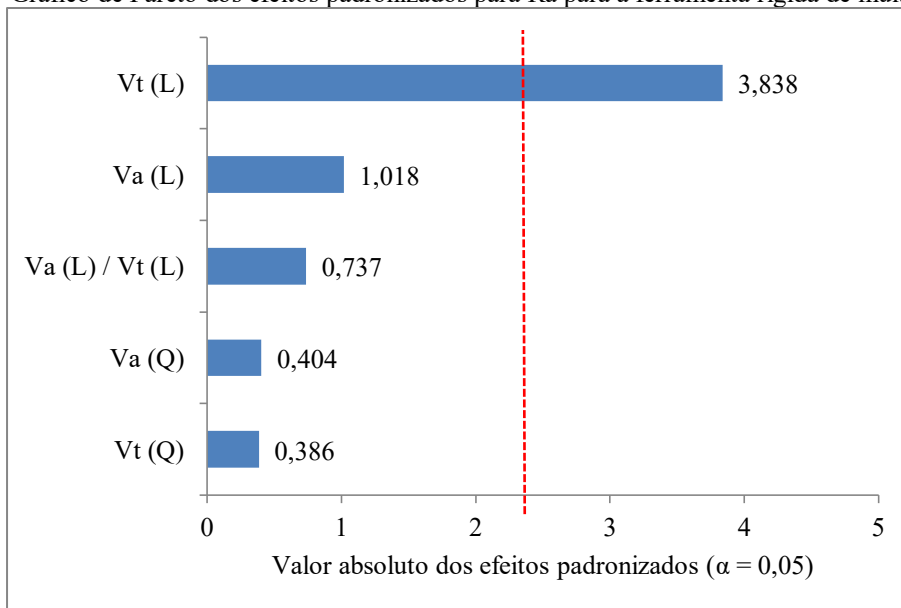
Legenda: (L): Linear - (Q): Quadrático

v_a : Velocidade axial - v_t : Velocidade tangencial.

SS: Soma dos quadrados; v: graus de liberdade; MS: média quadrática

Fonte: autor.

Figura 4. 23 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para Ra para a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.



Legenda: (L): Linear - (Q): Quadrático - v_a : Velocidade axial - v_t : Velocidade tangencial -

v_a (L)/ v_t (L): interação $v_t v_a$

Fonte: Autor.

De acordo com a Tabela 4. 12 e a Figura 4. 24, o fator que mais influência no valor de Rz é a velocidade tangencial, sendo que esta influência se dá de forma linear. Nos gráficos de Pareto os efeitos são dispostos em ordem decrescente de seus valores absolutos e consideran-

do uma confiança de 95%, a linha de referência no gráfico indica quais efeitos são significativos.

Tabela 4. 12 - Análise de Variâncias de experimento quadrático completo para Rz da ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.

Fator	SS	v	MS	F	p
v_a (L)	0,30420	1	0,304200	0,521420	0,479514
v_a (Q)	0,00003	1	0,000028	0,000048	0,994569
v_t (L)	4,97475	1	4,974750	8,527060	0,009139
v_t (Q)	0,58005	1	0,580050	0,994244	0,331924
v_a (L)/ v_t (L)	0,55112	1	0,551119	0,944655	0,343964
Falta de Ajuste	2,79562	3	0,931875	1,597296	0,224969
Erro Puro	10,50133	18	0,583407		
Total	19,25113	26			

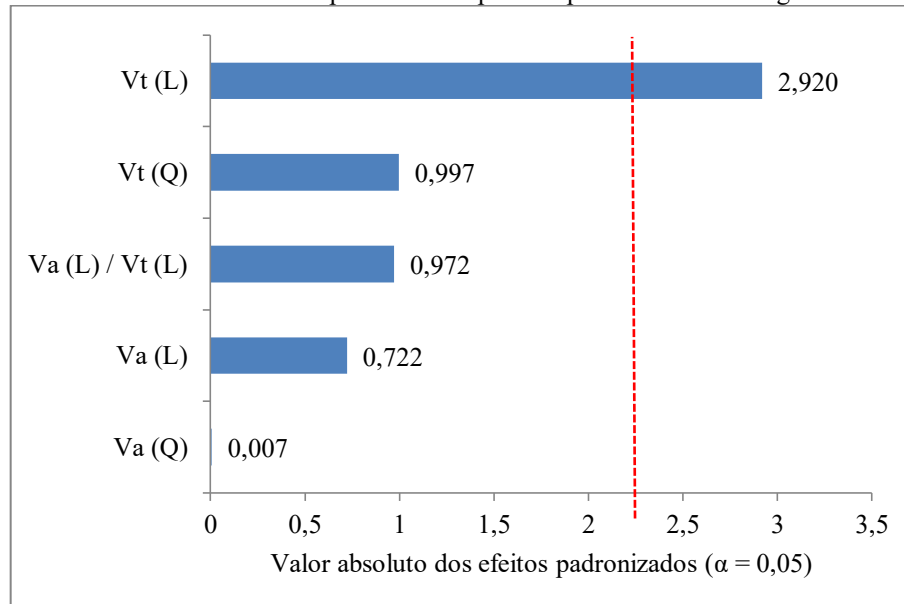
Legenda: (L): Linear - (Q): Quadrático

v_a : Velocidade axial - v_t : Velocidade tangencial. SS: Soma dos quadrados;

v: graus de liberdade; MS: média quadrática

Fonte: Autor.

Figura 4. 24 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para Rz para a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.



Legenda: (L): Linear - (Q): Quadrático - v_a : Velocidade axial - v_t : Velocidade tangencial –

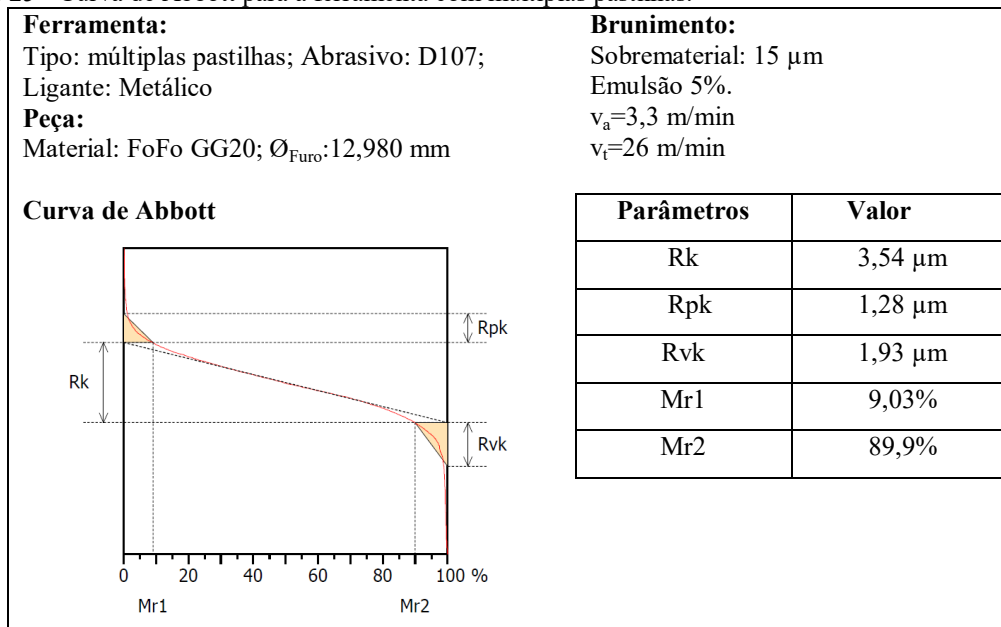
v_a (L)/ v_t (L): interação $v_t v_a$

Fonte: Autor.

4.4.2 Comportamento dos Parâmetros da curva de Abbott

Os parâmetros da Curva de Abbott foram escolhidos para a análise da superfície, pois descrevem as rugosidades das peças brunidas adequadamente, visto que permitem o acompanhamento e a análise das regiões de pico, de vale e central, produzidas por cada ferramenta. Na Figura 4. 25 é apresentada a curva de Abbott para o brunimento com a ferramenta com múltiplas pastilhas com $v_a=3,3$ m/min e $v_t=26$ m/min como parâmetros de corte. Por ser a etapa de brunimento de desbaste verifica-se que não o corpo de prova analisada não possui características de superfície de platô uma vez que não se observa pequenos valores de R_{pk} e grandes valores de R_{vk} .

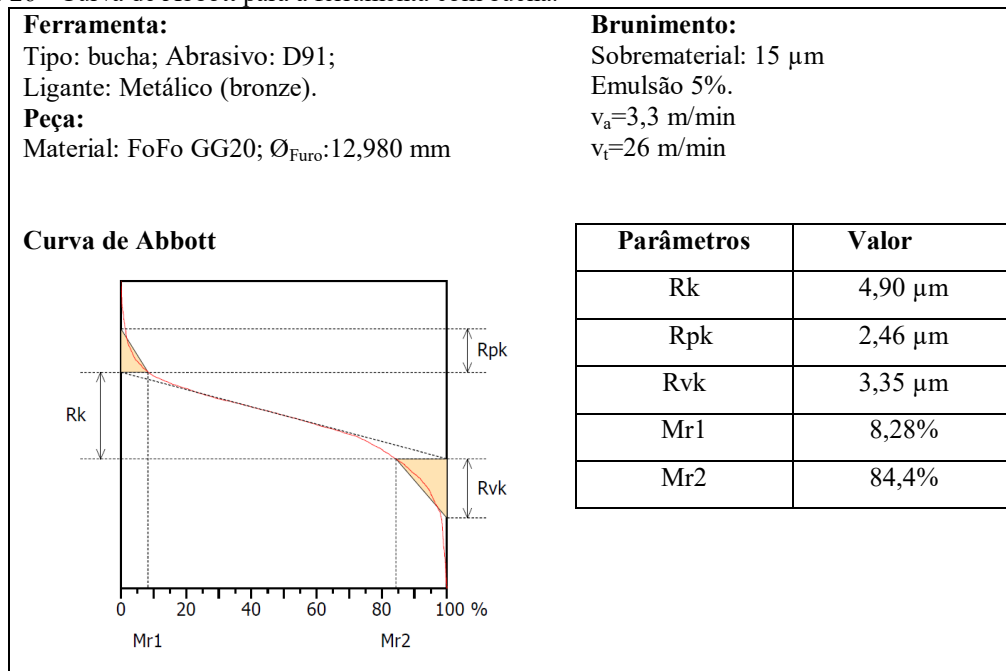
Figura 4. 25 - Curva de Abbott para a ferramenta com múltiplas pastilhas.



Fonte: Autor.

Observando a Figura 4. 26, no brunimento com a ferramenta tipo bucha também, é possível verificar as mesmas características verificadas com a ferramenta com pastilhas, sendo que a superfície gerada não tem características de platô. Porém, é possível verificar que existe uma maior quantidade de picos e vales na superfície brunida com a ferramenta tipo bucha, pois os valores de R_{vk} e R_{pk} são maiores se comparado com os parâmetros gerados com a ferramenta com múltiplas pastilhas.

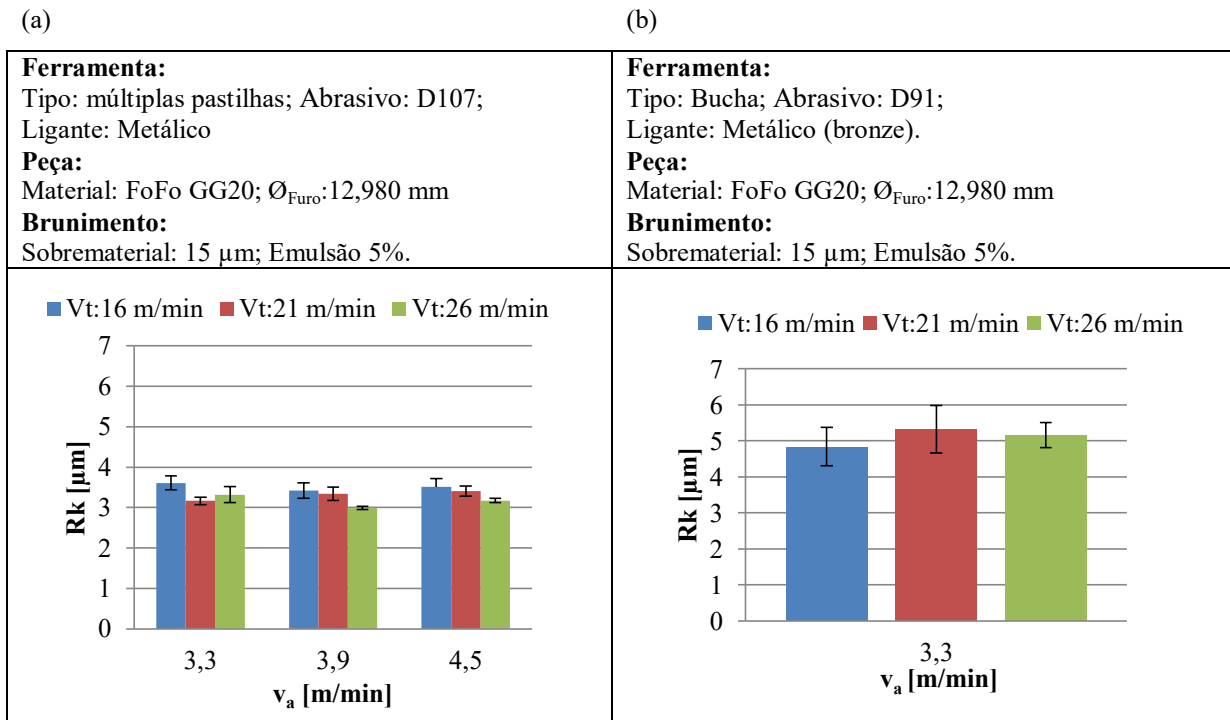
Figura 4. 26 - Curva de Abbott para a ferramenta com bucha.



Fonte: Autor.

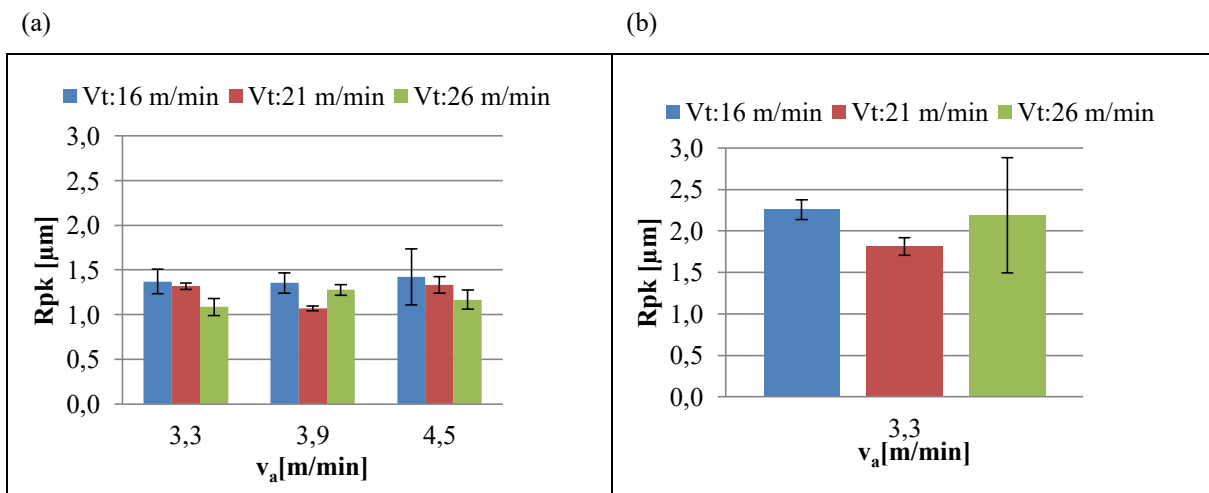
As Figuras 4. 27 a 4. 29 ilustram, respectivamente, o comportamento de Rk, Rpk e Rvk para a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas e para a ferramenta bucha nas condições de corte que cada uma suportou. No geral, percebe-se uma redução dos valores médios dos três parâmetros de rugosidade analisados com o aumento da velocidade tangencial. Como já mencionado, o aumento da velocidade tangencial aumenta a quantidade de grãos agindo sob uma mesma área, o que reduz a quantidade de picos da superfície. Também é possível observar que o valor médio da rugosidade Rk é maior que os valores de Rpk e Rvk, sendo que os valores de Rpk são menores que os de Rvk. Isso indica que a altura dos picos do perfil foi reduzida, ou seja, que as áreas dos vales são maiores que as áreas de suporte.

Figura 4. 27 - Resultados do parâmetro Rk gerados com a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas (a) e com a ferramenta bucha (b).



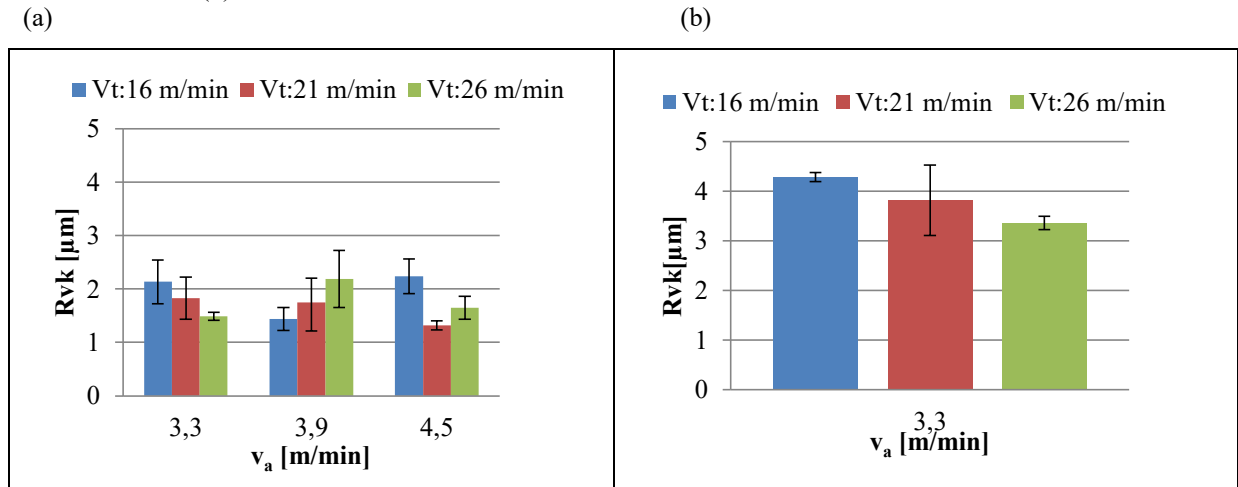
Fonte: Autor.

Figura 4. 28 - Resultados do parâmetro Rpk gerados com a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas (a) e com a ferramenta bucha (b).



Fonte: Autor.

Figura 4. 29 - Resultados do parâmetro Rvk gerados com a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas (a) e com a ferramenta bucha (b).



Fonte: Autor.

Ao se observar os gráficos da ferramenta com múltiplas pastilhas, nota-se que quando a velocidade axial é 3,9 m/min, o valor de Rvk aumenta com o aumento da velocidade tangencial. Esse comportamento mostra que para este parâmetro não basta avaliar somente a influência da velocidade tangencial; é necessário avaliar também a interação entre as velocidades para buscar condições de corte favoráveis ao processo para gerar melhores superfícies.

Na Tabela 4. 13 é apresentada a porcentagem de aumento, para valores positivos e redução, para valores negativos, dos parâmetros da curva de Abbott: Rk, Rpk e Rvk, em relação às velocidades tangencial (v_t) e axial (v_a) para cada ferramenta analisada.

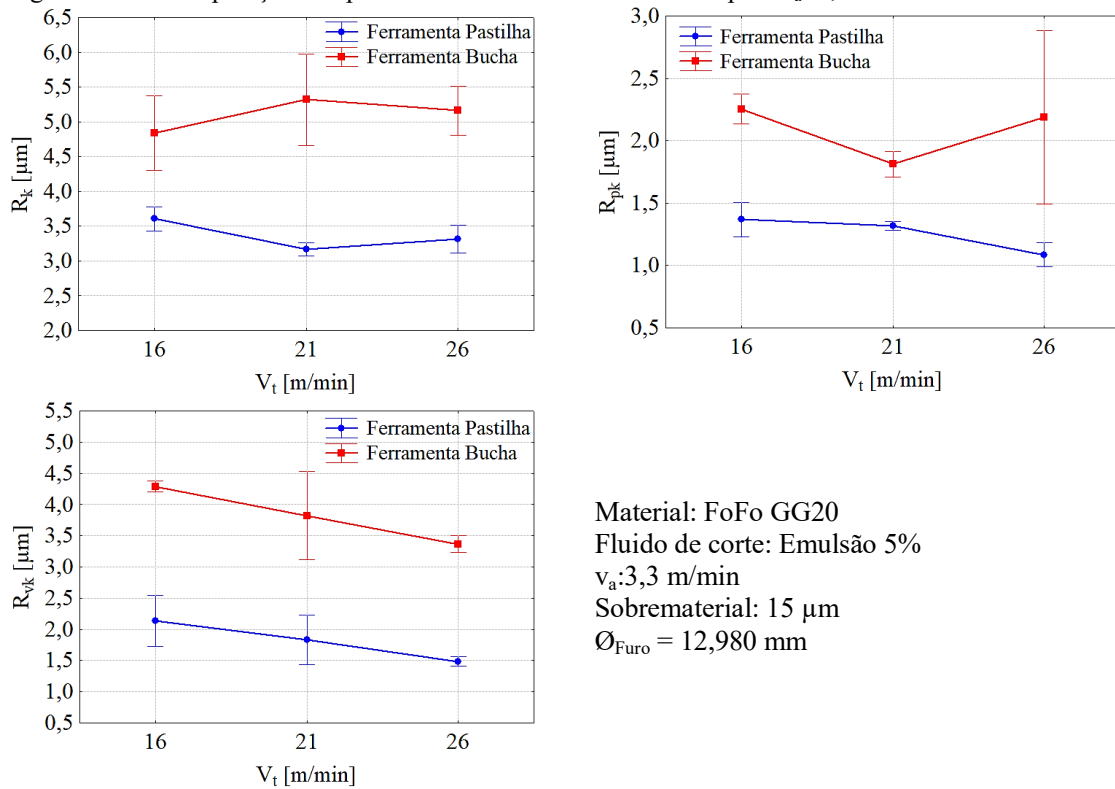
Tabela 4. 13 - Porcentagem de variação dos parâmetros da curva de Abbott em relação a variação da velocidade axial e tangencial para ferramenta com pastilhas e com bucha.

	Ferramenta:	Pastilhas			Bucha		
	v_t (m/min)	Rk	Rpk	Rvk	Rk	Rpk	Rvk
$v_a:3,3$ m/min	16 → 21	-12%	-4%	-14%	10%	-20%	-11%
	21 → 26	5%	-18%	-19%	-3%	21%	-12%
	16 → 26	-8%	-21%	-30%	7%	-3%	-22%
$v_a:3,9$ m/min	16 → 21	-2%	-21%	22%			
	21 → 26	-11%	19%	25%			
	16 → 26	-13%	-6%	52%			
$v_a:4,5$ m/min	16 → 21	-3%	-6%	-41%			
	21 → 26	-7%	-12%	24%			
	16 → 26	-9%	-18%	-27%			
	v_a (m/min)	Rk	Rpk	Rvk	Rk	Rpk	Rvk
$v_t:16$ m/min	3,3 → 3,9	-5%	-1%	-33%			
	3,9 → 4,5	3%	5%	56%			
	3,3 → 4,5	-3%	4%	5%			
$v_t:21$ m/min	3,3 → 3,9	6%	-19%	-4%			
	3,9 → 4,5	2%	24%	-24%			
	3,3 → 4,5	8%	1%	-28%			
$v_t:26$ m/min	3,3 → 3,9	-10%	18%	47%			
	3,9 → 4,5	6%	-9%	-25%			
	3,3 → 4,5	-4%	7%	11%			

Fonte: Autor.

Observando a Figura 4. 30 que apresenta os comparativos dos valores médios dos parâmetros Rk, Rpk e Rvk das duas ferramentas para $v_a=3,3$ m/min, verifica-se que todos os valores obtidos com a ferramenta bucha são maiores que os gerados com a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas. Assim como os outros parâmetros de rugosidade supracitados, o curso e o ligante influenciaram no valor dos parâmetros da curva de Abbott.

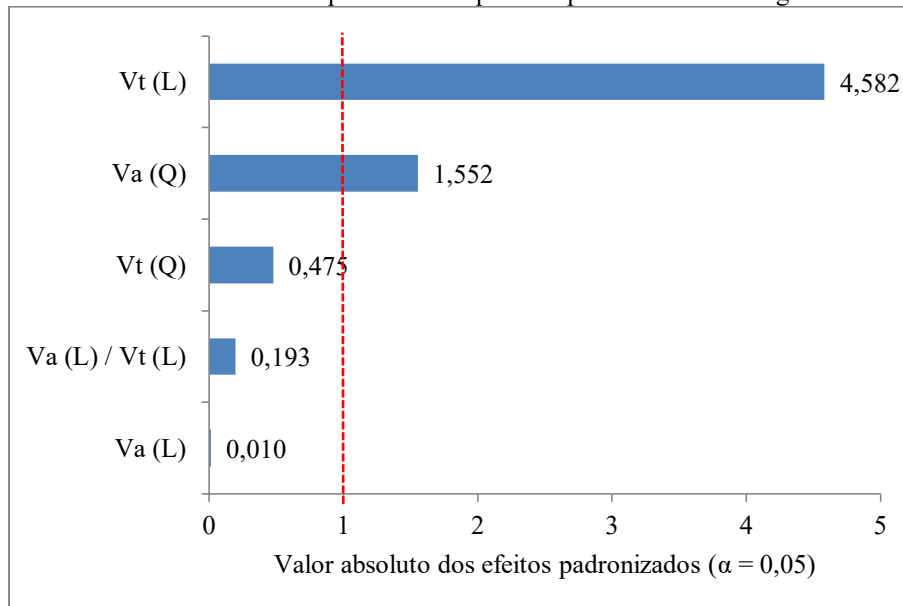
Figura 4. 30 - Comparação dos parâmetros da família Rk dos furos para $v_a=3,3$ m/min.



Fonte: Autor

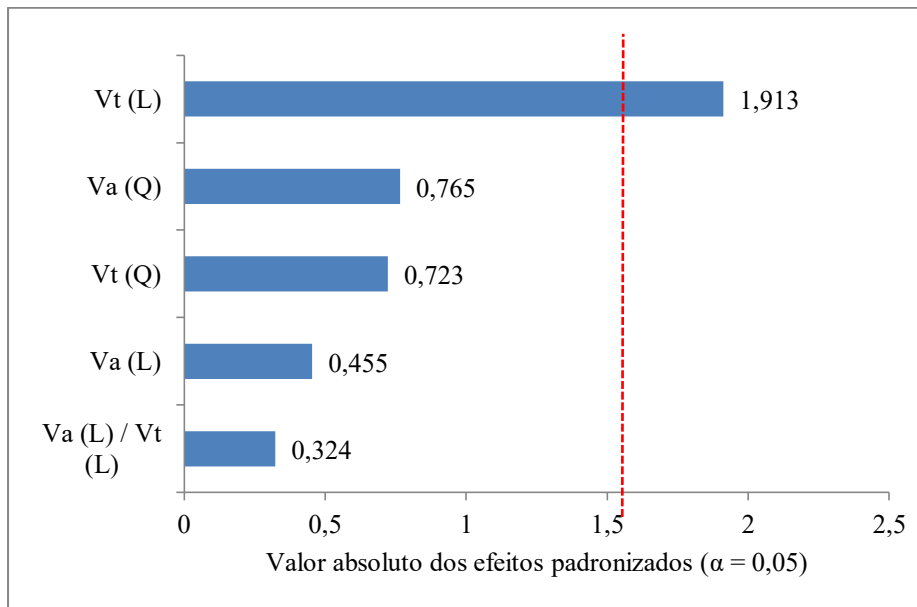
Observando os gráficos de Pareto gerados na análise de variância com os parâmetros da ferramenta rígida de múltiplas pastilhas é possível observar que a velocidade de corte é o fator que mais influencia de forma linear a magnitude de Rk, assim como os parâmetros Ra e Rz. Porém, segundo a Figura 4. 32 nenhum fator analisado influencia significativamente no valor de Rpk, e o fator que poderia influenciar de forma linear significativamente seria v_t .

Ao fazer a análise do gráfico de Pareto do parâmetro Rvk verifica-se que, diferentemente dos outros parâmetros de rugosidade, o fator que mais o influenciou foi a interação das velocidades tangencial e axial, apesar dessa influência não ser significativa de acordo com o gráfico.

Figura 4. 31 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para R_k para a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.

Legenda:(L): Linear - (Q): Quadrático - v_a :Velocidade axial - v_t : Velocidade tangencial –
 $v_a(L)/v_t(L)$:interação $v_t v_a$

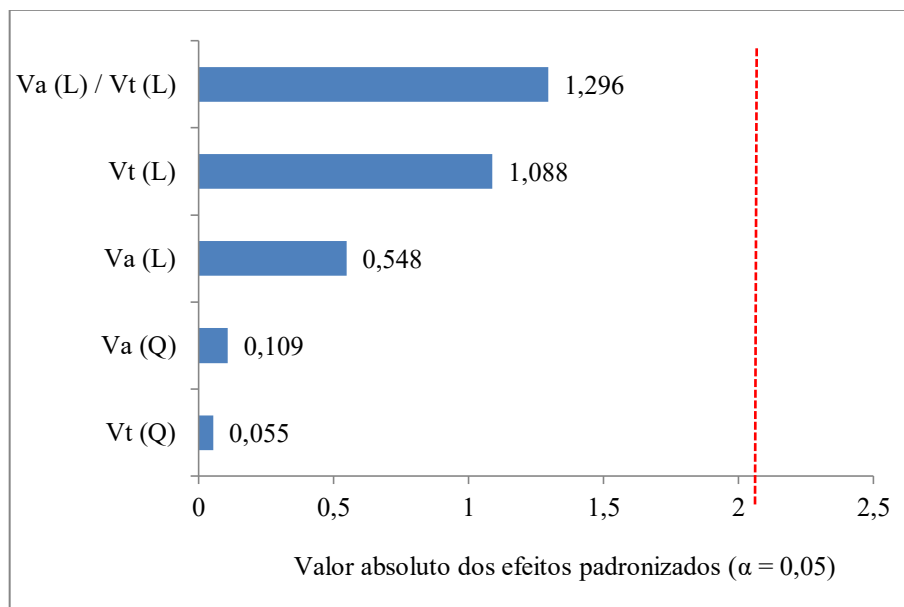
Fonte: Autor.

Figura 4. 32 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para R_{pk} para a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.

Legenda:(L): Linear - (Q): Quadrático - v_a :Velocidade axial - v_t : Velocidade tangencial –
 $v_a(L)/v_t(L)$:interação $v_t v_a$

Fonte: Autor.

Figura 4. 33 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para Rvk para a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.



Legenda:(L): Linear - (Q): Quadrático - va:Velocidade axial - vt: Velocidade tangencial –
va(L)/vt(L):interação vt va

Fonte: Autor.

Com os valores dos parâmetros da curva de Abbott analisados é possível observar que a superfície do furo não possui características de platô, uma vez que o brunimento é de desbaste. Para melhorar os parâmetros avaliados é necessário otimizar o valor da velocidade tangencial, pois é a única que influencia significativamente o valor de Rk .

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

O principal objetivo deste trabalho foi analisar a superfície gerada com dois tipos de ferramenta (rígida de múltiplas pastilhas e bucha) no brunimento de passe único de mancais de deslizamento de ferro fundido cinzento, para que com esta análise fosse possível comparar as ferramentas. A comparação foi realizada com a avaliação das forças e momento gerados durante o processo de brunimento, dos resultados de rugosidade e dos erros de forma obtidos nas peças fabricadas com cada uma das ferramentas.

A ferramenta bucha não suportou todos os parâmetros de corte previamente escolhidos. Como havia um limite de ensaios e de tempo para se realizar os ensaios, portanto as ferramentas foram comparadas no nível mais baixo de velocidade axial variando somente a velocidade tangencial. Apesar disso, foi possível verificar os esforços, as superfícies e formas geradas com a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas em todos os parâmetros de corte escolhidos fazendo a análise de variância e pelo gráfico de Pareto verificar quais fatores mais influenciavam os resultados obtidos.

Com a realização deste trabalho foi possível caracterizar a força de corte e o momento gerados por cada ferramenta no brunimento de passe único e avaliar os erros de forma e as rugosidades produzidas nas condições que cada uma suportou. A partir dos ensaios foi possível concluir que:

- É possível obter uma redução das forças de até 50% quando se aumenta o valor da velocidade tangencial de 16 para 26 m/min, porém, quando se observa a variação do momento em relação ao aumento das velocidades se verifica que a variação máxima é de 30% para a ferramenta com pastilhas.
- Não é possível verificar diferença estatística entre os erros de forma gerados com as ferramentas. Ou seja, não se obteve diferença significativa ao se comparar a cilíndricidade e a circularidade geradas com cada ferramenta.
- O aumento das velocidades não causou uma variação acima de 20% dos parâmetros de rugosidade R_a e R_z , ou seja, é possível gerar superfícies funcionais mesmo com o aumento da velocidade de corte, assim pode-se aumentar a produtividade sem que as rugosidades aumentem. Através dos parâmetros da curva de Abbott (R_k , R_{vk} e R_{pk}) foi possível verificar que para produzir superfícies de qualidade satisfatória é necessário avaliar a interação entre as velocidades para buscar variáveis de entrada favoráveis.

- O fator que mais influenciou nos esforços, nos erros de forma e nos parâmetros de rugosidade analisados foi a velocidade tangencial, visto que com o aumento de v_t há um aumento de número de grãos atuando em uma mesma área usinada num mesmo intervalo de tempo, reduzindo ou removendo os picos formados pela rebarba levantada durante a passagem dos grãos de diamante anteriores. O aumento da velocidade tangencial reduziu a força de corte, o momento e os parâmetros de rugosidade para ambas as ferramentas. Porém, ela não influenciou significativamente nos erros de forma. A velocidade axial influenciou somente a força de corte.

- A composição do ligante e a forma de fabricação das ferramentas foram fatores que influenciaram significativamente em todos os parâmetros avaliados, uma vez que atuam diretamente no atrito ao longo do processo de brunimento.

- A ferramenta rígida de múltiplas pastilhas suporta maiores taxas de remoção de material, pois a ferramenta bucha não suportou todos os parâmetros de corte previamente escolhidos. Observando todos os parâmetros analisados verificou-se que a superfície mais funcional, ou seja, com menores rugosidades foi gerada com a ferramenta com pastilhas.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A pesquisa realizada na presente dissertação permitiu identificar oportunidades para futuros desenvolvimentos em relação ao processo de passe único e suas ferramentas. As sugestões para trabalhos futuros são:

- Avaliar o comportamento da ferramenta com bucha em diversos estágios de desgaste ao longo do seu tempo de vida.
- Analisar o efeito do *run in* da ferramenta.
- Fazer um modelo de predição de força de corte para a ferramenta tipo bucha e verificação da existência de curvatura no modelo de predição de forças para otimização dos parâmetros de entrada.
- Fazer uma análise mais profunda sobre a ferramenta tipo bucha, correlacionando a força e o sobrematerial retirado, correlacionando o sobrematerial retirado e a rugosidade produzida, pois não há bibliografia suficiente para esta ferramenta específica.
- Analisar os esforços com a ferramenta rígida de múltiplas pastilhas na sequência de processos.

- Utilizar transdutores de emissão acústica para o monitoramento do desgaste da ferramenta tipo bucha e o controle de vibrações.
- Comparar o tempo de vida útil da ferramenta tipo bucha com a vida da ferramenta rígida de múltiplas pastilhas.
- Avaliar a integridade da superfície brunida e o desempenho tribológico de corpos de prova brunidos com ferramentas do tipo bucha com diferentes parâmetros de corte.
- Avaliar diferentes tipos de ligantes das ferramentas e correlacionar com a força e a integridade da superfície gerada em cada um.
- Estudar o perfil de afiação das ferramentas com pastilhas antes e depois da usinagem.
- Analisar a protrusão dos grãos antes e após o brunimento empregando microscopia de profundidade infinita.
- Acompanhar o desgaste progressivo das ferramentas.

REFERÊNCIAS

- [1] SCHMITT, C.; KLEIN, S.; BÄHRE, D. An Introduction to the Vibration Analysis for the Precision Honing of Bores. **Procedia Manufacturing**, v. 1, p.637-643, 2015. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.056>>.
- [2] STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II: Brocas, alargadores, ferramentas de ros-car, fresas, brochas, rebolos, abrasivos**. 2. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995. 162 p.
- [3] PERES, R. M. **Caracterização do processo e verificação das grandezas de entrada no brunimento de curso longo do tipo “precidor”**. 1994. 176 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [4] SCHMIDT, M. A. **Brunimento em ferro fundido cinzento utilizando ferramentas tipo bucha com grãos de diamante**. 1999. 258 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [5] KÖNIG, W. **Tecnologia da fabricação: Retificação, Brunimento e Lapidação**. Traduzido por Walter Lindolfo Wiengaertner. Florianópolis, 1985. 336 p. Título original: *Fertigungsverfahren 2*.
- [6] PAULL, D., DAWSON, D., MCCONNEL, B. Honing. **American Society For Metals. Metals Handbook**, v. 3, p. 288–298, 1967.
- [7] MARVIN, R. Achieving maximum effectiveness with single-pass superabrasive bore finishing. **Society of Manufacturing Engineers**, Novi, Apr. 1994. 24 p.
- [8] PEREIRA, L. C. *et al.* Assessment of the effect of cutting parameters on roughness in flexible honed cylinders. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, v. 95, n. 1-4, p.181-196, 14 out. 2017. Springer Nature. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s00170-017-1200-6>>. Acesso em 26 de maio de 2018.
- [9] FREITAS, M. T. T. **Avaliação da influência exercida pelo estágio de vida de uma ferrameta precidor sobre os esforços de usinagem e qualidade de furos de ferro fundido**. 2018. 161 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

- [10] KÖNIG, W. **Fertigungsverfahren 2: Schleifen, Honen, Läppen**. 2005. XXVIII, 494p ISBN:978-3-540-23496-8.
- [11] HAN, Ping *et al.* Influence of matrix hardness on honing engine cylinder liner with Cu–Sn–Fe–Ni diamond stones. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, v. 69, n. 5-8, p. 1619-1623, jun. 2013. Springer Nature. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s00170-013-5097-4>>.
- [12] KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 2: Grinding, Honing, Lapping**. RWTHedition. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2009. v. 2, 452 p. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-92259-9>>.
- [13] AUSCHNER, W. Fundamentals of superfinishing. In: UNDERSTANDING the basics of honing & superfinishing, Nashville, Tennessee : [S.I.], mai. 1997. 29 p.
- [14] GOELDEL, B. *et al.* Flexible right sized honing technology for fast engine finishing. **Cirp Annals - Manufacturing Technology**, v. 62, n. 1, p. 327-330, 2013. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.075>>.
- [15] SCHMITT, C.; BÄHRE, D. An approach to the calculation of process forces during the precision honing of small bores. **Procedia Cirp**, v. 7, p. 282-287, 2013. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2013.05.048>>.
- [16] KATIKAR, P. R. BIRADAR, R. S. Optimization Process Parameters in Honing Process -A Review Paper. **CiiT International Journal of Data Mining and Knowledge Engineering**, v. 10, n. May, p. 128–132, 2018.
- [17] MOOS, U.; BÄHRE, D. Analysis of Process Forces for the Precision Honing of Small Bores. **Procedia Cirp**, v. 31, p. 387-392, 2015. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.066>
- [18] VRAC, D. S. *et al.* The influence of honing process parameters on surface quality, productivity, cutting angle and coefficients of friction. **Industrial Lubrication and Tribology**, v. 64, n. 2, p. 77-83, mar. 2012. Emerald. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1108/00368791211208679>>.
- [19] VRAC, D.; SIDJANIN, L.; BALOS, S. The Effect of Honing Speed and Grain Size on Surface Roughness and Material Removal Rate during Honing. **Acta Polytechnica Hungarica** v. 11, n. 10, p. 163–175, 2014.
- [20] CHANGYONG, Y. *et al.* Progress on high efficiency honing technology for pre-

- cision hole in difficult-to-cut material. **Aeronautical Manufacturing Technology**, China, n. 9, p. 26-30, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.16080/j.issn1671-833x.2016.09.026>>.
- [21] WICK, C.; VEILLEUX, R. F. **Tool and manufacturing engineers handbook: Materials, finishing and coating**. 4 ed. Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 1985. v. 3, p. 838.
- [22] SCHMITT, C.; BÄHRE, D. Analysis of the Process Dynamics for the Precision Honing of Bores. **Procedia Cirp**, v. 17, p. 692-697, 2014. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2014.01.055>>.
- [23] PAUCKSCH, E. Honen. In: *Zerspantechnik*. 9 ed. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 1992. 303-335 p. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/978-3-663-13865-5>>.
- [24] BURKHARD, G.; REHSTEINER, F.; SCHUMACHER, B. High Efficiency Abrasive Tool for Honing. **Cirp Annals - Manufacturing Technology**, v. 51, n. 1, p. 271-274, 2002. Elsevier BV. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)61515-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506(07)61515-7)>.
- [25] PAWLUS, P.; CIESLAK, T.; MATHIA, T. The study of cylinder liner plateau honing process. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 20, p. 6078–6086, 2009.
- [26] OBARA, R. B.; TOMANIK, E.; SOUZA, R. M. Folded Metal and Other Surface Parameters on Combustion Engine Cylinders. **SAE Technical Papers**, v. 2014-October, n. October, 2014.
- [27] HOU, Y. X. *et al.* Study of Force Measurement in Honing. **Advanced Materials Research**, v. 314–316, p. 2381–2384, 2011.
- [28] VICTOR, H.; MÜLLER, M.; OPFERKUCH, R. **Zerspantechnik**. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1985.
- [29] SALJÉ, E.; VON SEE, M. Process-Optimization in Honing. **Cirp Annals - Manufacturing Technology**, v. 36, n. 1, p. 235-239, mar. 1987. Elsevier BV. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)62594-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506(07)62594-3)>.
- [30] MOOS, U.; BÄHRE, D. Modelling of tool behaviour for long stroke honing of bores. **Production Engineering**, v. 9, n. 5-6, p.601-612, out. 2015. Springer Nature.

- Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11740-015-0638-3>>.
- [31] SALJÉ, O. E.; PAULMANN, R. Relations Between Abrasive Processes. **Cirp Annals - Manufacturing Technology**, v. 37, n. 2, p.641-648, 1988. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)60761-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506(07)60761-6)>.
- [32] KING, R.; HAHN, R. S. **Handbook of modern grinding technology**. New York: Chapman and Hall, 1987. 369 p. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4613-1965-8>>.
- [33] MARVIN, R. The Advance Precision Finishing of Ceramic Components Utilizing Single Pass Superabrasive Processing. **Technical Papers-Society Of Manufacturing Engineers-All Series-**, 1997.
- [34] NAGEL. **Tools For Precidor Honing**. Disponível em: <<https://www.nagel.com/en/honing-tools/precidor-tools>>. Acesso em: 16 mar. 2018.
- [35] EMBRACO. **Conjunto do brunidor**, 2010.
- [36] ARUNACHALAM, S; GUNASEKARAN, A.; O'SULLIVAN, J. M. Analysing the process behaviour of abrasive reaming using an experimental approach. **International Journal Of Machine Tools And Manufacture**, v. 39, n. 8, p. 1311-1325, ago. 1999. Elsevier BV. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/s0890-6955\(98\)00088-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0890-6955(98)00088-1)>.
- [37] YANG, C. *et al.* Characterization and life prediction of single-pass honing tool for fuel injection nozzle. **Chinese Journal of Aeronautics**. August, 2020.
- [38] MAZAK. **Máquinas Ferramentas: variaxis j-600**. Disponível em: <<https://www.mazak.com.br/machines/variaxis-j-600>>. Acesso em: 25 ago. 2018.
- [39] **MAS - Honing tool ø13 Ltot100 - Ldiam.50 - no center.pdf**.
- [40] LIAO, Y. S.; LUO, S. Y. Effects of matrix characteristics on diamond composites. **Journal of Materials Science**. v. 28, 1993. n. 5, p. 1245–1251.
- [41] ASTM INTERNATIONAL. **A48/A48M**: Standard specification for gray iron castings. 2016. 6 p.
- [42] EUROPEAN STANDARD. **DIN EN 1561**: Gray cast iron. 1997. 21 p.
- [43] EUROPEAN STANDARD. **DIN EN 1691**: Gray cast iron with lamellar graphite. 1964.

- [44] GRIFFITHS, B. **Manufacturing surface technology: surface integrity & functional performance**. London: Penton Press, 2001. 256 p. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/book/9781857180299>>.
- [45] UHLMANN, E.; SPUR, G.; KLEINSCHNITKER, M. Honing and superfinishing. In: MARINESCU, I. D.; Doi, T. K.; UHLMANN, E. **Handbook of ceramics grinding and polishing**. 2 ed. Waltham: Elsevier, 2015. p. 234-262. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/B978-1-4557-7858-4.00005-4>>.
- [46] BOARON, A. **Determination of the Relative Position between Grinding Wheel and Workpiece by Using Acoustic Emission**, 1998. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/77853/170917.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>
- [47] NATIONAL INSTRUMENTS. **Datasheet: bus-powered M series multifunction DAQ for NI USB 6218**. 2014.
- [48] KISTLER INSTRUMENTS. **Instruction manual: rotating cutting force dynamometer type 9123C**. Winterthur, 59 p. Set. 2009.
- [49] BSI Standards Publication Geometrical product specifications (GPS) - Cylindricity Part 2 : Specification operators. 2011.
- [50] BSI Standards Publication Geometrical product specifications (GPS) - Cylindricity Part 1 : Vocabulary and parameters of cylindrical form. 2011.
- [51] ISO/DIS 10360-12 Geometrical Product Specifications (GPS) - Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS) - Part 12: Articulated arm coordinate measurement machines (CMM). 2015.
- [52] ISO, B. S. E. N. Geometric Product Specification (GPS) - Surface texture - Profile method: Rules and procedures for the assessment of surface texture. n. 1, 1998.
- [53] GAO, S.; YANG, C.; XU, J. Experimental study on torque and burrs during ultrasonic assisted single-pass honing of 4Cr13 stainless steel.
- [54] EL MANSORI, M.; GOELDEL, B.; SABRI, L. Performance impact of honing dynamics on surface finish of precoated cylinder bores. **Surface and Coatings Technology**, v. 215, p. 334–339, 2013.

- [55] YOUSFI, M. *et al.* Tribological performances of elliptic and circular texture patterns produced by innovative honing process. **Tribology International**, v. 100, p. 255-262, ago. 2016. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2016.01.049>>.
- [56] ZHANG, Y. K. *et al.* Study on mechanism and experiment of engine cylinder by laser honing. **Key Engineering Materials**, v. 329, p. 315-322, 2007. Trans Tech Publications. Disponível em: <<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.329.315>>.
- [57] HAN, J., ZHANG, G. Investigation on formation mechanism of surface texture and modeling of surface roughness with internal gear power honing. 2018. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.** 98. p. 603–615. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-018-2265-6>>.
- [58] MALLIPEDDI, D. *et al.* The effect of manufacturing method and running-in load on the surface integrity of efficiency tested ground, honed and superfinished gears. **Tribology International**. V. 131. |Março, 2019. p. 277-287. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.10.051>>

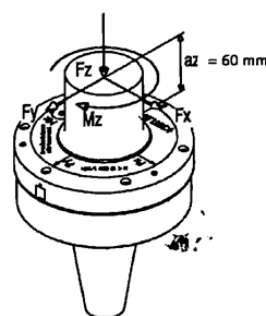
ANEXO I

KISTLER
measure. analyze. innovate.

Kalibrierschein Kraft Calibration Certificate Force

Type 9123C1111 Serial No. 1949011

Kalibriert durch Calibrated by	Datum Date	
A. Maier	15.03.2011	
Referenzgeräte Reference Equipment	Typ Type	Serien-Nr. Serial-No.
Gebrauchsnormal Working Standard	Kistler Z17365 Kistler 9067 Kistler 9068 Kistler 9068	932364 474351 107070 128643
Ladungskalibrator Charge Calibrator	Kistler 5395A Kistler 5395A	605262 1722242
Umgebungstemperatur Ambient Temperature	Relative Feuchte Relative Humidity	
°C	%	
23	45	
Rundlauf Runout	Rest Unwucht Residual unbalance	
mm	g · mm	
0,004	5,900	



Messergebnisse Results of Measurement

Kalibrierter Bereich Calibrated Range	Empfindlichkeit Sensitivity	Linearität Linearity	Übersprechen Cross talk	
N	mV/N	≤ %FSO	%	%
<i>F_x</i> 0 ... 3000	2,030	0,10	<i>F_x → F_y</i> 0,9	<i>F_x → F_z</i> 0,5
<i>F_x</i> 0 ... 450	20,03	0,19		
<i>F_y</i> 0 ... 3000	2,032	0,05	<i>F_y → F_x</i> 1,0	<i>F_y → F_z</i> -1,0
<i>F_y</i> 0 ... 450	20,20	0,14		
<i>F_z</i> 0 ... 18000	0,501	0,09	<i>F_z → F_x</i> -0,1	<i>F_z → F_y</i> -0,4
<i>F_z</i> 0 ... 1800	5,000	0,08		
N·m	mV/N·m	≤ %FSO	N/N·m	
<i>M_z</i> 0 ... 180	53,80	0,08	<i>M_z → F_z</i>	0,49
<i>M_z</i> 0 ... -180	53,98	0,13	<i>M_z → F_z</i>	0,54
<i>M_z</i> 0 ... 18	537,1	0,09		
<i>M_z</i> 0 ... -18	539,5	0,13		

Messverfahren Kontinuierliche Kalibrierung, Vergleichsverfahren
Measurement Procedure Continuous Calibration, Comparison Method

Kistler betreibt die SCS Kalibrierstelle Nr. 049, akkreditiert nach ISO 17025. SCS Kalibrierzertifikate sind auf Bestellung erhältlich
Kistler operates the SCS Calibration Laboratory No. 049, which is accredited per ISO 17025. SCS Calibration Certificates are available on request.

Bestätigung Confirmation

Das oben durch die Seriennummer identifizierte Gerät entspricht der Vereinbarung der Bestellung und hält die Herstellertoleranzen gemäss den Spezifikationen der Datenblätter ein. Dieses Dokument erfüllt die Anforderungen von EN 10204 Abnahmeprüfzeugnis "3.1". Alle Messmittel sind auf nationale Normale rückverfolgbar. Das Kistler Qualitätsmanagement System ist nach ISO 9001 zertifiziert. Dieses Dokument ist ohne Unterschrift gültig.
The equipment mentioned above and identified by Serial Number complies with the agreement of the order and meets the manufacturing tolerances specified in the data sheets. This document fulfils the requirements of EN 10204 Inspection Certificate "3.1". All measuring devices are traceable to national standards. The Kistler Quality Management System is certified per ISO 9001. This document is valid without a signature.

Kistler Instrumente AG
Eulachstrasse 22
Postfach
CH-8408 Winterthur

Tel. +41 52 224 11 11
Fax +41 52 224 14 14
info@kistler.com

ZKB Winterthur BC 732
Swift: ZKBKCHZ80A
Konto: 1132-0374.628

IBAN: CH67 0070 0113 2003 7462 8
MwSt. Nr.: 229 713
ISO 9001 zertifiziert

www.kistler.com

ANEXO II

Desvios de Forma

Este anexo tem por objetivo especificar os parâmetros de desvio de forma que foram avaliados neste trabalho. Tais parâmetros compreendem a cilindricidade e a circularidade e são descritos abaixo segundo as normas ISO 12181-1(2011) e ISO 12180-1(2011).

1. Circularidade (*roundness*):

Segundo a norma ISO 12181-1(2011) circularidade (*roundness*) compreende o desvio que um objeto circular possui de um círculo perfeito. Portanto a circularidade é uma propriedade de um círculo. A Figura II.1 é uma representação gráfica do desvio de circularidade de um furo.

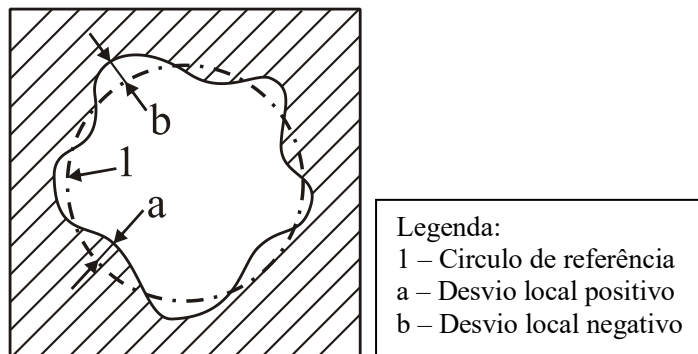


Figura II.1 – Representação gráfica do desvio de circularidade de um furo.

Os parâmetros mais gerais de circularidade são:

- Desvio de circularidade de pico a vale (RONt): valor do maior desvio local de circularidade positivo adicionado do valor absoluto do maior desvio local de circularidade negativo.
- Desvio de circularidade de pico à referência (RONp): valor do maior desvio local de circularidade positivo do círculo de referência dado pelo método dos mínimos quadrados .
- Desvio de circularidade de vale à referência (RONv): valor absoluto do maior desvio local de circularidade negativo do círculo de referência dado pelo método dos mínimos quadrados.
- Desvio de circularidade quadrático médio (ΔR_{rms}): raiz quadrada da soma dos quadrados dos desvios locais de circularidade do círculo de referência dado pelo método dos mínimos quadrados.

$$\Delta R_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \Delta R_i^2 d\theta} \quad (1)$$

Em que:

ΔR_{rms} é o desvio de circularidade quadrático médio;

ΔR_i é o desvio de circularidade local;

θ é o ângulo instantâneo no perfil de circularidade.

2. Cilindricidade (*cylindricity*):

Segundo a norma ISO 12180-1(2011) cilindridade (*cylindricity*) compreende o desvio que um objeto cilíndrico possui de um cilindro perfeito. Portanto a cilindridade é uma propriedade de um cilindro. A Figura II.2 é uma representação gráfica do desvio de cilindridade de um furo.

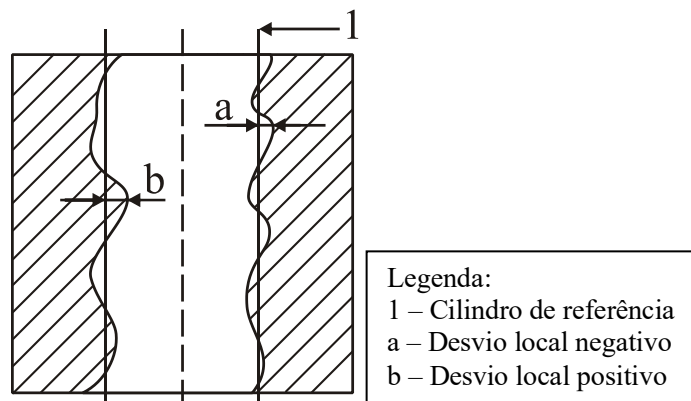


Figura II.2 – Representação gráfica do desvio de cilindridade de um furo.

Os parâmetros gerais de cilindridade são:

- Desvio de cilindridade de pico a vale (CYLt): valor do maior desvio local de cilindridade positivo adicionado do valor absoluto do maior desvio local de cilindridade negativo.
- Desvio de cilindridade de pico à referência (CYLp): valor do maior desvio local de cilindridade positivo do cilindro de referência dado pelo método dos mínimos quadrados.
- Desvio de cilindridade de vale à referência (CYLv): valor absoluto do maior desvio local de cilindridade negativo do círculo de referência dado pelo método dos mínimos quadrados.
- Desvio de cilindridade quadrático médio (ΔC_{rms}): raiz quadrada da soma dos quadrados dos desvios locais de cilindridade do cilindro de referência dado pelo método dos mínimos quadrados.

$$\Delta C_{rms} = \sqrt{\frac{1}{A} \int_A \Delta C_i^2 dA} \quad (2)$$

Em que:

ΔC_{rms} é o desvio de cilindridade quadrático médio;

ΔC_i é o desvio de cilindridade local;

A é área da superfície do objeto cilíndrico.

ANEXO III

Parâmetros de rugosidade

Este anexo traz as definições dos parâmetros de rugosidade 2D baseada nas normas ISO 4287, ISO 13565 e ISO 25178-2.

- Ra: rugosidade aritmética média do perfil. Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas $Z(x)$ no comprimento de amostragem, Equação 1. A Figura III.1 auxilia no entendimento deste parâmetro.

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |Z(x)| dx \quad (3)$$

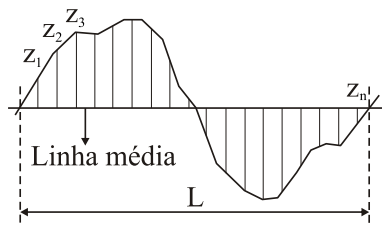
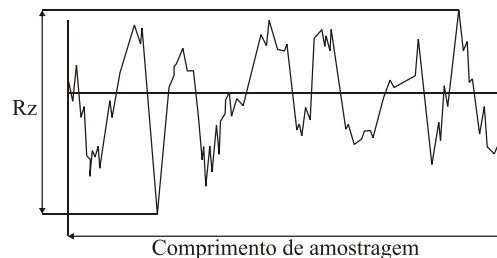


Figura III.1 - Alturas z do perfil para o cálculo da rugosidade aritmética média, Ra

- Rz: altura de pico a vale dentro do intervalo de amostragem. Soma da altura máxima dos picos e a maior das profundidades, considerando o comprimento de amostragem. A Figura III.2 ilustra este parâmetro.



- Rpk: altura reduzida dos picos. Este parâmetro representa a média de altura dos picos prostrusos acima do perfil de rugosidade fundamental. Ou seja, esta é a porção do topo da superfície que será desgastada de maneira rápida quando um contato deslizante for iniciado nesta superfície.
- Rk: profundidade de rugosidade fundamental. Este parâmetro é definido como a profundidade do perfil de rugosidade fundamental. Este parâmetro caracteriza a superfície que irá influenciar, a longo prazo, o desempenho e a vida de uma superfície em contato deslizante com um contra corpo.
- Rvk: profundidade reduzida dos vales. Este parâmetro é definido como a profundidade média dos vales do perfil projetada através do perfil de rugosidade fundamental. Este parâmetro basicamente fornece informações quanto a capacidade de retenção de um meio lubrificante proporcionada pelos vales profundos da superfície. A Figura III.5 apresenta os parâmetros Rpk, Rk e Rvk.

- R_t : altura total de pico a vale. Este parâmetro equivale à diferença entre o maior pico e o vale mais profundo ao longo do comprimento de avaliação de rugosidade (soma dos comprimentos de amostragem). A soma entre os parâmetros de distribuição de altura do perfil equivale ao valor de R_t , Equação 5.

$$R_t = R_{pk} + R_k + R_{vk} \quad (4)$$

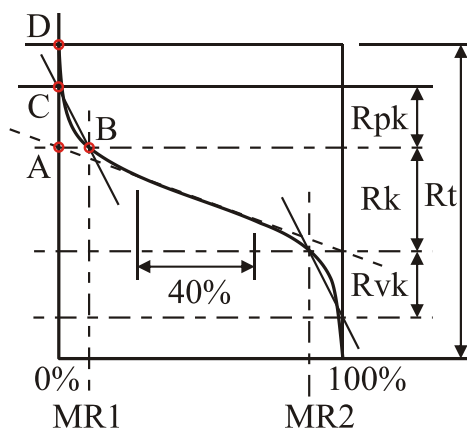


Figura III.2 - Curva de Abbott-Firestone e seus parâmetros

APÊNDICE A

Cálculo da área de contato efetivo da peça com a ferramenta

Equação da área total de contato entre os segmentos abrasivos e a peça [23]:

$$A = b \cdot h \cdot z ,$$

em que:

A = área total de contato entre os segmentos abrasivos de brunimento e a peça [mm²];

b = largura dos segmentos abrasivos de brunimento [mm];

h = comprimento da peça [mm];

z = número de segmentos abrasivos de brunimento em contato com a peça.

Ferramenta de múltiplas pastilhas	Ferramenta Bucha
A=3 mm x 49 mm x 5 pastilhas= 735 mm ²	A= 5,1 mm x 49 mm x 6 partes=1499,4 mm ²

APÊNDICE B

Tabela B.1 - Resultados médios e intervalo de confiança dos esforços para cada condição de usinagem utilizando as ferramentas *Precidor* e bucha.

Nº do ensaio	Condição			M _z [N.m]	IC [±N]	F _a [N]	IC [±N]	F _c [N]	IC [±N]
	Ferramenta	V _a [m/min]	V _t [m/min]						
1	<i>Precidor</i>	3,3	16	7,38	1,04	284,20	40,73	288,23	41,29
2	<i>Precidor</i>	3,3	21	7,08	0,05	225,38	4,10	230,04	3,95
3	<i>Precidor</i>	3,3	26	5,99	0,16	143,50	1,09	148,69	1,32
4	<i>Precidor</i>	3,9	16	7,61	0,99	381,94	26,70	385,14	27,30
5	<i>Precidor</i>	3,9	21	4,91	0,98	185,95	29,35	188,68	30,00
6	<i>Precidor</i>	3,9	26	6,16	0,98	179,47	24,04	183,88	24,85
7	<i>Precidor</i>	4,5	16	7,72	0,13	412,44	21,79	415,49	21,73
8	<i>Precidor</i>	4,5	21	6,63	1,14	278,51	46,59	281,83	47,17
9	<i>Precidor</i>	4,5	26	5,39	0,06	187,35	1,26	190,60	1,31
10	Bucha	3,3	16	4,72	0,23	173,30	15,57	176,02	15,07
11	Bucha	3,3	21	4,00	1,48	120,05	39,80	122,84	40,91
12	Bucha	3,3	26	3,93	0,05	158,02	55,14	240,36	11,57
13	Bucha	3,9	16	4,38	0,35	202,20	13,71	459,05	66,91
14	Bucha	3,9	21	5,13	0,54	156,40	17,51	411,78	106,83
15	Bucha	4,5	16	4,97	1,12	257,97	49,86	235,73	19,76

Tabela B.2 - Resultados médios e intervalo de confiança dos erros de forma para cada condição de usinagem utilizando as ferramentas *Precidor* e bucha.

Nº do ensaio	Condição			CILIN [mm]	IC [±mm]	CIRC [mm]	IC [±mm]
	Ferramenta	V _a [m/min]	V _t [m/min]				
1	<i>Precidor</i>	3,3	16	0,0590	0,0316	0,0416	0,0168
2	<i>Precidor</i>	3,3	21	0,0611	0,0137	0,0382	0,0123
3	<i>Precidor</i>	3,3	26	0,0536	0,0069	0,0307	0,0053
4	<i>Precidor</i>	3,9	16	0,0679	0,0214	0,0399	0,0127
5	<i>Precidor</i>	3,9	21	0,0385	0,0140	0,0266	0,0059
6	<i>Precidor</i>	3,9	26	0,0459	0,0102	0,0314	0,0074
7	<i>Precidor</i>	4,5	16	0,0557	0,0053	0,0341	0,0030
8	<i>Precidor</i>	4,5	21	0,0454	0,0133	0,0282	0,0062
9	<i>Precidor</i>	4,5	26	0,0516	0,0092	0,0318	0,0038
10	Bucha	3,3	16	0,0438	0,0127	0,0249	0,0056
11	Bucha	3,3	21	0,0419	0,0183	0,0399	0,0142
12	Bucha	3,3	26	0,0431	0,0311	0,0248	0,0108

Tabela B.3 - Resultados médios e intervalo de confiança das rugosidades para cada condição de usinagem utilizando as ferramentas *Precidor* e bucha.

N° do ensaio	Condição			R _a [μm]	IC [±μm]	R _z [μm]	IC [±μm]
	Ferramenta	V _a [m/min]	V _t [m/min]				
1	<i>Precidor</i>	3,3	16	1,156	0,062	8,559	1,123
2	<i>Precidor</i>	3,3	21	1,023	0,054	7,497	0,867
3	<i>Precidor</i>	3,3	26	1,027	0,029	6,873	0,226
4	<i>Precidor</i>	3,9	16	1,093	0,047	7,617	0,654
5	<i>Precidor</i>	3,9	21	1,059	0,063	7,504	0,717
6	<i>Precidor</i>	3,9	26	1,016	0,065	7,820	0,471
7	<i>Precidor</i>	4,5	16	1,166	0,088	8,816	1,090
8	<i>Precidor</i>	4,5	21	1,122	0,117	7,570	0,846
9	<i>Precidor</i>	4,5	26	1,013	0,021	7,323	0,345
10	Bucha	3,3	16	1,764	0,125	13,667	0,677
11	Bucha	3,3	21	1,846	0,153	12,800	1,039
12	Bucha	3,3	26	1,770	0,015	13,033	1,146

Tabela B.4 - Resultados médios e intervalo de confiança dos parâmetros da Curva de Abbot para cada condição de usinagem utilizando as ferramentas *Precidor* e bucha.

N° do ensaio	Condição			R _k [μm]	IC [±μm]	R _{pk} [μm]	IC [±μm]	R _{vk} [μm]	IC [±μm]
	Ferramenta	V _a [m/min]	V _t [m/min]						
1	<i>Precidor</i>	3,3	16	3,607	0,172	1,369	0,138	2,133	0,411
2	<i>Precidor</i>	3,3	21	3,166	0,093	1,319	0,036	1,830	0,397
3	<i>Precidor</i>	3,3	26	3,317	0,199	1,086	0,094	1,488	0,073
4	<i>Precidor</i>	3,9	16	3,422	0,195	1,356	0,114	1,438	0,211
5	<i>Precidor</i>	3,9	21	3,347	0,164	1,072	0,026	1,751	0,449
6	<i>Precidor</i>	3,9	26	2,988	0,038	1,277	0,060	2,189	0,536
7	<i>Precidor</i>	4,5	16	3,508	0,208	1,422	0,315	2,239	0,323
8	<i>Precidor</i>	4,5	21	3,408	0,127	1,332	0,094	1,323	0,085
9	<i>Precidor</i>	4,5	26	3,176	0,057	1,167	0,108	1,644	0,215
10	Bucha	3,3	16	4,842	0,536	2,254	0,119	4,289	0,088
11	Bucha	3,3	21	5,320	0,657	1,812	0,104	3,821	0,707
12	Bucha	3,3	26	5,164	0,352	2,188	0,694	3,364	0,135