

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO PROFISSIONAL

IVAN LEANDRO DEBIASI

ANÁLISE DA QUALIDADE SUPERFICIAL NO FRESAMENTO EM RAIO
COM FERRAMENTA DE PONTA ESFÉRICA

CAXIAS DO SUL

2019

IVAN LEANDRO DEBIASI

**ANÁLISE DA QUALIDADE SUPERFICIAL NO FRESAMENTO EM RAIO
COM FERRAMENTA DE PONTA ESFÉRICA**

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Projeto e Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo P. Zeilmann

CAXIAS DO SUL

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade de Caxias do Sul
Sistema de Bibliotecas UCS - Processamento Técnico

D286a Debiasi, Ivan Leandro

Análise da qualidade superficial no fresamento em raio com
ferramenta de ponta esférica / Ivan Leandro Debiasi. – 2019.
109 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2019.

Orientação: Rodrigo Panosso Zeilmann.

1. Fresagem (Trabalhos em metal). 2. Usinagem 3. Aspereza de
superfície. 4. Ferramentas. I. Zeilmann, Rodrigo Panosso, orient. II.
Título.

CDU 2. ed.: 621.914

Catalogação na fonte elaborada pela(o) bibliotecária(o)
Carolina Machado Quadros - CRB 10/2236

“ANÁLISE DA QUALIDADE SUPERFICIAL NO FRESAMENTO EM RAIOS COM FERRAMENTA DE PONTA ESFÉRICA.”

Ivan Leandro Debiasi

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, Área de Concentração: Projeto e Fabricação.

Caxias do Sul, 14 de agosto de 2019.

Banca Examinadora:

Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann
Orientador
Universidade de Caxias do Sul

Dra. Maria Cristina Moré Farias
Universidade de Caxias do Sul

Dr. Leandro Luis Corso
Universidade de Caxias do Sul

Dr. Oscar Alfredo Garcia de Suarez
Universidade de Caxias do Sul

*“Educação é uma descoberta progressiva de
nossa própria ignorância”.*

(Voltaire)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me dado saúde e força para superar os momentos de dificuldade.

À minha esposa Maristela, que contribuiu com apoio incondicional, carinho e dedicação, sem dúvida o porto seguro, o meu farol nos momentos de tempestade.

Ao meu filho Daniel, constante incentivador e eterno orgulho, a âncora que não me impediu de andar à deriva.

À Diferro Aços Especiais por viabilizar a matéria-prima para as amostras e a Walter Tools, por disponibilizar os insertos e suportes para a usinagem.

Ao Prof. Lindonez, do Centro de Formação Profissional Senai Nilo Peçanha e ao Prof. Tiago, do Centro Tecnológico de Mecatrônica em Caxias do Sul, por dispor, além das instalações e máquinas, sua imensurável ajuda nos testes iniciais e na preparação dos ensaios.

Ao Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann, meu orientador e amigo, pela assistência, pelo apoio e tempo dedicados durante este trabalho.

Ao amigo Gaston, técnico em usinagem do Laboratório de Novas Tecnologias de Produção da UCS e aos membros do GUS pelo auxílio prestado na usinagem e verificação dos resultados encontrados.

Ao amigo e colega Pedro Henrique Schwaizer por participar de forma intensa, acreditando na ideia e no sucesso desta pesquisa.

Por fim, a todos os que de forma direta ou indireta contribuíram para a conclusão desta dissertação de mestrado.

RESUMO

Este trabalho tem por finalidade beneficiar a indústria na fabricação de componentes com geometrias complexas, a fim de obter redução nos processos de acabamento da usinagem. É apresentado o processo de fresamento de formas complexas, com ferramentas inteiriças de ponta esférica. É comparada a superfície usinada, levando em consideração a influência da utilização do diâmetro efetivo para o cálculo dos parâmetros de corte no fresamento, com uma ferramenta de ponta esférica, na direção longitudinal e transversal. Na comparação entre os corpos de prova com a usinagem, no sentido transversal, foram identificadas melhorias nos resultados de rugosidade para a metade dos pontos avaliados. Salienta-se que os parâmetros de corte foram aumentados nessas situações. Também foi identificada uma redução no tempo de processo e redução do desgaste da ferramenta de corte.

Palavras-chave: Ferramenta de topo esférico. Estratégia de corte. Rugosidade. Textura.

ABSTRACT

The primary purpose of this project is to benefit the industry in the manufacture of components with complex geometries, in order to obtain reduction in the finishing of the machining processes. It is presented the process of milling complex shapes with solid spherical tip tools. The machined surface is compared taking into account the influence of the use of the effective diameter for the calculation of cutting parameters in milling with a spherical tip cutter in the longitudinal and transverse direction. In the comparison, work piece with cross-cut machining had improvements in the roughness results for half the evaluated points. It should be noted that the cutting parameters were increased in these situations. Also, a reduction in process time and reduction of wear of the cutting tool was identified.

Keywords: Ball nose tool. Machining strategy. Roughness. Texture.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Formação do cavaco	21
Figura 2 – Mecanismos de formação de cavacos	22
Figura 3 – Fresamento frontal e fresamento tangencial	24
Figura 4 – Movimento concordante e discordante da ferramenta	25
Figura 5 – Fresamento concordante e discordante	25
Figura 6 – Percurso de corte ou caminho da ferramenta	30
Figura 7 – Diâmetro efetivo da ferramenta de topo esférico	31
Figura 8 – Contato ascendente e descendente	32
Figura 9 – Pontos de contato com a superfície da peça de uma ferramenta de ponta esférica	33
Figura 10 – Condições de contato no acabamento	34
Figura 11 – Topografia simulada da superfície usinada com fresa esférica	35
Figura 12 – Topografia simulada com variação de relação a_e/f_z	36
Figura 13 – Modos de corte	36
Figura 14 – Mecanismos do desgaste na usinagem	38
Figura 15 – Ilustração do desgaste de flanco.....	39
Figura 16 – Comportamento da curva padrão de desgaste.....	40
Figura 17 – Rugosímetro portátil	43
Figura 18 – Parâmetros de rugosidade	44
Figura 19 – Fluxograma do processo experimental.....	47
Figura 20 – Máquina utilizada nos ensaios	49
Figura 21 – Inserto e haste utilizados nos experimentos.....	50
Figura 22 – Fotos do inserto	50
Figura 23 – Esboço do corpo de prova e trajetória ou caminho da ferramenta	53
Figura 24 – Pontos de medição para avaliação	54
Figura 25 – Rugosímetro portátil para a medição da rugosidade	55
Figura 26 – Processo de medição da rugosidade.....	56
Figura 27 – Rugosidade CP01	59
Figura 28 – Imagens de textura CP01	61
Figura 29 – Peculiaridades da textura no P6	61
Figura 30 – Caldeamento no P9	62
Figura 31 – Rugosidade CP02	63

Figura 32 – Imagens de textura CP02	65
Figura 33 – Rugosidade CP03 – Teste	66
Figura 34 – Rugosidade CP03 – Réplica 01	67
Figura 35 – Rugosidade CP03 – Réplica 02	68
Figura 36 – Imagens de textura CP03 – Teste	69
Figura 37 – Formato alongado das células para P1 e P9	70
Figura 38 – Imagens de textura CP03 – Réplica 01	71
Figura 39 – Material aderido no P7	71
Figura 40 – Imagens de textura CP03 – Réplica 02	72
Figura 41 – Material aderido no P4 CP03 – Réplica 02.....	72
Figura 42 – Fotos do inserto CP03 – Réplica 01	73
Figura 43 – Rugosidade CP04 – Teste	74
Figura 44 – Rugosidade CP04 – Réplica 01	75
Figura 45 – Rugosidade CP04 – Réplica 02	76
Figura 46 – Imagens de textura CP04 – Teste	77
Figura 47 – Imagens de textura CP04 – Réplica 01	78
Figura 48 – Imagens de textura CP04 – Réplica 02	78
Figura 49 – Fotos do inserto CP04 – Réplica 01	79
Figura 50 – Comparação de insertos – Réplica 01	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química percentual em massa do aço AISI H13	48
Tabela 2 – Comprimentos de amostragem e avaliação de rugosidade	55
Tabela 3 – Comparativo de tempos	81
Tabela 4 – Medições Ra CP01 – Teste.....	91
Tabela 5 – Medições R _{máx} CP01 – Teste.....	91
Tabela 6 – Medições R _z CP01 – Teste.....	92
Tabela 7 – Medições Ra CP02 – Teste.....	92
Tabela 8 – Medições R _{máx} CP02 – Teste.....	92
Tabela 9 – Medições R _z CP02 – Teste.....	93
Tabela 10 – Medições Ra CP03 – Teste.....	93
Tabela 11 – Medições R _{máx} CP03 – Teste.....	94
Tabela 12 – Medições R _z CP03 – Teste.....	94
Tabela 13 – Medições Ra CP03 – Réplica 01	94
Tabela 14 – Medições R _{máx} CP03 – Réplica 01	95
Tabela 15 – Medições R _z CP03 – Réplica 01	95
Tabela 16 – Medições Ra CP03 – Réplica 02	96
Tabela 17 – Medições R _{máx} CP03 – Réplica 02	96
Tabela 18 – Medições R _z CP03 – Réplica 02	96
Tabela 19 – Medições Ra CP04 – Teste.....	97
Tabela 20 – Medições R _{máx} CP04 – Teste.....	97
Tabela 21 – Medições R _z CP04 – Teste.....	98
Tabela 22 – Medições Ra CP04 – Réplica 01	98
Tabela 23 – Medições R _{máx} CP04 – Réplica 01	98
Tabela 24 – Medições R _z CP04 – Réplica 01	99
Tabela 25 – Medições Ra CP04 – Réplica 02	99
Tabela 26 – Medições R _{máx} CP04 – Réplica 02	100
Tabela 27 – Medições R _z CP04 – Réplica 02	100
Tabela 28 – ANOVA entre corpos de prova para CP03.....	101
Tabela 29 – ANOVA entre corpos de prova para CP04.....	101
Tabela 30 – Cálculo DMS CP03	101
Tabela 31 – Cálculo DMS CP04	102

Tabela 32 – ANOVA entre corpos de prova para P1	104
Tabela 33 – ANOVA entre corpos de prova para P2	104
Tabela 34 – ANOVA entre corpos de prova para P3	104
Tabela 35 – ANOVA entre corpos de prova para P4	105
Tabela 36 – ANOVA entre corpos de prova para P5	105
Tabela 37 – ANOVA entre corpos de prova para P6	105
Tabela 38 – ANOVA entre corpos de prova para P7	105
Tabela 39 – ANOVA entre corpos de prova para P8	106
Tabela 40 – ANOVA entre corpos de prova para P9	106
Tabela 41 – ANOVA entre corpos de prova para P10	106
Tabela 42 – Parâmetros propostos CP02 e CP04	107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i> (Instituto Americano de Ferro e Aço)
ANOVA	<i>Analysis of variance</i> (Análise de variação)
CNC	Controle numérico computadorizado
CP'S	Corpos de prova
CP01	Corpo de prova um
CP02	Corpo de prova dois
CP03	Corpo de prova três
CP04	Corpo de prova quatro
DDP	Diferença de potencial
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i> (Instituto Alemão de Normalização)
DMS	Diferença mínima significativa
<i>et al.</i>	e outros
GUS	Grupo de Usinagem (da Universidade de Caxias do Sul)
HRC	<i>Hardness Rockwell C</i> (Dureza Rockwell C)
	Hipótese Nula
	Hipótese Alternativa
H13	Classe de aço para fabricação de moldes e matrizes
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional para Padronização)
Kv	Quilovolt
k	Número de medições
LNTP	Laboratório de Novas Tecnologias de Produção
Ltda.	Limitada
m	Metro
mm	Milímetro
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
min	Minuto
MQR	Média Quadrática
PIB	Produto Interno Bruto
PVD	Processo de deposição a vapor
P1	Ponto de medição um

P2	Ponto de medição dois
P3	Ponto de medição três
P4	Ponto de medição quatro
P5	Ponto de medição cinco
P6	Ponto de medição seis
P7	Ponto de medição sete
P8	Ponto de medição oito
P9	Ponto de medição nove
P10	Ponto de medição dez
rpm	Rotação por minuto
t	Nível de significância
UCS	Universidade de Caxias do Sul
3D	Três dimensões

LISTA DE SÍMBOLOS

Ra	Rugosidade média aritmética (μm)
Rz	Rugosidade média (μm)
Rmáx	Rugosidade máxima (μm)
%	Por cento
	Espessura de corte (mm)
α	Ângulo de incidência ($^{\circ}$)
β	Ângulo de cunha ($^{\circ}$)
γ	Ângulo de saída ($^{\circ}$)
h	Espessura de usinagem (mm)
f	Avanço (mm/volta)
	Velocidade de corte (m/min)
D	Diâmetro (mm)
n	Rotação (rpm)
	Velocidade de avanço (mm/min)
	Avanço por gume (mm/gume)
z	Número de gumes da ferramenta
	Incremento lateral (mm)
	Profundidade axial de corte (mm)
	Diâmetro efetivo máximo (mm)
RF	Raio de ponta da ferramenta de corte (mm)
Θ	Ângulo da ferramenta em relação à peça ($^{\circ}$)
	Rugosidade entre cinco intervalos de medição (μm)
le	Comprimento da amostragem (mm)
yi	Posição da linha média no perfil de rugosidade
lm	Intervalo de medição (mm)
VBmáx	Critério de medição do desgaste
μm	Raio de ponto
Vf	Velocidade de avanço
zi	Rugosidade parcial (μm)
	Rugosidade parcial máxima (μm)
'	Minutos
"	Segundos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	JUSTIFICATIVA	18
1.2	OBJETIVOS.....	19
1.2.1	Objetivo geral	19
1.2.2	Objetivos específicos.....	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	PROCESSOS DE USINAGEM	20
2.1.1	A mecânica da formação do cavaco.....	21
2.1.2	Fresamento	23
2.1.2.1	Processo de fresamento.....	23
2.1.2.2	Métodos de fresamento	24
2.1.2.3	Grandezas e parâmetros de corte	26
2.2	USINAGEM DE SUPERFÍCIES COMPLEXAS	29
2.2.1	Ferramenta de topo esférica.....	29
2.2.1.1	Características do processo e parâmetros de usinagem	32
2.2.2	Topografia da superfície usinada	34
2.3	USINABILIDADE.....	37
2.3.1	Desgaste no fresamento	37
2.3.1.1	Mecanismos e tipos de desgaste	38
2.3.1.2	Vida da ferramenta e critérios de avaliação	40
2.3.2	Qualidade superficial.....	41
2.4	DETERMINAÇÃO DAS SUPERFÍCIES	41
2.4.1	Rugosidade.....	41
2.4.1.1	Avaliação da rugosidade.....	42
2.4.2	Textura	44
2.4.3	Microscopia óptica	45
3	METODOLOGIA	47
3.1	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	47
3.2	ENTRADAS FIXAS DO PROCESSO	48
3.2.1	Material utilizado nos ensaios	48

3.2.2	Máquina-ferramenta	48
3.2.3	Ferramenta de corte.....	49
3.2.4	Parâmetros de corte fixos	51
3.3	VARIÁVEIS DE ENTRADA DO PROCESSO.....	51
3.3.1	Parâmetros de corte variáveis.....	51
3.3.2	Estratégia de corte	52
3.3.3	Desgaste da ferramenta	53
3.4	VARIÁVEIS DE SAÍDA DO PROCESSO	54
3.4.1	Qualidade superficial.....	54
3.4.2	Desgaste da ferramenta	57
3.5	ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1	USINAGEM LONGITUDINAL COM VELOCIDADE ROTACIONAL E AVANÇO CONSTANTE (CP01).....	59
4.1.1	Análise de rugosidade para o CP01	59
4.1.2	Análise de textura para o CP01	60
4.2	USINAGEM LONGITUDINAL COM VELOCIDADE ROTACIONAL E AVANÇO VARIÁVEL (CP02)	62
4.2.1	Análise de rugosidade para o CP02.....	63
4.2.2	Análise de textura para o CP02	64
4.3	USINAGEM TRANSVERSAL COM VELOCIDADE ROTACIONAL E AVANÇO CONSTANTE (CP03).....	66
4.3.1	Análise de rugosidade para o CP03.....	66
4.3.2	Análise de textura para o CP03	69
4.3.3	Desgaste dos insertos na usinagem CP03 – Réplica 01	73
4.4	USINAGEM TRANSVERSAL COM VELOCIDADE ROTACIONAL E AVANÇO VARIÁVEL (CP04)	73
4.4.1	Análise de rugosidade para o CP04.....	74
4.4.2	Análise de textura para o CP04	77
4.4.3	Desgaste dos insertos na usinagem CP04 – Réplica 01	79
4.5	COMPARATIVO ENTRE CP03 E CP04	80
4.6	TEMPO DE PROCESSO	80
4.7	DESGASTE DA FERRAMENTA.....	81

5	CONCLUSÃO	83
6	SUGESTÃO PARA NOVOS TRABALHOS	85
	REFERÊNCIAS	86
	APÊNDICE A – RUGOSIDADE DO TESTE, RÉPLICA 01 E RÉPLICA 02	91
	APÊNDICE B – ANÁLISES ESTATÍSTICAS	101
	APÊNDICE C – PARÂMETROS DE CORTE PROPOSTOS PARA CP02 E CP04	107
	ANEXO A – CERTIFICADO DA MATÉRIA-PRIMA	108
	ANEXO B – NOTA FISCAL WALTER DO BRASIL	109

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

Na usinagem de superfícies complexas, as ferramentas de corte com ponta esférica são amplamente utilizadas na indústria moderna, seja para a fabricação de moldes e matrizes, seja na produção de componentes para o setor automotivo ou peças para a indústria aeroespacial. A operação de acabamento com ferramentas de ponta esférica envolve vários fenômenos, que ainda não são totalmente compreendidos, pois este processo difere significativamente do método convencional de fresamento. (SCANDIFFIO; DINIZ; SOUZA, 2016).

O desafio na usinagem de acabamento com ferramentas de ponta esférica, na fabricação de moldes e matrizes, é atingir a precisão dimensional e geométrica determinada, por exemplo, pela indústria automotiva e pelo segmento de plástico. Com a melhora da qualidade superficial, seria possível minimizar as operações de acabamento manuais, ainda necessárias para atender às exigências técnicas. Em uma análise técnica e econômica, somente a indústria automotiva representa um terço das necessidades de peças injetadas, e o acabamento dessas peças tem primordial importância. Assim como, somente a usinagem na fabricação dos moldes representa 30% do custo total de um componente plástico. (BOUJELBENE, *et al.*, 2004).

Com a necessidade constante de redução nos tempos de fabricação e dos desafios tecnológicos trazidos pelas indústrias aeronáutica e automobilística, com produtos inovadores relacionados a geometrias complexas, modeladas em *software* de desenho assistido por computador (CAD), impõe-se formas de se obter resultados otimizados, principalmente em relação à usinagem de acabamento. O conhecimento da melhor estratégia de usinagem, aliado a parâmetros inerentes ao processo, pode gerar vantagens competitivas, produzindo peças com altas exigências dimensionais e melhorias tanto na integridade como na qualidade superficial do produto final. (WRUBLAK; PILATTI; PEDROSO, 2008). Com isso, estima-se que os avanços nos estudos, referentes à qualidade superficial, ao desgaste nas ferramentas, à rugosidade e à textura, podem ter resultados representativos na produtividade, na qualidade e no custo.

Este trabalho propõe um estudo do efeito da velocidade de corte na qualidade superficial da peça e no desgaste da ferramenta, comparando o processo que utiliza rotação fixa com a proposta de empregar a velocidade de corte constante. A usinagem foi realizada

em corpos de prova de aço AISI H13, com tratamento térmico de recozimento, com dureza de 191 HB. Também compararam-se os parâmetros de rugosidade R_a , R_z e $R_{máx}$, em diferentes posições das amostras e a textura das superfícies usinadas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a influência de diferentes estratégias de usinagem sobre a qualidade superficial e o desgaste dos insertos, no fresamento de topo esférico.

1.2.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, delinearam-se os seguintes objetivos específicos:

- a) comparar a qualidade da superfície de corpos de prova com geometria côncava e convexa, usinadas com uma ferramenta de ponta esférica, na forma longitudinal e transversal, ascendente e descendente;
- b) confrontar os parâmetros de rugosidade R_a , R_z e $R_{máx}$ e a textura da superfície usinada em diferentes posições dos corpos de prova;
- c) avaliar o desgaste dos insertos para as estratégias utilizadas; e
- d) quantificar o tempo de usinagem para as estratégias propostas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica necessária ao desenvolvimento do trabalho proposto. Basicamente são apresentados os elementos relativos ao processo de usinagem com ferramentas de topo esférico. Em seguida, é discutida a mecânica do cavaco em que são apresentados seus mecanismos de formação. Na sequência, são trabalhados os conceitos do processo de fresamento e também apresentadas as equações para a definição dos parâmetros de usinagem. Posteriormente, são demonstradas as aplicações da usinagem em superfícies complexas, a fim de determinar suas características e, por fim, são apontados os conceitos de usinabilidade e a determinação das superfícies.

2.1 PROCESSOS DE USINAGEM

Basicamente, fabricar consiste em modificar uma matéria-prima, com o intuito de obter um produto acabado. Para tal, utilizam-se os processos de fabricação que, de forma geral, podem ser divididos em duas categorias: com remoção de material ou sem remoção de material. (KLOCKE, 2011).

Segundo Santos e Sales (2007), o processo de usinagem é a alteração da matéria-prima em um produto, por meio da retirada de material na forma de cavacos e pode ser dividida também em duas categorias, de acordo com a energia empregada: a usinagem tradicional, quando o material é retirado por cisalhamento, ou não tradicional, em que empregam-se outras modalidades de energia.

O cavaco pode ser definido como o material removido pela ação de corte da ferramenta e pode ser produzido por ferramenta de geometria de corte indefinida ou por ferramenta de corte definida. (FRACARO, 2017).

Conforme König e Klocke (2008), em todos os processos com remoção de cavaco a geometria da ferramenta influencia consideravelmente na formação de cavacos. Esta influência é observada na saída dos cavacos, na força de corte, no desgaste da ferramenta e no resultado do trabalho. Devido a isto, a ferramenta deve ser adaptada ao material da peça e nas condições específicas de cada máquina.

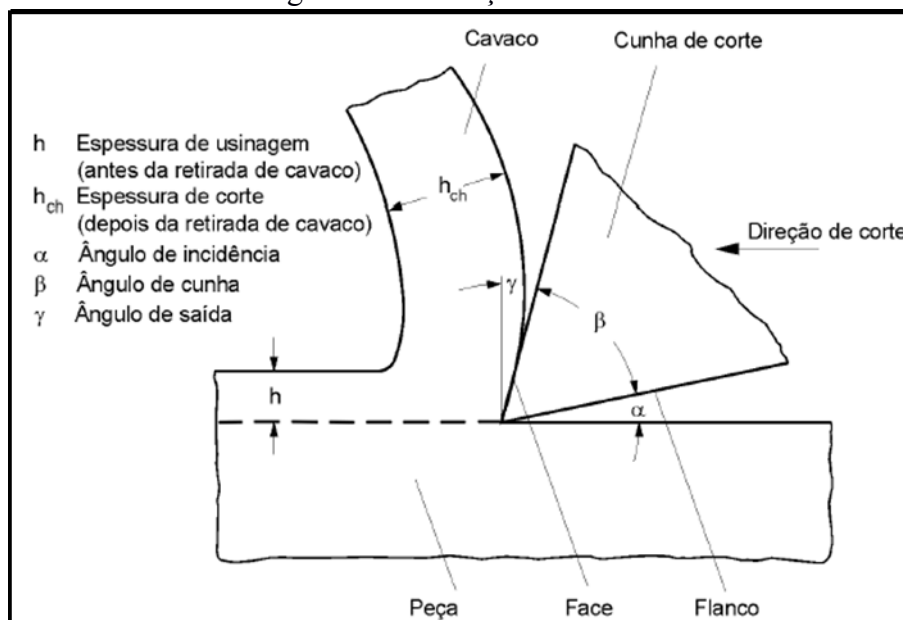
O fresamento situa-se dentre os diversos processos de usinagem com remoção de cavacos, mediante o uso da ferramenta de corte com geometria definida. Este processo possui grande aplicação na usinagem, pois pode gerar superfícies de várias formas pela remoção progressiva do material. É possível usinar praticamente qualquer peça e superfícies de todos os tipos ou formatos. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

2.1.1 A mecânica da formação do cavaco

“A base para um melhor entendimento de todos os processos de usinagem está no estudo científico da formação de cavacos.” (MACHADO *et al.*, 2011, p. 57). A formação do cavaco tem influência em vários fatores na usinagem, tais como a temperatura gerada na usinagem, os esforços de corte, o desgaste da ferramenta, a lubrificação no corte, entre outros. Nesse processo, estão envolvidos desde os aspectos econômicos e de qualidade da peça até a segurança do operador e a utilização adequada da máquina, entre outros. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Na Figura 1 observa-se a ação de uma ferramenta no corte do material de uma peça. Com a penetração da cunha de corte o, material se deforma elástica e plasticamente, assim que seja ultrapassada a tensão máxima de cisalhamento do material. Devido à forma da cunha de corte, o material começa a escoar tomando a forma de cavaco, que desliza sobre a face da ferramenta. (KLOCKE, 2011).

Figura 1 – Formação do cavaco



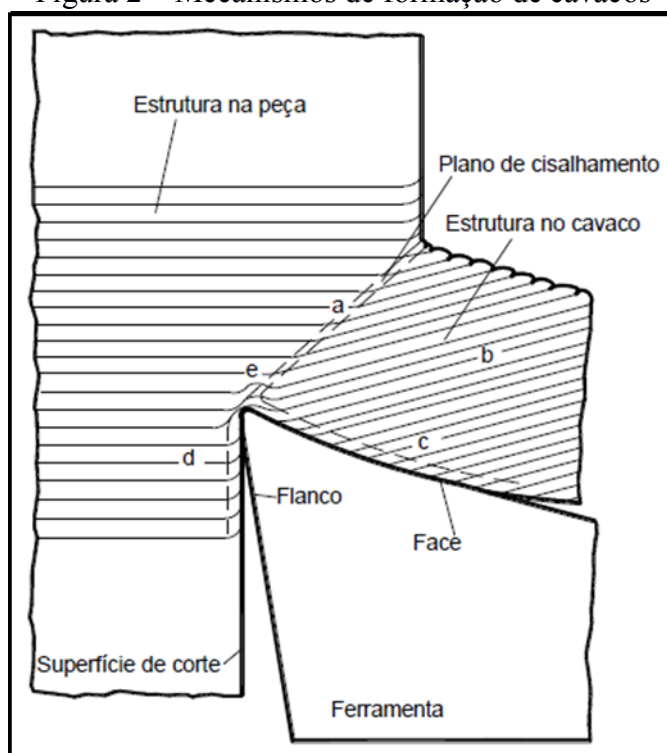
Fonte: Adaptada de Klocke (2011).

Segundo Rebeyka (2016), a teoria do cisalhamento é a mais aceita para explicar o mecanismo da formação do cavaco na usinagem de metais e, nessa teoria, o cavaco é basicamente formado em quatro etapas: recalque, deslizamento, ruptura e escorregamento.

De acordo com König e Klocke (2008), a Figura 2 apresenta de forma esquemática o mecanismo de formação de cavaco de uma deformação plástica contínua, dividida em quatro regiões. A configuração da estrutura na peça (a) passa por cisalhamento (zona de

cisalhamento), para a configuração estrutura do cavaco (b). Nos materiais frágeis, pode ocorrer uma deformação plástica na região de cisalhamento, que leva à ruptura do material. No entanto, se o material tiver uma capacidade de deformação maior, a ruptura ocorre imediatamente à frente do gume, na região (e). A solicitação de tração, aliada à aplicação de uma pressão vertical sobre a ferramenta e combinada com as elevadas temperaturas, ocasiona deformações na camada superficial de corte do cavaco (c) e na superfície de corte (d). No deslizamento formam-se superfícies-limite sobre as superfícies da ferramenta que também sofrem deformações plásticas complementares. Essas regiões de escoamento demonstram uma textura de deformação paralela à face de ferramenta, dando a impressão de escoamento com grau de deformação extremamente elevado.

Figura 2 – Mecanismos de formação de cavacos



Fonte: Adaptada de König e Klocke (2008).

O cavaco, formado no processo acima descrito, é denominado de cavaco contínuo. Existem outros tipos de cavaco, como o lamelar, cisalhado e arrancado. (KÖNIG; KLOCKE, 2008).

O fenômeno da formação do cavaco ocorre de forma cíclica, repetindo as quatro etapas. É possível interferir nesses fenômenos de forma intencional, com variações tanto na geometria da ferramenta como nas condições de usinagem. A intenção é controlar a formação do cavaco para obter um processo de usinagem desejado, com maior vida útil das ferramentas

e maior eficiência e segurança no corte. (REBEYKA, 2016). O avanço é o parâmetro com maior influência sobre a forma do cavaco, seguido pela profundidade de corte. (FRACARO, 2017).

Para certas condições de corte, é bastante comum a ocorrência de um efeito chamado de gume postiço, em que ocorre o acúmulo de material da peça que é aderido sobre o gume, sendo prejudicial ao acabamento da peça e reduz a vida útil da ferramenta. (REBEYKA, 2016). “O gume postiço é um fenômeno mais evidente quando se usina a baixas velocidades de corte.” (FRACARO, 2017, p. 33).

2.1.2 Fresamento

Na fabricação de moldes e matrizes, o processo mais utilizado é o fresamento, pois possui uma grande versatilidade de opções e elevada produtividade em comparação com outros processos de usinagem. Contudo, por atuar em corte interrompido, a ferramenta sofre danos significativos que prejudicam sua vida útil, devido aos ciclos térmicos e mecânicos, que impactam no desgaste da ferramenta e na integridade superficial da peça. (SECCO, 2015).

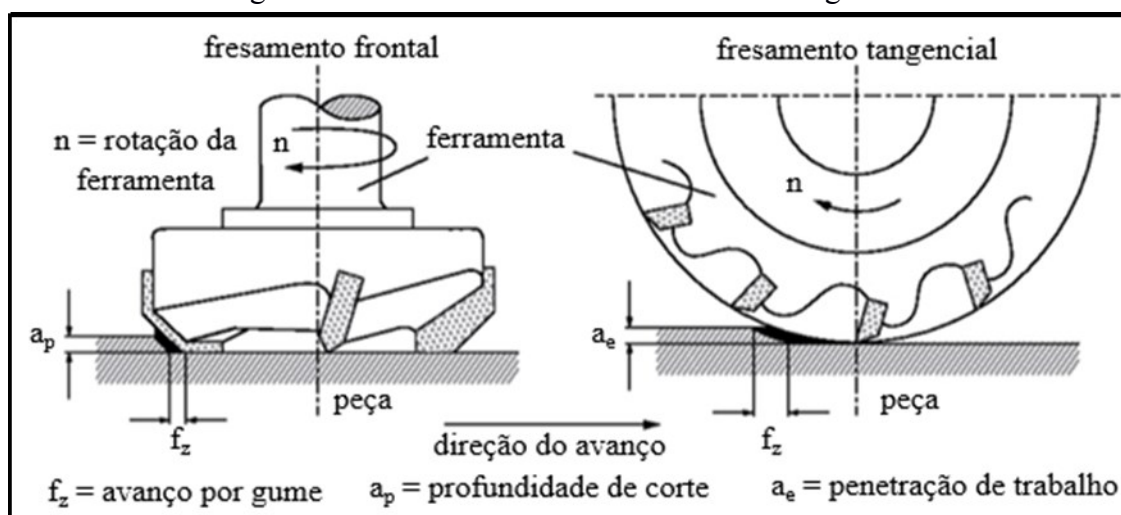
O fresamento é a operação de usinagem que utiliza ferramentas geralmente multicortantes, para gerar superfícies de diversas formas. O movimento rotativo da ferramenta retira uma quantidade pequena do material, a cada rotação, em forma de cavaco, enquanto percorre a peça para qualquer direção. (STEMMER, 2005).

2.1.2.1 Processo de fresamento

O fresamento é definido como uma tecnologia de corte que utiliza uma ferramenta de múltiplos gumes para a remoção do material. As técnicas de fresamento são definidas de acordo com a posição do eixo da ferramenta e com a denominação do tipo de ferramenta. (TSCHATSCH, 2009). Segundo Klocke (2011), o fresamento é um processo de usinagem que utiliza uma ferramenta circular com múltiplos gumes, para produzir diversas superfícies de trabalho, e a direção de corte pode ser perpendicular ou tangencial ao eixo de rotação da ferramenta.

Na Figura 3, observa-se que, no fresamento frontal, os gumes de corte da fresa estão na superfície frontal da ferramenta, e o eixo de giro é perpendicular à superfície gerada. Por outro lado, no fresamento tangencial os gumes de corte estão na superfície cilíndrica da ferramenta, e o eixo de giro é paralelo à superfície que está sendo gerada. (KÖNIG; KLOCKE, 2008).

Figura 3 – Fresamento frontal e fresamento tangencial



Fonte: Adaptada de Klocke (2011).

De modo geral, o fresamento apresenta diversas vantagens, pois a fresa pode ser construída sob as mais variadas formas, e isso confere à operação uma versatilidade em termos de geometrias possíveis a serem geradas. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Segundo Stemmer (2005), as vantagens também podem ser observadas na qualidade dos acabamentos, nas altas taxas de remoção de cavaco, na produtividade e na disponibilidade de gerar superfícies complexas.

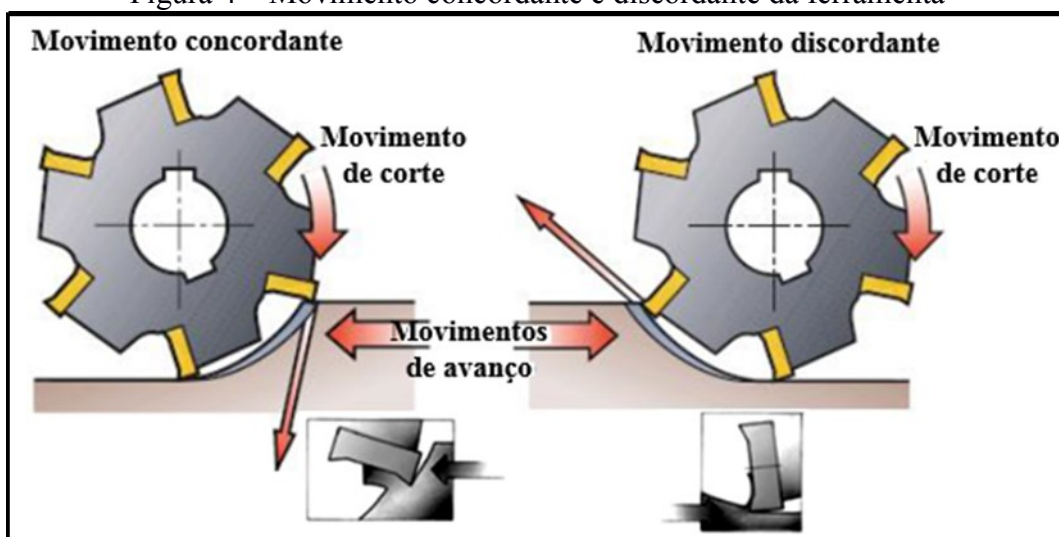
A remoção do material da peça se dará de forma intermitente, pela rotação da ferramenta em torno de seu eixo, em combinação com o movimento de avanço da peça realizado pela máquina. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; STEMMER, 2005).

2.1.2.2 Métodos de fresamento

Dependendo do sentido de rotação da ferramenta e do avanço da mesa, define-se o sentido de corte como fresagem concordante ou fresagem discordante. (STEMMER, 2005). No fresamento concordante (Figura 4), o avanço e o movimento de corte apresentam o mesmo sentido, a ferramenta inicia o corte com a espessura do cavaco na sua dimensão máxima, que vai diminuindo progressivamente, ocasionando menor atrito e, conseqüentemente, menor desgaste. (KÖNIG; KLOCKE, 2008).

Na Figura 4, observa-se que, no fresamento discordante, o avanço e o movimento de corte têm sentidos opostos, a ferramenta inicia o corte com a espessura do cavaco na sua dimensão mínima, que vai aumentando progressivamente, acarretando possíveis vibrações e diminuindo a qualidade superficial da peça usinada. (KÖNIG; KLOCKE, 2008).

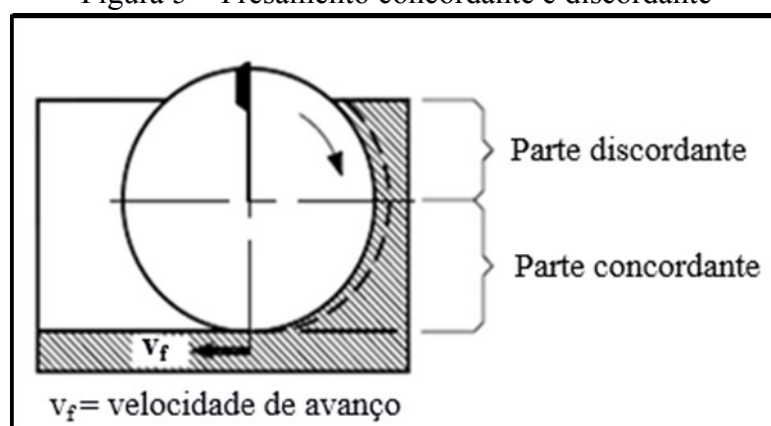
Figura 4 – Movimento concordante e discordante da ferramenta



Fonte: Adaptada de Sandvik (2012).

Na Figura 5, pode-se observar que, conforme a posição da ferramenta em relação à peça, o processo de fresamento pode apresentar uma parte do fresamento discordante e outra parte do fresamento concordante, de maneira que não é possível designar uma especificação de forma clara. (KÖNIG; KLOCKE, 2008).

Figura 5 – Fresamento concordante e discordante



Fonte: Adaptado de Klocke (2011)

No fresamento discordante, o processo de corte inicia com uma espessura de cavaco mínima e aumenta progressivamente até o seu valor máximo, criando um excessivo atrito e altas temperaturas, e esse contato é realizado por uma superfície encruada causada pelo corte do dente anterior. Esse tipo de movimento gera grandes vibrações, o que acelera a vida da ferramenta, além de prejudicar a qualidade superficial e as dimensões das peças acabadas. (TSCHATSCH, 2009; KLOCKE, 2011; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; STEMMER, 2005).

No fresamento concordante, alguns problemas evidentes no movimento discordante são resolvidos, pelo fato de a componente resultante entre o movimento de corte e o avanço sempre empurrar a peça na direção da mesa da máquina, não alterando o seu sentido. Portanto, são inúmeras as vantagens em utilizar um movimento concordante, pois apresenta menor desgaste da ferramenta, melhor qualidade superficial, menor vibração, entre outras. (TSCHATSCH, 2009; KLOCKE, 2011; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; STEMMER, 2005).

O fresamento concordante é o selecionado em operações de acabamento com ferramentas de topo esférico, devido ao menor atrito, ao menor desgaste e à melhor qualidade superficial. (NEVES, 2002). Na operação de acabamento, o objetivo é atender às tolerâncias de forma e a qualidade superficial definida previamente no projeto; assim, a estratégia da usinagem é dependente da topografia da superfície desejada. (GOMES, 2001).

2.1.2.3 Grandezas e parâmetros de corte

Para todos os processos de usinagem, assim como para o fresamento, existe uma série de grandezas e parâmetros de corte importantes a considerar. Essas variáveis constituem os movimentos, as velocidades e as grandezas do corte. (KLOCKE, 2011).

Conforme Santos e Sales (2007), no processo de usinagem os movimentos são relativos entre a peça e o gume de corte. Os movimentos dividem-se em dois grupos: os que causam e os que não causam a saída do cavaco.

Os movimentos que constituem a formação do cavaco são: movimento de corte, movimento de avanço e movimento efetivo de corte. Os movimentos que não compõem a formação do cavaco são: movimento de aproximação, movimento de ajuste, movimento de correção e movimento de recuo. (SANTOS; SALES, 2007).

As direções dos movimentos descritos acima são as direções instantâneas dos mesmo, durante o processo de usinagem. (KÖNIG; KLOCKE, 2008).

O tempo total de fabricação é o resultado da soma de todos os movimentos, sejam eles ativos ou passivos, pois descrevem quantitativamente as características de cada operação. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

König e Klocke (2008) descrevem que a velocidade de corte (v_c) e a velocidade de avanço (v_f) resultam na velocidade efetiva de corte (v_e) e são grandezas que afetam tanto o desgaste da ferramenta quanto a qualidade superficial na usinagem. A característica

importante no fresamento de topo esférico é a variação da velocidade de corte, com relação à posição do gume da ferramenta que está em contato com a peça. (VACARO, 2013).

Para König e Klocke (2008), a velocidade de corte (v_c) é a velocidade instantânea do ponto de referência do gume da ferramenta, levando em consideração o sentido e a direção de corte. Para o processo de fresamento, a velocidade de corte é calculada pela equação (1):

$$v_c = (\pi \cdot d \cdot n) / 1000 \quad (1)$$

Em que:

v_c = velocidade de corte [m/min];

d = diâmetro da ferramenta [mm]; e

n = rotação da ferramenta [rpm].

A partir da velocidade de corte e do diâmetro da ferramenta, a rotação da ferramenta pode ser calculada pela equação (2):

$$n = (1000 \cdot v_c) / (\pi \cdot d) \quad (2)$$

Conforme Stemmer (2005), no fresamento, a velocidade de avanço (v_f) é a resultante da velocidade instantânea da ferramenta, segundo a direção e o sentido de avanço pelo número de gumes da fresa. É calculada pela equação (3):

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

Em que:

v_f = velocidade de avanço [mm/min];

n = rotação da ferramenta [rpm];

f_z = avanço por gume [mm]; e

z = número de gumes da ferramenta.

Segundo Machado e Abrão *et al.* (2011), o avanço (f) é o percurso de avanço em cada volta (mm/rev) ou a distância linear percorrida pela ferramenta, durante uma rotação completa dessa ferramenta. Para o cálculo do avanço vale a relação (4):

$$f = f_z \cdot z \quad (4)$$

Em que:

f = avanço por revolução [mm/rev];

f_z = avanço por gume [mm]; e

z = número de gumes da ferramenta.

Conforme Machado *et al.* (2011) o tempo de corte representa a soma de todos os tempos ativos, ou seja, os tempos em que a ferramenta está retirando cavaco da peça. A partir da equação (5), o tempo de corte pode ser calculado:

$$t_c = l / v_f = (\pi \cdot d \cdot l) / (1000 \cdot v_c \cdot f_z \cdot z) \quad (5)$$

Em que:

t_c = tempo de corte [min]; e

l = comprimento usinado [mm].

O tempo de corte também pode ser calculado pela razão entre a área da superfície e a profundidade radial de corte. (STEMMER, 2005). Assim, obtém-se a equação (6):

$$t_c = (\pi \cdot d \cdot l) / (1000 \cdot v_c \cdot f_z \cdot z) = (\pi \cdot d \cdot A) / (1000 \cdot a_e \cdot v_c \cdot f_z \cdot z) \quad (6)$$

Em que:

A = área da superfície usinada [mm²]; e

a_e = profundidade radial de corte ou de trabalho [mm].

No fresamento com ferramentas de topo esférico, o tempo de corte é calculado a partir da equação (6), porém o valor do diâmetro da ferramenta é substituído pelo valor do diâmetro efetivo de corte. O cálculo para o diâmetro efetivo de corte varia de acordo com a estratégia de corte utilizada. Quando é utilizado o corte ascendente ou para cima, o diâmetro efetivo é calculado pela equação (7):

$$d_{ef} = d \cdot \sin[\arccos((d - 2a_p)/d) + \theta] \quad (7)$$

Em que:

d_{ef} = diâmetro efetivo de corte [mm];

a_p = profundidade axial de corte [mm]; e

θ = ângulo [rad].

Na utilização de uma estratégia de corte descendente ou para baixo, é empregada a equação (8):

$$d_{ef} = d \cdot \sin(\theta) \quad (8)$$

Com o valor do diâmetro efetivo, o tempo de corte para uma ferramenta de ponta esférica pode ser obtido a partir da equação (9):

$$t_c = (\pi \cdot d_{ef} \cdot A) / (1000 \cdot a_e \cdot v_c \cdot f_z \cdot Z) \quad (9)$$

A equação (9) constitui a função para a otimização dos processos de usinagem com ferramentas de ponta esférica, sendo utilizada como função de avaliação.

2.2 USINAGEM DE SUPERFÍCIES COMPLEXAS

O fresamento com ferramentas de ponta esférica é um dos processos de fabricação mais empregados para produtos de superfícies complexas, nas indústrias de moldes e aeroespaciais. (JUNG; YANG; LEE, 2005). A geometria de ponta esférica permite uma aproximação mais uniforme do produto final, pois a ferramenta se movimenta tangenciando a superfície usinada e pode ser utilizada com inclinação entre 0 e 90°, em relação ao eixo da ferramenta. (SALAMI; SADEGUI; MOTAKEF, 2006).

A usinagem de superfícies complexas na indústria moderna traz a necessidade da busca constante pelo conhecimento de questões, tais como: os efeitos da força de corte, a deflexão da ferramenta de corte e os erros geométricos das peças fabricadas. Toda essa busca concentra-se em um único objetivo, que é determinar as velocidades de usinagem de baixo custo (SCANDIFFIO; DINIZ; SOUZA, 2016).

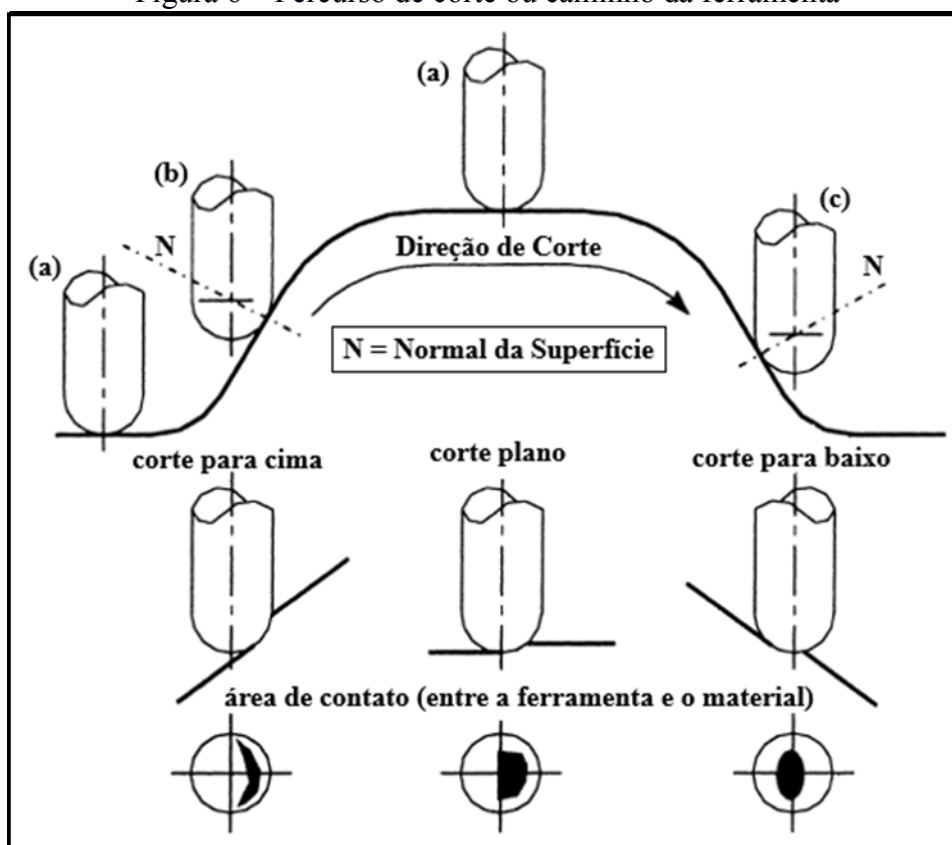
2.2.1 Ferramenta de topo esférica

Durante o fresamento de superfícies complexas, o contato da ferramenta de ponta esférica muda constantemente e, quando a ponta ou o centro da ferramenta estão envolvidos no processo, com velocidade de corte igual a zero, o cavaco é arrancado, causando uma

deformação elástica e plástica, sem efetuar o corte por cisalhamento ou a formação do cavaco. Em tais casos, pode haver o aumento da rugosidade e o desgaste prematuro da ferramenta. (SCANDIFFIO; DINIZ; SOUZA, 2017).

Em operações de fresamento com máquinas três eixos, objeto deste trabalho, a inclinação entre 0 e 90° é definida entre o eixo da ferramenta e a superfície normal a ser usinada. Na Figura 6, é possível observar a variação de posição da ferramenta nos três tipos de corte: (a) corte para cima; (b) corte de plano; (c) e corte para baixo. A Figura 6 também nos demonstra que a velocidade de corte não é constante ao longo do caminho da ferramenta, e sua área de contato também varia em relação ao tipo de corte. (BAPTISTA; SIMÕES, 1999).

Figura 6 – Percurso de corte ou caminho da ferramenta



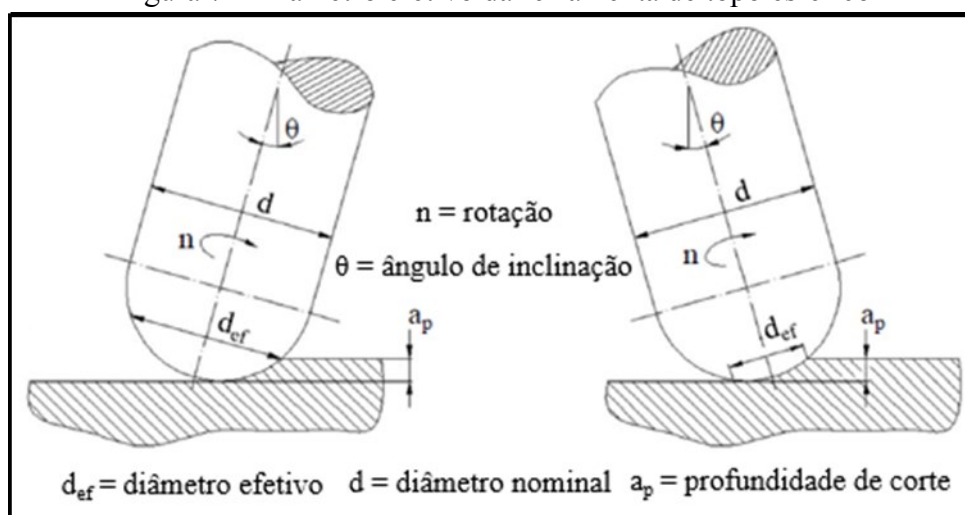
Fonte: Adaptada de Baptista e Simões (1999).

O fresamento de topo possui benefícios na execução de superfícies de forma livre, bem como rasgos e cortes de diversos tipos e tamanhos. Existem ferramentas de corte direito e corte esquerdo, como também hélice direita e hélice esquerda, e ferramentas de gumes retos. (KÖNIG; KLOCKE, 2008).

A ferramenta de ponta esférica é utilizada geralmente na operação de acabamento, em que a forma da peça torna-se definitiva. (VAKONDIOS *et al.*, 2012). Nas operações de acabamento, a rugosidade do produto final, assim como a precisão dimensional são critérios importantes. Logo, essas operações comprometem grande parcela dos tempos de usinagem, devido a baixas profundidades de corte e avanços utilizados. (TOH, 2005).

Conforme Sadílek *et al.* (2011), na utilização de uma ferramenta topo esférico, deve-se observar com atenção as importantes particularidades, como a variação da velocidade de corte, conforme o ponto de contato do gume de corte com a peça e o diâmetro efetivo de corte. O diâmetro efetivo de corte depende da profundidade de corte (a_p) e do ângulo de inclinação (θ) da ferramenta. Este é o diâmetro máximo da região de contato da fresa com o material a ser usinado, conforme ilustra a Figura 7.

Figura 7 – Diâmetro efetivo da ferramenta de topo esférico

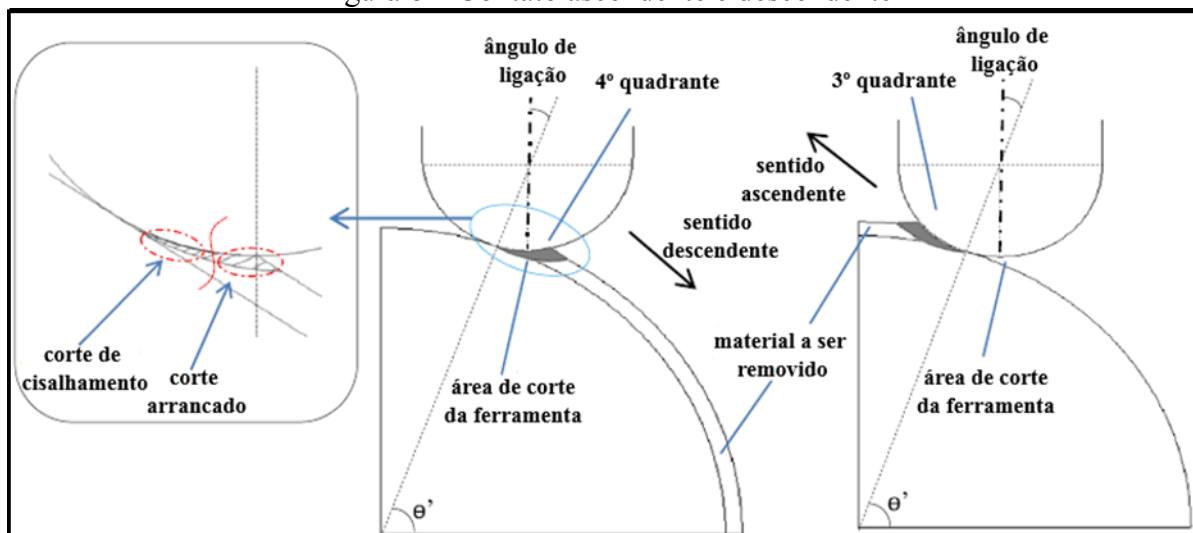


Fonte: Adaptada de Sadílek *et al.* (2011).

Segundo Souza *et al.* (2014), a determinação da velocidade de corte considera o diâmetro efetivo, medido na região de contato do gume com a superfície da peça. A curvatura da superfície é constantemente alterada, com isso o diâmetro efetivo da ferramenta alterna de zero ao seu valor nominal e muda seu quadrante de contato influenciando a força de usinagem.

Na usinagem de formas côncavas ou convexas, a melhor direção de corte é a ascendente (ou para cima). Nesse caso, a redução do diâmetro efetivo da ferramenta é menor do que na direção descendente (ou para baixo), reduzindo o contato do gume de corte com a superfície usinada, evitando inconvenientes, como observa-se na Figura 8. (SCANDIFFIO; DINIZ; SOUZA, 2016).

Figura 8 – Contato ascendente e descendente



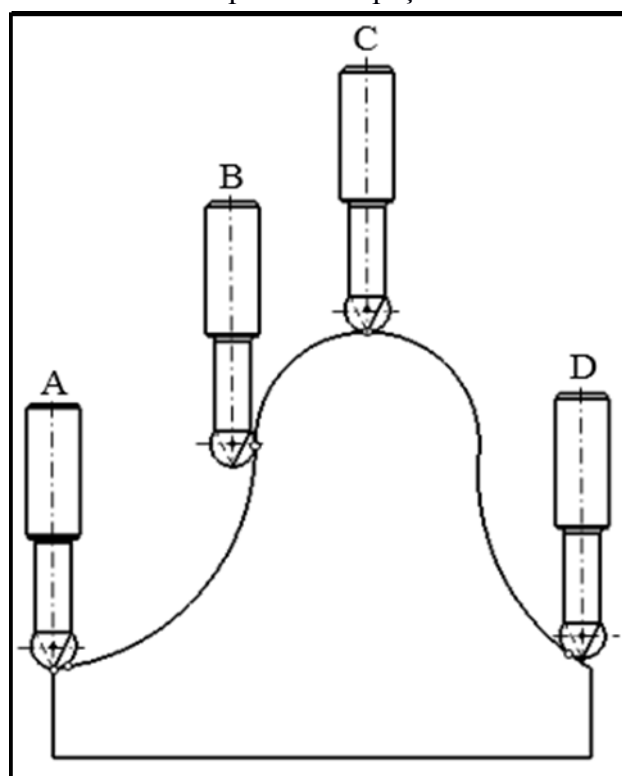
Fonte: Adaptada de Scandiffio, Diniz e Souza (2016).

A fim de evitar o fenômeno citado acima, também conhecido como efeito de aragem, que acontece frequentemente nas microusinagens, o raio do gume da ferramenta de corte não pode ser menor do que a profundidade de corte, levando em consideração a espessura mínima do cavaco. (SOUZA *et al.*, 2014).

2.2.1.1 Características do processo e parâmetros de usinagem

Na usinagem de moldes e matrizes, ocorrem características peculiares na operação de acabamento, quando é realizada por uma ferramenta de ponta esférica. Conforme a posição de contato da ferramenta com a peça, a forma do cavaco se modifica constantemente, devido à variação do sentido de avanço. (SOUZA, 2004). Pode-se observar, na Figura 9, o movimento hipotético da ferramenta pela peça:

Figura 9 – Pontos de contato com a superfície da peça de uma ferramenta de ponta esférica



Fonte: Elaboração do autor (2018).

Na posição A, a ferramenta tem longo contato, incluindo o centro com velocidade de corte igual a zero. No sentido de A para B, a direção da usinagem é ascendente ou para cima e, no ponto B, a ferramenta utiliza seu diâmetro nominal como diâmetro efetivo, atingindo sua maior velocidade de corte. No sentido de B para C, também a direção da usinagem é ascendente ou para cima e, no ponto C, a posição de contato é o centro da ferramenta com a velocidade de corte igual a zero. Na direção de (C) para (D), o sentido inverte sendo agora descendente ou para baixo. Em superfícies complexas, o contato do diâmetro nominal na peça ocorre em poucas ocasiões. (SOUZA, 2004).

Para a determinação dos parâmetros de usinagem de uma ferramenta com ponta esférica, em operações de acabamento, deve-se ter o conhecimento da dependência das características geométricas ou das condições de contato da ferramenta com a peça, de acordo com Gomes (2003), que afirma ser necessário o conhecimento das seguintes informações:

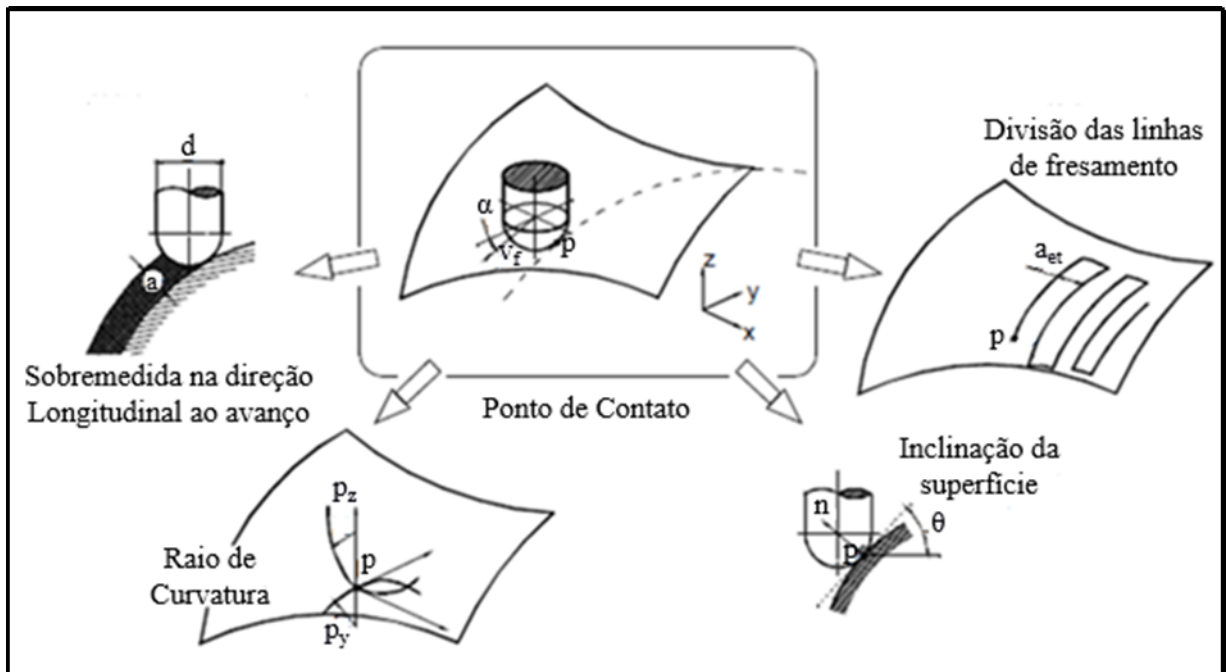
- a) o valor da sobremetal deixado pela usinagem anterior, o diâmetro da ferramenta de corte (d) e a profundidade de corte radial normal à superfície (a);
- b) o caminho da ferramenta em função da profundidade de corte radial na direção tangencial à superfície (a_{et}), o ângulo de inclinação da ferramenta em função da

superfície (α), e a direção do movimento de corte em relação à superfície (corte concordante/discordante); e

- c) as características do ponto de contato (P), como o raio de curvatura da superfície na direção do avanço (ρ_v), o incremento lateral (ρ_s) e o ângulo da rampa da superfície (θ).

A Figura 10 apresenta as características geométricas no fresamento em um ponto (P):

Figura 10 – Condições de contato no acabamento



Fonte: Adaptada de Gomes (2003).

Segundo Scandiffio, Diniz e Souza (2017), a usinagem com ferramentas de ponta esférica, em superfícies de forma complexa, ainda requer a determinação empírica dos parâmetros de usinagem, o que pode limitar a eficiência do processo, reduzir a vida útil da ferramenta e afetar consideravelmente a qualidade superficial da peça. Esse tipo de usinagem difere consideravelmente do fresamento convencional e envolve fenômenos que ainda não são totalmente compreendidos.

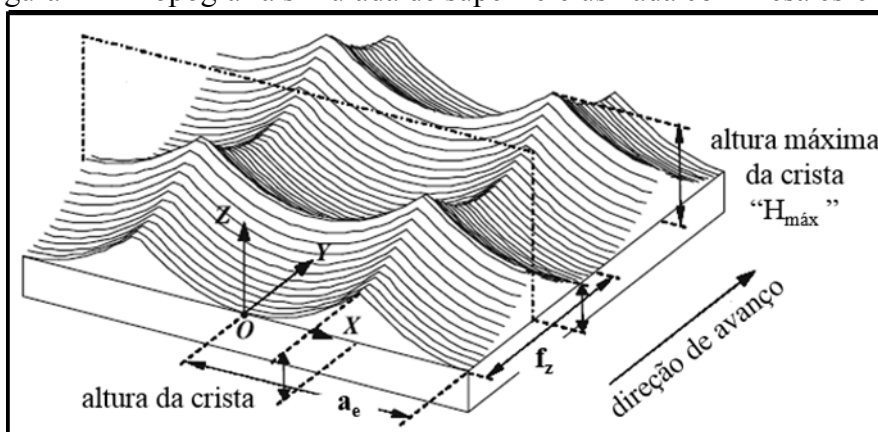
2.2.2 Topografia da superfície usinada

As marcas deixadas pela ferramenta de ponta esférica na usinagem apresentam características onduladas e dependem basicamente dos parâmetros de corte utilizados. O

incremento lateral (a_e) e o avanço por gume (f_z) são parâmetros que possuem uma parcela significativa na rugosidade da superfície usinada. (JUNG; YANG; LEE, 2005).

A Figura 11 ilustra um exemplo da topografia de uma superfície simulada pelo método de fresamento convencional, em que se podem observar as características dos sucessivos passes provocados pela passagem do gume de corte em relação à rotação parcial da ferramenta de ponta esférica. Essas marcas são originadas pelo movimento combinado de translação e de rotação da ferramenta, em relação à superfície da peça. (JUNG; YANG; LEE, 2005).

Figura 11 – Topografia simulada de superfície usinada com fresa esférica

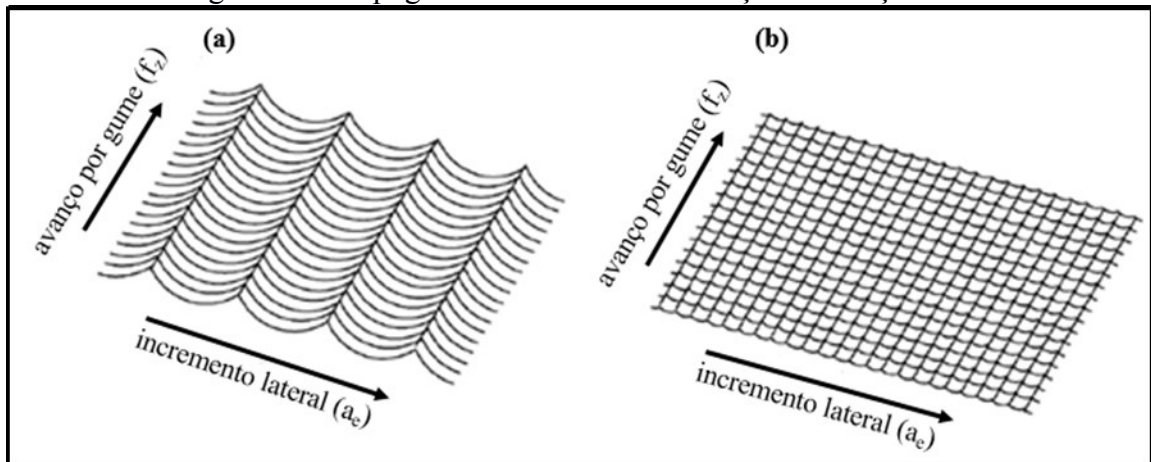


Fonte: Adaptada de Jung, Yang e Lee (2005).

Na Figura 12 podem ser observados os picos remanescentes do corte, previsto pelo método de fresamento convencional. A máxima rugosidade ($H_{m\acute{a}x}$) é simplesmente calculada pela soma da altura da crista e das marcas do corte, levando em consideração o incremento lateral (a_e) e o avanço por gume (f_z). (JUNG; YANG; LEE, 2005).

A influência na qualidade superficial pode ser observada pela relação entre o incremento lateral (a_e) e o avanço por gume (f_z). Essa relação a_e / f_z altera efetivamente a rugosidade. (CHEN; HUANG; CHEN, 2005). Na Figura 12 pode-se ver a ilustração da topografia da superfície simulada por uma ferramenta de ponta esférica. À esquerda (a), visualiza-se a topografia originada quando o parâmetro de incremento lateral (a_e) é maior que o avanço por gume (f_z), portanto ($a_e \neq f_z$) e, à direita (b), observa-se a topografia originada quando os valores do incremento lateral (a_e) e do avanço por gume (f_z) são iguais entre si ($a_e = f_z$), sendo uma topografia mais uniforme nas duas direções. (CHEN; HUANG; CHEN, 2005).

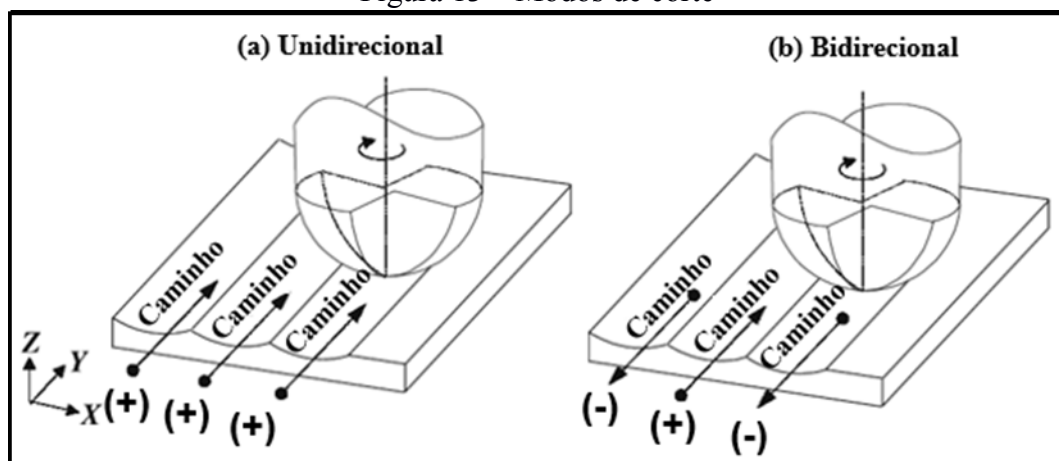
Figura 12 – Topografia simulada com variação de relação a_e/f_z



Fonte: Adaptada de Chen, Huang e Chen (2005).

No método de fresamento convencional, estima-se que a textura e a rugosidade superficial não variam segundo os modos de corte, embora os resultados reais de usinagem sejam geralmente diferentes um do outro. Na Figura 13, pode-se observar os dois tipos de modo de corte: o modo unidirecional e o modo bidirecional para a usinagem de uma superfície plana com ferramentas de ponta esférica. (JUNG; YANG; LEE, 2005).

Figura 13 – Modos de corte



Fonte: Adaptada de Jung, Yang e Lee (2005).

A topologia final de uma superfície usinada é gerada pela sobreposição das formas usinadas por um único caminho de corte; portanto, a rugosidade e a textura são formadas pela combinação das linhas características na seção de corte máximo. Essas seções de máximo corte de caminhos adjacentes não coincidem entre si. (JUNG; YANG; LEE, 2005).

A escolha da estratégia correta para fresamento de acabamento com ferramentas de ponta esférica, em programas de Comando Numérico Computadorizado (CNC) pode trazer resultados significativos, sejam eles qualitativos ou econômicos. (NICOLA, 2008).

2.3 USINABILIDADE

A usinabilidade pode ser definida como uma grandeza tecnológica de um conjunto de propriedades de usinagem, tais como a vida da ferramenta, a força de usinagem, a qualidade superficial, as características do cavaco, a temperatura de corte e a produtividade. Portanto, a usinabilidade não é uma grandeza específica como a resistência à tração, o alongamento ou o módulo de elasticidade. (FERRARESI, 1970). Segundo Klocke (2011), a usinabilidade é uma propriedade relativa que depende da interação do processo de fabricação com as características do material da peça.

Portanto, para Baptista (2002), a usinabilidade não pode ser tratada como uma propriedade intrínseca do material, mas como um resultado das condições de usinagem, que são estabelecidas para cada tipo de material e ferramenta. As vantagens econômicas da escolha certa do material a ser usinado, assim como as ferramentas, os fluidos lubrificantes, o equipamento e as condições de usinagem, são significativas.

Como já foi mencionado, a usinabilidade não é uma propriedade intrínseca do material, mas manifesta seu comportamento durante a usinagem. Portanto, para que seja tratada como uma análise comparativa, deve-se observar quais parâmetros são mais influentes, pois, segundo um determinado critério, o material pode apresentar usinabilidade melhor ou pior em relação a outro. (SANTOS; SALES, 2007).

Há cinco grupos de fatores que podem efetivamente influir na usinabilidade: variáveis dependentes da máquina, variáveis dependentes da ferramenta, variáveis dependentes da peça, variáveis dependentes do fluido lubrificante e variáveis dependentes ao processo. (STEMMER, 2005). Para a avaliação do grau de usinabilidade, são considerados quatro critérios utilizados isoladamente ou em conjunto, que são: a vida da ferramenta, a força de corte, a qualidade superficial da peça e a formação do cavaco. (KÖNIG; KLOCKE, 2008).

2.3.1 Desgaste no fresamento

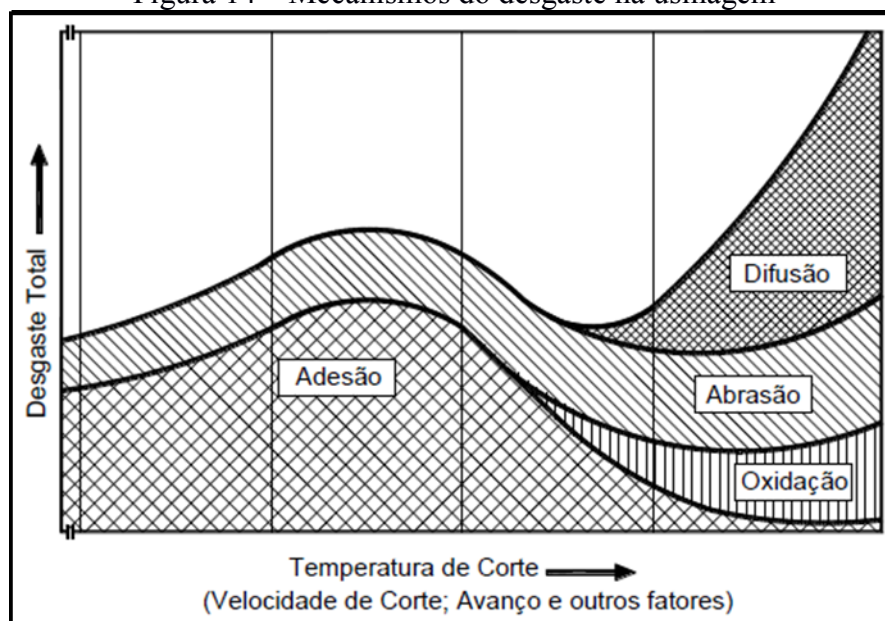
Durante a usinagem, a área do gume é exposta a deformações e atrito, levando ao desgaste. Os materiais das ferramentas estão sujeitos a forças de carregamento extremamente complexas, de características compressivas, bem como a altas velocidades de corte e a altas temperaturas. Na sua aplicação, as ferramentas chegam ao final de sua vida útil devido ao desgaste apresentado em suas faces e flancos. O desgaste acontece de forma progressiva,

devido à perda de material pela ação de esforços mecânicos, pelo contato e pelos movimentos relativos de corpos sólidos, líquidos ou gasosos. (KLOCKE, 2011).

2.3.1.1 Mecanismos e tipos de desgaste

Diferentes mecanismos de desgaste atuam simultaneamente durante o processo de usinagem. Dependendo do material que está sendo usinado, do material da ferramenta e das condições de corte, pode-se determinar o desgaste predominante em uma operação de usinagem. (KISHAWY *et al.*, 2005). Na Figura 14, observam-se os principais mecanismos de adesão, abrasão, difusão e a oxidação, em função da temperatura ou de qualquer outro parâmetro que influencie o desgaste. O parâmetro mais influente no desgaste das ferramentas é a velocidade de corte. (MACHADO *et al.*, 2011).

Figura 14 – Mecanismos do desgaste na usinagem



Fonte: Adaptada de Machado *et al.*(2011).

O desgaste do gume ocorre devido às solicitações mecânicas e térmicas excessivas que ocasionam microquebras, fissuras transversais e longitudinais, bem como deformações plásticas. (KÖNIG; KLOCKE, 2008).

A abrasão é a causa predominante de desgaste da ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013) e é a remoção de partículas da ferramenta que se desprendem pelo atrito gerado pelo cavaco, criando marcas ou ranhuras pelo movimento

deslizante, muitas vezes também conhecido por “desgaste abrasivo por sulcamento” ou “desgaste abrasivo”, (KLOCKE, 2011).

Entre as grandezas de desgaste a serem medidas, pode-se destacar o valor médio do desgaste na superfície de folga, que é a largura do desgaste de flanco (VB) e a largura máxima de desgaste de flanco (VB_{máx}). A Figura 15 ilustra os desgastes na região do flanco, pois esses tipos de desgastes modificam a forma do gume e, conseqüentemente, podem causar alterações dimensionais, afetar as tolerâncias e prejudicar a qualidade superficial do produto final. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; KÖNIG; KLOCKE, 2008; KLOCKE, 2011).

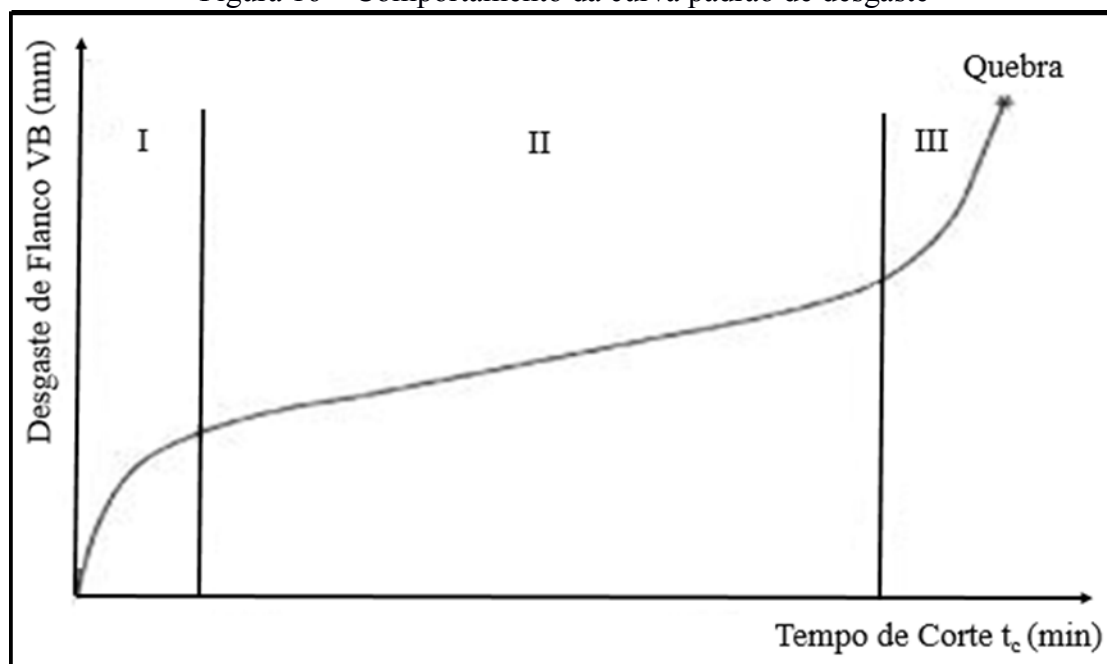


Fonte: Adaptada de Klocke (2011).

Devido às características, o processo de fresamento tende a aumentar o desgaste das ferramentas. O fresamento é um dos processos de usinagem que caracteriza-se pela variação da temperatura, devido ao corte interrompido. Isso resulta em tensões que podem causar trincas térmicas. A variação de esforços mecânicos pode causar trincas devido à fadiga. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Em condições normais de trabalho, as ferramentas tendem a seguir um comportamento de desgaste padrão, como o exibido na Figura 16. A evolução do desgaste apresenta três estágios: no estágio I, ocorre um desgaste acelerado devido ao ajuste do gume; no estágio II, apresenta uma taxa de desgaste constante ao longo do tempo, pois a ferramenta já se encontra totalmente adequada ao processo; e no estágio III, que demonstra um aumento acentuado da taxa de desgaste em um curto espaço, de tempo devido à temperatura e às tensões envolvidas, provoca, eventualmente, o colapso da ferramenta. (MACHADO *et al.*, 2011).

Figura 16 – Comportamento da curva padrão de desgaste



Fonte: Adaptada de Machado *et al.* (2011).

2.3.1.2 Vida da ferramenta e critérios de avaliação

“Denomina-se vida de uma ferramenta o tempo que a mesma trabalha efetivamente (deduzindo os tempos passivos), até perder a sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido.” (FERRARESI, 1970, p. 424). Para determinar o tempo de troca da ferramenta de corte, devem ser observados os componentes da força de usinagem, a temperatura de corte, a vibração do sistema e a emissão acústica. Esses componentes possuem uma relação muito forte com a curva padrão de desgaste. (MACHADO *et al.*, 2011).

Na operação de fresamento, por possuir características de usinagem com corte interrompido, as ferramentas frequentemente são substituídas devido a trincas, a lascamentos ou a quebras, causadas por choques mecânicos ou por choque de origem térmica. (MACHADO, ABRÃO, *et al.*, 2011). Dentre os critérios de avaliação do fim de vida da ferramenta de corte, estão os limites de desgaste, o percurso de corte, o número de peças produzidas, a rugosidade e o tempo de usinagem. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; MACHADO *et al.*, 2011).

2.3.2 Qualidade superficial

A escolha do processo de fabricação para uma determinada peça ou componente é baseada no custo, no tempo e nas tolerâncias exigidas. O acabamento superficial é geralmente estabelecido em dois critérios: a precisão dimensional e a rugosidade da superfície. No entanto, o desempenho da superfície está se tornando cada vez mais relevante, pois as irregularidades deixadas pela ferramenta de corte propagam trincas, podendo ocasionar o colapso da peça. (DAVIM, 2008).

O nível da qualidade superficial de uma determinada peça ou componente depende de quanto crítica é sua aplicação, pois quanto maior forem as exigências, maior será o custo de fabricação. (SANTOS; SALES, 2007).

A análise do acabamento, seja ela pela forma qualitativa considerando-se a textura ou pela forma quantitativa por intermédio da rugosidade, torna-se a mais utilizada por ser avaliada de maneira mais fácil e por normalmente ser monitorada nos componentes usinados. (VACARO, 2013).

2.4 DETERMINAÇÃO DAS SUPERFÍCIES

As propriedades superficiais têm extrema importância na qualidade das peças usinadas, pois o funcionamento do componente depende da precisão dimensional, do coeficiente de atrito, dos critérios de aparência e competitividade, com relação ao custo e aos desgastes envolvidos. (VAKONDIOS *et al.*, 2012). Para a determinação das superfícies, geralmente são utilizadas análises quantitativas e qualitativas. Por exemplo, para analisar quantitativamente a qualidade superficial, utiliza-se a medição da rugosidade, no entanto, qualitativamente utiliza-se a textura da superfície. (VACARO, 2013).

2.4.1 Rugosidade

A consequência da ação inerente do processo de corte, que resulta em irregularidades finas ou em erros microgeométricos em uma superfície, denomina-se rugosidade. Essa rugosidade pode ser utilizada como parâmetro para o controle do processo de usinagem. (MACHADO *et al.*, 2011). Normalmente, apenas os parâmetros de rugosidade ao longo de um único comprimento medido (parâmetros unidimensionais) são suficientes para caracterizar a superfície, a fim de simplificar o processo de medição. (KLOCKE, 2011).

As irregularidades ou os erros microgeométricos são gerados devido às marcas do avanço da ferramenta de corte e aos fragmentos do gume postiço que são compactados na peça, durante a formação do cavaco, além de serem dependentes de alguns parâmetros, como as propriedades do material usinado, a ferramenta de corte, a máquina, entre outros. (STEMMER, 2005; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

O aumento da velocidade de corte ou do ângulo da saída da ferramenta pode melhorar consideravelmente o acabamento, devido à redução das dimensões do gume postiço; além disso, a redução no avanço que, conseqüentemente, diminui a altura das cristas, também contribui para a qualidade superficial. (STEMMER, 2005; MACHADO *et al.*, 2011).

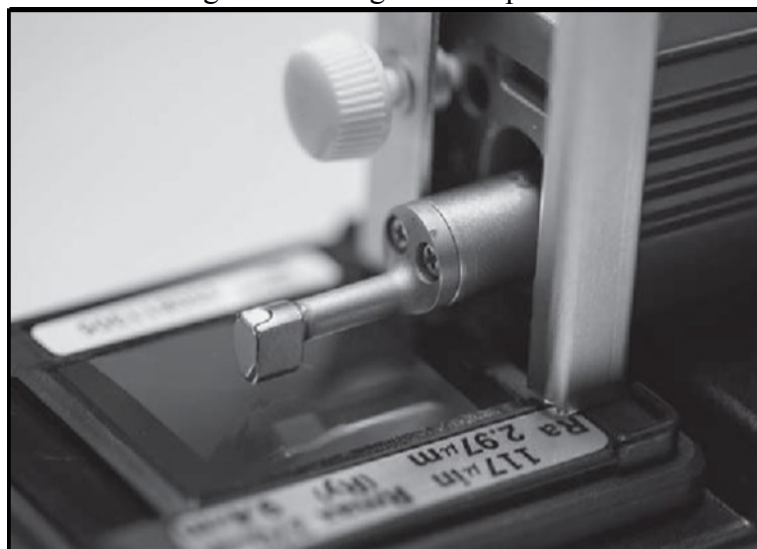
A função da peça ou componente está intimamente atrelada à sua qualidade superficial, assim como a qualidade superficial está relacionada com as características do processo de fabricação. Portanto, a peça ou o componente devem ser fabricados apresentando um desempenho, no que diz respeito à operação dentro de padrões de qualidade e de aparência, definidos previamente no projeto. (SANTOS; SALES, 2007).

Dentre os vários parâmetros que são utilizados para quantificar a rugosidade de uma superfície usinada, a rugosidade média (R_a) é a mais utilizada pela indústria (MACHADO *et al.*, 2011), mas também podem ser destacados o (R_z) e o (R_y ou $R_{máx}$). (KÖNIG; KLOCKE, 2008).

2.4.1.1 Avaliação da rugosidade

Para a medição da rugosidade, é empregado um aparelho chamado rugosímetro, e essa medição pode ser feita com ou sem contato com a peça, porém a medição com contato com a peça é a mais utilizada devido à sua facilidade, simplicidade e ao menor custo. (MACHADO *et al.*, 2011). A Figura 17 ilustra um rugosímetro portátil que utiliza um apalpador com uma ponta de diamante, que percorre a superfície da peça a ser medida, a fim de demonstrar a topografia da região. Quanto menor o raio da ponta de diamante do apalpador, mais fidedigna será a representação do perfil. (SANTOS; SALES, 2007; MACHADO *et al.*, 2011).

Figura 17 – Rugosímetro portátil



Fonte: Rebeyka (2016)

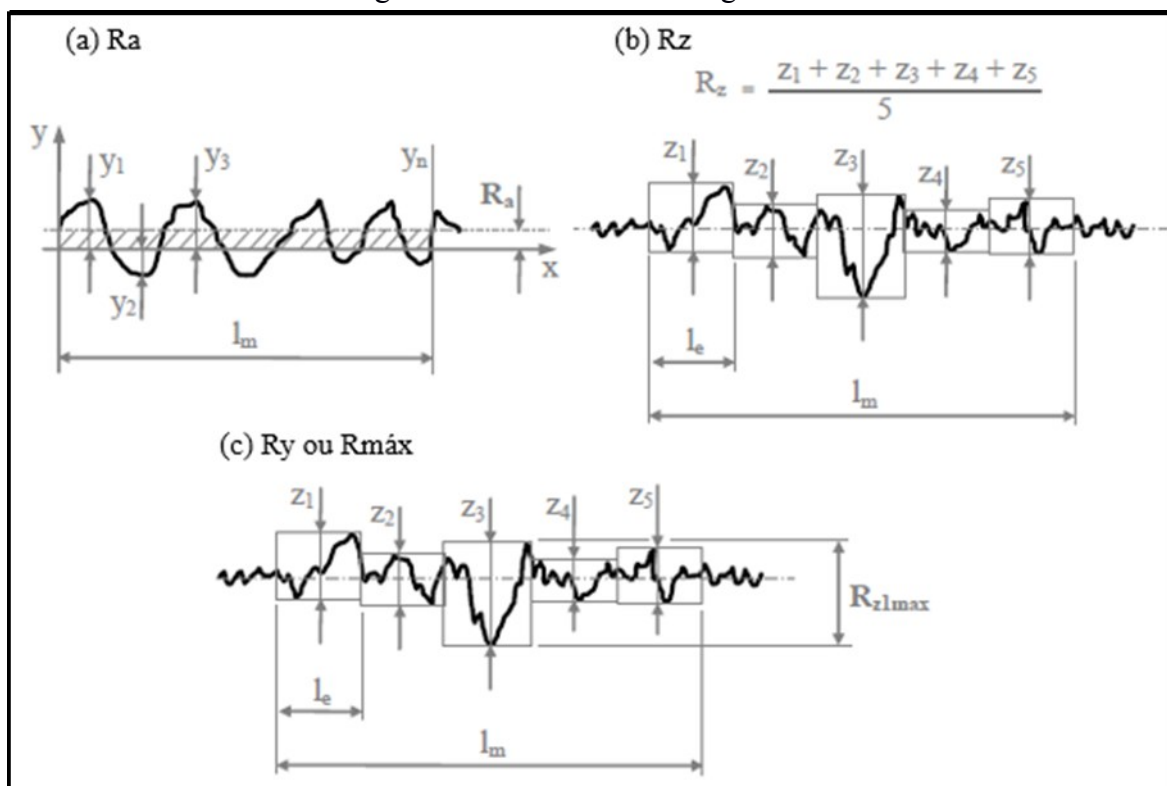
A medição da rugosidade apresenta algumas definições fundamentais que devem ser contextualizadas, como: o comprimento de avaliação, que é a soma dos comprimentos de amostragem, e o comprimento de amostragem, que corresponde a cada trecho utilizado no cálculo dos parâmetros; a linha de centro, que é uma linha média imaginária e que corta a superfície, deixando os picos acima e os vales abaixo para a medição dos parâmetros; e o *Cut-off*, que representa os espaçamentos entre as irregularidades que farão parte do cálculo dos parâmetros. (SANTOS; SALES, 2007).

Segundo Ost (2016), no critério da linha média, os sistemas de medição de rugosidade podem ser agrupados em três parâmetros: a rugosidade (R_a), (R_z) e (R_y ou $R_{máx}$). Na Figura 18, pode-se observar, de forma mais detalhada, os três parâmetros dos sistemas de medição de rugosidade, sendo que:

- a) R_a é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas, no comprimento de amostragem (l_e), e esse é o parâmetro mais utilizado; contudo diferentes superfícies podem apresentar o mesmo valor de rugosidade (MACHADO *et al.*, 2011; SANTOS; SALES, 2007);
- b) R_z é a média aritmética dos cinco valores máximos encontrados em cada comprimento de amostragem (l_e) (KÖNIG; KLOCKE, 2008), sendo a soma da maior altura e da maior profundidade no comprimento de amostragem (l_e) (MACHADO *et al.*, 2011); e

- c) R_y ou $R_{m\acute{a}x}$ é definida como a soma da maior altura e da maior profundidade no comprimento de avaliação (l_m), sendo a altura máxima do perfil. (KÖNIG; KLOCKE, 2008; MACHADO *et al.*, 2011).

Figura 18 – Parâmetros de rugosidade



Fonte: Adaptada de ISO 4287 (1997).

Existem outros parâmetros de rugosidade que podem ser destacados como o parâmetro R_q , que é a média quadrática que, pela elevação ao quadrado, acentua o efeito das irregularidades e dos parâmetros que especificam a medida do maior pico situado acima de linha média R_p e a medida do vale mais profundo, situada abaixo da linha média R_m . (COSTA, 2018).

2.4.2 Textura

O processo de fresamento produz, na superfície do material, um padrão regular e repetitivo com uma direção claramente visível que são formadas pelas linhas e também conhecidas como cristas ou sulcos, deixadas pelo gume da ferramenta na usinagem. O conhecimento de uma recomendada estratégia de usinagem pode ser de grande valor na fase de definição do processo. (NICOLA; MISSELL; ZEILMANN, 2010).

Conforme a norma DIN 4761: 1978, a superfície pode ser entendida pela divisão de duas partes na estrutura do material usinado, sendo uma delas analisada pelos efeitos externos, relacionando-se ao processo de acabamento, em que aplica-se o estudo da textura. O conceito de textura pode ser definido como um conjunto de características observadas a olho nu na superfície do material.

Os efeitos internos do material que afetam a integridade superficial é a outra parte do estudo, que diz respeito às alterações subsuperficiais. A integridade do material engloba fatores mecânicos, como exemplo, a microdureza, as deformações plásticas e tensões residuais. Também pode compreender fatores metalúrgicos, como a recristalização e as transformações metalúrgicas subsuperficiais, em função do processo de usinagem. (MACHADO *et al.*, 2011).

Na usinagem de superfícies complexas com ferramentas de ponta esférica, a inclinação do eixo axial da ferramenta, em relação à superfície que está sendo usinada, torna-se relevante devido à mudança do gume de corte com a peça, implicando diretamente na textura da superfície. A utilização da ponta da ferramenta para a remoção do material, em que a velocidade de corte é igual a zero, a qualidade superficial tende a ser ruim. (VACARO, 2013).

A análise conjunta dos dados quantitativos, obtidos pela medição da rugosidade e a avaliação qualitativa do fator de textura, permite uma definição completa dos elementos que influenciam na qualidade superficial. Esses dados servem para que sejam avaliadas melhorias no processo de usinagem, a fim de identificar e corrigir possíveis problemas para atender às especificações de cada componente. (VACARO, 2013).

2.4.3 Microscopia óptica

A busca por maior durabilidade dos componentes fabricados, principalmente com relação ao material, faz com que o interesse pela caracterização de uma superfície torne-se importante para uma melhor avaliação de suas propriedades. (MACEDO; GOMES; SOUZA, 2015).

A microscopia óptica é uma técnica empregada para a caracterização de uma superfície, em que o microscópio ótico torna-se uma extensão natural da observação a olho nu. Esta técnica pode ser utilizada em diversas áreas e se estende para a observação sobre as estruturas dos aços e ferros fundidos. (MACEDO; GOMES; SOUZA, 2015).

O microscópio óptico é um instrumento que serve para ampliar e observar pequenas estruturas ou superfícies. Ele faz uso da luz e de um sistema de lentes de vidro, que permitem a observação com aumento de algumas dezenas de vezes até o máximo de 2.000 vezes. O número de vezes que a imagem é aumentada, com relação ao objeto real, chama-se ampliação e depende do poder de resolução ou da capacidade que as lentes possuem para discriminar objetos muito próximos. (MOREIRA, 2013).

A microscopia óptica é geralmente utilizada para a visualização de superfícies de uma forma qualitativa; porém, a superfície deve ser preparada de forma criteriosa, para que possa revelar as condições topográficas da região. Ainda não são possíveis de serem detectados pequenos detalhes estruturais, limitando-se apenas à análise de superfícies com topografias formadas por picos e vales. (NICOLA, 2008).

Devido ao processo do fresamento apresentar marcas de sulcos ocasionadas pela ferramenta de corte, objeto de estudo deste trabalho, é necessária a utilização desse método, a fim de analisar as imagens de pontos específicos da superfície usinada qualitativamente.

3 METODOLOGIA

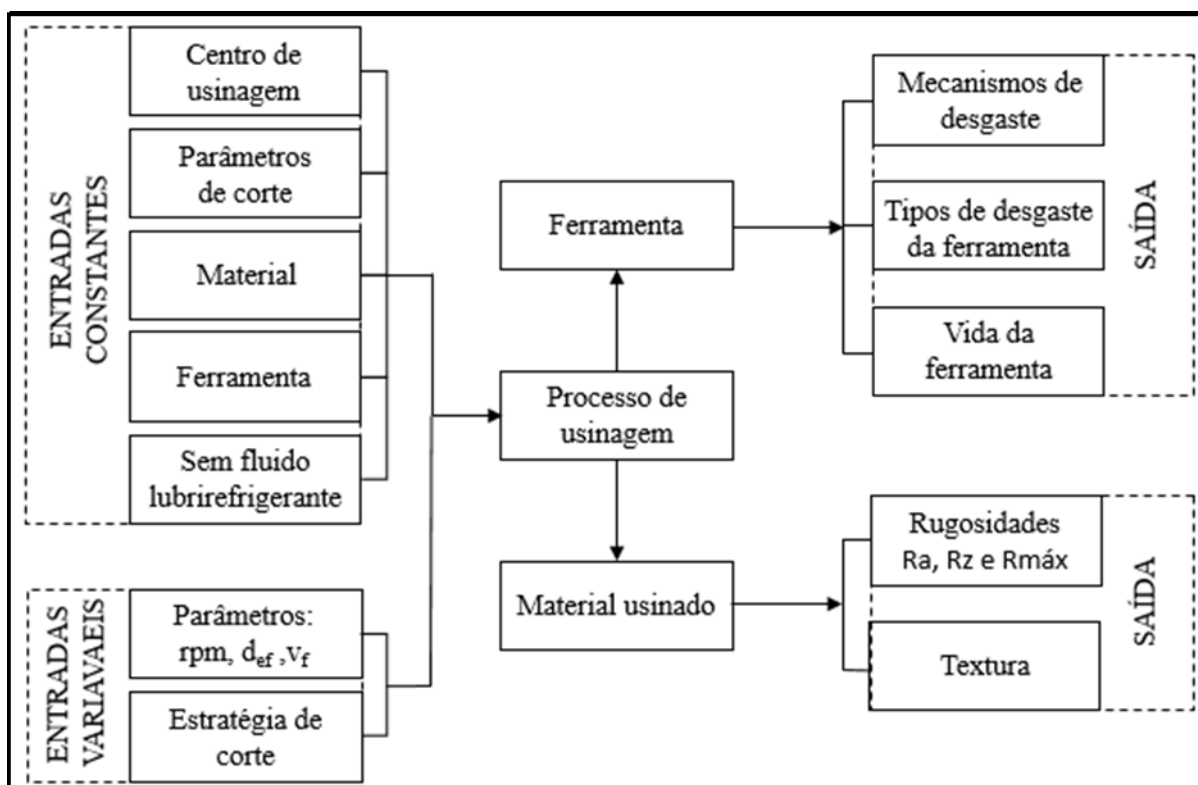
Este capítulo aborda os procedimentos experimentais, o planejamento e a definição dos equipamentos para o desenvolvimento do trabalho, incluindo a ferramenta de corte, o material das amostras e a máquina de usinagem. Delinearam-se também as variáveis de entrada e saída do processo, assim como as estratégias e os parâmetros de corte propostos.

3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Com a finalidade de simular as condições reais na fabricação de moldes e matrizes, na operação de acabamento, no processo de fresamento com ferramentas de ponta esférica, definiu-se uma geometria com condições controladas para o desenvolvimento do trabalho proposto.

No fluxograma do processo experimental (Figura 19), apresentam-se as entradas constantes e as variáveis que fazem parte de processo de usinagem. Mediante a coleta de dados de saída, será analisado o desgaste dos insertos e, ainda, no material usinado, a qualidade superficial do corpo de prova, considerando-se a rugosidade e a textura.

Figura 19 – Fluxograma do processo experimental



Fonte: Elaboração do autor (2018).

Para situar as condições de preparação e servir como base para a realização dos ensaios, todas as variáveis definidas foram detalhadas quanto às suas especificações, como parte do processamento.

Ao propor os objetivos deste trabalho, pôde-se contar com a contribuição dos autores Toh (2005), Nicola (2008) e Vacaro (2013) em suas pesquisas. Diferentemente da superfície utilizada pelos autores citados, este trabalho apresenta uma superfície em raio, que permite a análise da variação da velocidade de corte, mediante a utilização do diâmetro efetivo da ferramenta para o cálculo da velocidade rotacional. A utilização do diâmetro efetivo da ferramenta faz com que a velocidade rotacional varie em cada ponto de contato, assim como a velocidade de avanço, alterando a qualidade superficial e o desgaste do inserto.

3.2 ENTRADAS FIXAS DO PROCESSO

Nos tópicos seguintes, abordam-se as entradas que se mantiveram constantes no processo, sendo: material usinado, máquina de usinagem, ferramenta de topo esférico e parâmetros de corte fixos.

3.2.1 Material utilizado nos ensaios

Tendo em vista reproduzir as condições reais de usinagem enfrentadas pelas ferramentarias (fabricantes de moldes e matrizes), optou-se pela utilização do aço AISI H13 recozido, com uma dureza de 191 HB. Esse material foi selecionado por ser frequentemente utilizado na confecção de moldes e matrizes, fornecido pela Diferro Aços Especiais Ltda., assim como a composição química média, apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química percentual em massa do aço AISI H13

Análise	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	Al	W	V
[%]	0,390	0,350	0,960	0,017	0,003	0,170	5,030	0,100	1,220	0,015	0,020	0,861

Fonte: Adaptada de Diferro Aços Especiais (2018).

3.2.2 Máquina-ferramenta

Os ensaios realizaram-se no Laboratório de Novas Tecnologias de Produção (LNTP) da Universidade de Caxias do Sul (UCS). Em relação à máquina, trata-se de um centro de

usinagem vertical CNC, modelo LG 500 – Hartford, com três eixos, rotação máxima de 10.000 rpm e 10 kW de potência, conforme a Figura 20.

Figura 20 – Máquina utilizada nos ensaios



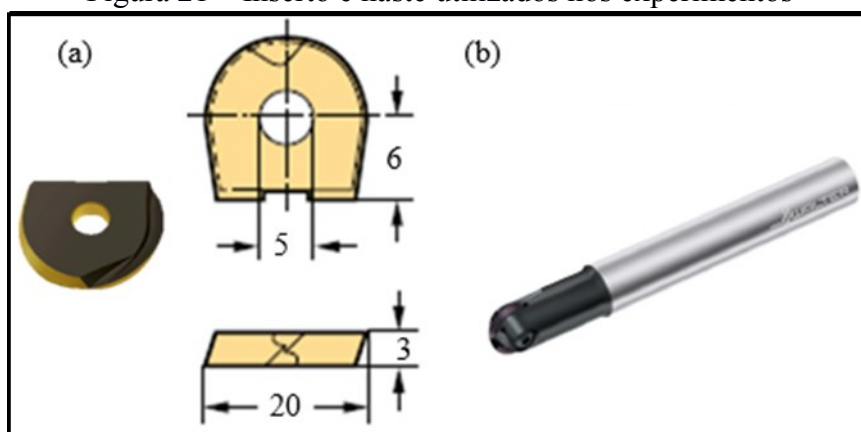
Fonte: Universidade de Caxias do Sul (2018).

3.2.3 Ferramenta de corte

A determinação do tipo da ferramenta de corte está vinculada ao material a ser usinado e às estratégias de corte empregadas. Nos ensaios, buscou-se avaliar a estratégia de acabamento, em que o uso da ferramenta de topo com ponta esférica tem larga aplicação.

Tendo como parceiros no trabalho a empresa Walter Tools, optou-se pela utilização de uma ferramenta com insertos intercambiáveis de ponta esférica, com o diâmetro de 20 mm. Esse diâmetro foi selecionado para reduzir os valores de rotações por minuto (rpm) calculados, pois existe limitação da máquina utilizada no experimento (10.000 rpm). Os insertos são de metal-duro, código da Walter P3204-D20 WSP 46, possuem revestimento de $\text{TiAlN} + \text{Al}_2\text{O}_3$, depositado pelo processo PVD, sugeridos para fresamento de acabamento em aços. A haste, código da Walter F2139.5.20.160.20, é constituída de aço com diâmetro de 20 mm e comprimento de 160 mm. A Figura 21 ilustra o inserto (a) e a haste de fixação (b), utilizados no experimento.

Figura 21 – Inserto e haste utilizados nos experimentos

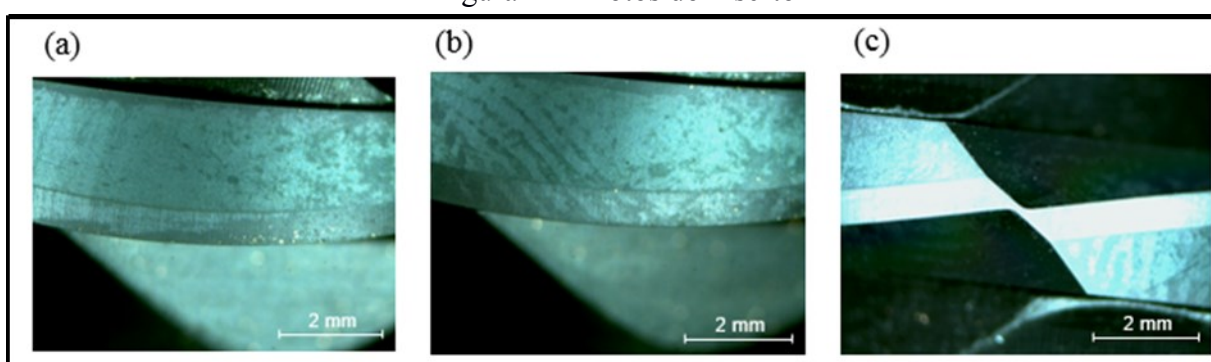


Fonte: Adaptada de Walter Tools (2018).

Identificaram-se os gumes dos insertos e analisados em um estereoscópio trinocular de medição universal marca Entex, modelo TNE-10B, que encontra-se no Laboratório de Novas Tecnologias de Produção (LNTP) da Universidade de Caxias do Sul (UCS), antes da sua utilização. Embora os insertos sejam novos, a verificação se faz necessária para detectar possíveis defeitos no gume, o que impediria a sua utilização nos ensaios.

A Figura 22 ilustra a fotografia dos gumes do inserto analisado no microscópio ótico, antes da utilização nos ensaios. A letra (a) apresenta o gume 1, a letra (b) demonstra o gume 2 e a letra (c), o topo do inserto. Os insertos foram avaliados de acordo com a norma ISO 3685, com magnificação de 10 vezes.

Figura 22 – Fotos do inserto



Fonte: Elaboração do autor (2018).

A fixação da haste foi realizada utilizando um cone ISO BT 40, do tipo porta-pinça. No ajuste do balanço da ferramenta, definido pela relação de fixação comprimento livre/diâmetro nominal (l/d) da ferramenta, procurou-se reduzir esta relação, de forma a minimizar a possibilidade de ocorrência de vibrações. Este parâmetro foi controlado e

mantido o mesmo para todos os ensaios. Assim, o valor utilizado para o l/d de fixação foi de 3,5, resultando em um balanço de 70 mm.

Verificou-se o batimento da haste, a cada novo inserto utilizado, comparando-se os dois gumes. A fixação e o posicionamento do inserto na haste se dá mediante um parafuso central, sendo que sua substituição efetuou-se fora da máquina, levando-se o conjunto cone/haste/inserto até uma bancada. Para a medição utilizou-se um relógio comparador com escala centesimal e haste magnética, o batimento não superou 0,01 mm em nenhum ensaio.

3.2.4 Parâmetros de corte fixos

Alguns parâmetros de corte são mantidos constantes, buscando eliminar algumas variáveis passíveis de influenciar os resultados finais de rugosidade, textura e desgaste do inserto. Conforme a recomendação do fabricante da ferramenta, foi utilizada uma velocidade de corte (v_c) de 150 m/min, a profundidade de corte axial (a_p) de 0,5 mm, o incremento lateral (a_e) de 0,5 mm e o avanço por gume (f_z) de 0,2 mm.

3.3 VARIÁVEIS DE ENTRADA DO PROCESSO

Para o processo determinaram-se variáveis de entrada, a fim de caracterizar suas influências no experimento, tais como: sentidos de corte e variação de parâmetros de corte. Em função do escopo do trabalho, algumas variáveis do processo não foram abordadas no ensaio, porém são relevantes na usinagem. Podem ser citadas as forças de usinagem, que influenciam os resultados das diferentes solicitações, dependendo das distintas regiões de contato do gume de corte da ferramenta com a peça. (SOUZA, 2004). A vibração trata-se de outra variável isolada no processo e que não foi analisada. A vibração no fresamento pode surgir na relação entre ferramenta e a peça, assim como entre a máquina e a ferramenta. (KÖNIG; KLOCKE, 2008). A vibração é uma variável que dificulta o controle do parâmetro de rugosidade. (HAMDAN; SARHAN; HAMDI, 2012).

3.3.1 Parâmetros de corte variáveis

Para dois corpos de prova, em que os parâmetros citados em 3.2.4 são mantidos constantes, varia-se o diâmetro efetivo de corte para o cálculo da velocidade rotacional, consequentemente tornando-a variável. Com a velocidade rotacional variável, a velocidade de

avanço também irá manter-se variável. Para calcular ambas as velocidades, seguiu-se o procedimento:

- a) utilizou-se o *software Solid Works* para modelar os corpos de prova e a ferramenta de corte, assim como para determinar o diâmetro máximo de contato do gume com o raio da peça, identificando o diâmetro efetivo com a variação a cada 1°;
- b) a partir da equação 2, citada no capítulo 2, fixaram-se parâmetros constantes, conforme informado no item 3.2.4 e, para cada diâmetro efetivo de contato, foi calculada a velocidade rotacional; e
- c) após o cálculo da velocidade rotacional para cada ponto de contato, calcula-se a velocidade de avanço, a partir da equação 3, citada no capítulo 2.

Para dois corpos de prova utilizou-se o diâmetro nominal da ferramenta para a aplicação das equações e definição dos parâmetros de corte, com isso tanto a velocidade tangencial como a velocidade de avanço permanecem constantes para toda a usinagem da amostra.

Na usinagem dos corpos de prova com velocidade rotacional e de avanço ajustados, conforme o diâmetro efetivo, espera-se um menor tempo de usinagem, devido aos dados de corte serem mais elevados, quando comparados com os parâmetros calculados com o diâmetro nominal. Desta forma, a medição comparativa do tempo de usinagem, com parâmetros de corte, em que um utiliza o diâmetro nominal e outro o diâmetro efetivo, torna-se relevante.

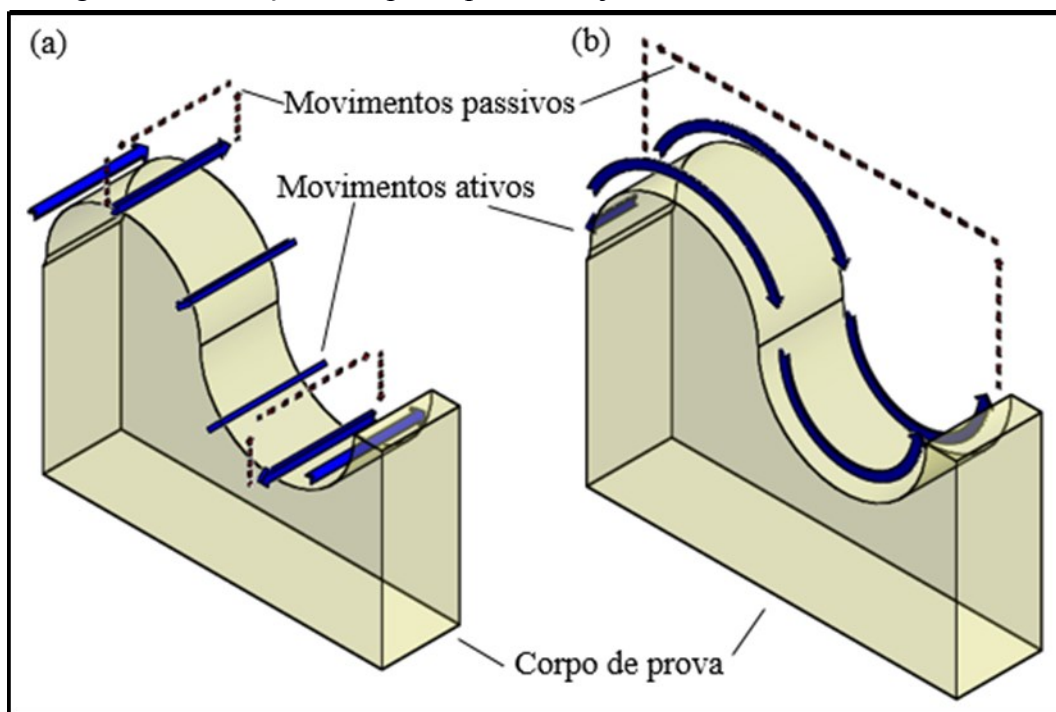
3.3.2 Estratégia de corte

Para simular a condição de acabamento em moldes e matrizes nos ensaios, determinou-se uma geometria em raio e dimensões previamente definidas. Estabeleceu-se como principal variável de entrada a estratégia de corte, em que alteram-se a trajetória e a orientação da ferramenta, em relação ao raio no processo de usinagem.

Para os ensaios foi proposto usinar quatro corpos de prova. Dois deles na condição de velocidade rotacional constante, contemplando em um deles a usinagem longitudinal ao perfil, e outro, no sentido transversal, em ambos os casos englobando usinagem ascendente e descendente. Nos outros dois corpos de prova usinou-se com a velocidade rotacional variável a cada ponto de contato do diâmetro efetivo (d_e) da ferramenta com a peça e, como citado anteriormente, um deles com usinagem longitudinal ao perfil e o outro transversal. A fixação das amostras ocorreu mediante uma morsa. A Figura 23 ilustra o esboço do corpo de prova,

bem como a trajetória da ferramenta, sendo perpendicular ao perfil em (a) e no sentido longitudinal em (b). As setas contínuas indicam os movimentos ativos (que promovem a remoção do material) e as setas tracejadas indicam os movimentos passivos (que não promovem a remoção do material), no processo de fabricação.

Figura 23 – Esboço do corpo de prova e trajetória ou caminho da ferramenta



Fonte: Elaboração do autor (2018).

A programação CNC, responsável pelas movimentações da ferramenta, em relação à superfície trabalhada, foi gerada com o auxílio de códigos da *International Organization for Standardization* (ISO) – (Comandos G90, G00 e G01).

3.3.3 Desgaste da ferramenta

O desgaste da ferramenta no fresamento tem influência na qualidade superficial. Esse experimento busca avaliar a real influência da velocidade de corte, com o desgaste da ferramenta de ponta esférica, comparado em ambas as estratégias. O início de cada operação ocorre com insertos novos, em que o critério de medição do desgaste é o $VB_{máx}$, e o resultado depende do volume de material retirado em cada estratégia proposta.

3.4 VARIÁVEIS DE SAÍDA DO PROCESSO

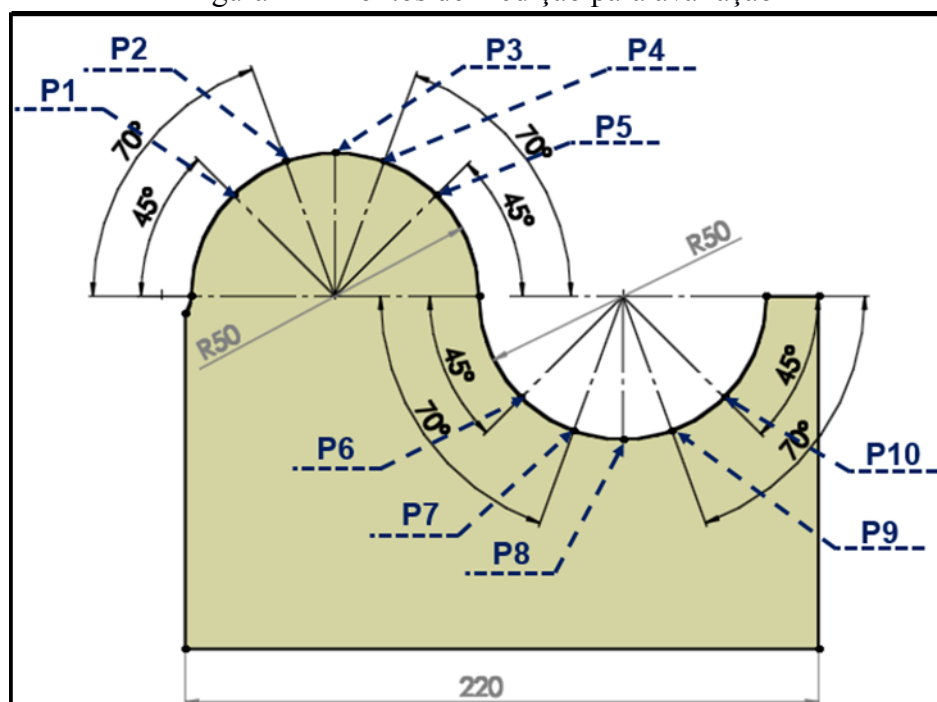
A verificação da influência da variável de entrada é realizada por meio da análise da variável de saída, obtida experimentalmente. Em consequência da junção das variáveis e constantes citadas anteriormente, pode-se detalhar as saídas do processo, destacadas como a análise da rugosidade e textura em cada ponto determinado, além de verificar o desgaste do inserto no final da usinagem.

3.4.1 Qualidade superficial

Para a avaliação dos resultados da rugosidade e textura, buscou-se entender o efeito dos diferentes diâmetros efetivos de contato, entre a ferramenta e a peça. Com isso, os pontos são avaliados onde entende-se que este efeito é mais importante. A velocidade de corte é variável, devido ao cálculo da velocidade rotacional, ao longo do contato do diâmetro efetivo com a peça.

A Figura 24 ilustra os pontos de medição e avaliação da rugosidade e textura, após a usinagem dos corpos de prova, sendo eles de P1 a P10, posicionados a 45°, 70° e 90°, respectivamente, partindo do centro do raio côncavo e convexo e das principais dimensões das amostras. Para a aproximação destes pontos, utilizou-se um goniômetro, a partir do centro do raio, a fim de determinar a exata localização para a medição.

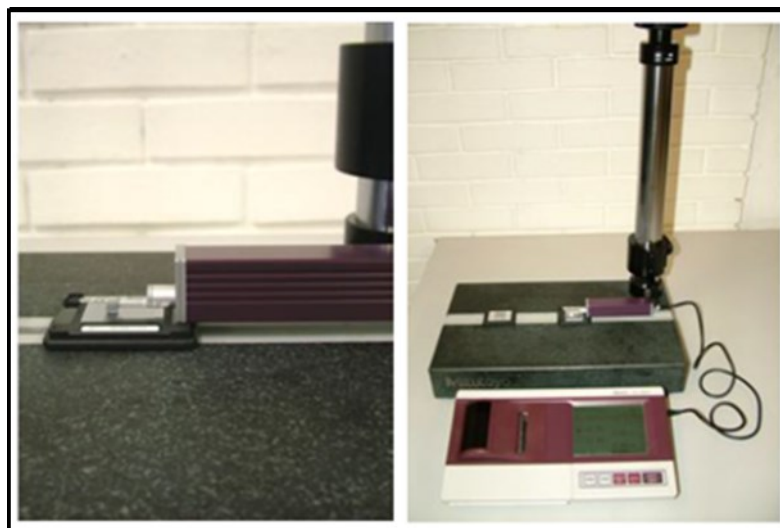
Figura 24 – Pontos de medição para avaliação



Fonte: Elaboração do autor (2018).

A análise quantitativa dos corpos de prova realizaram-se por meio de um rugosímetro de marca Mitutoyo e modelo SJ-301, que encontra-se no Laboratório de Novas Tecnologias de Produção (LNTP) da Universidade de Caxias do Sul (UCS). O rugosímetro possui um apalpador de diamante do tipo estilete (*stylus*), com raio de ponto de 5 μm e resolução de 0,01 μm . O equipamento utiliza o método de detecção por indutância diferencial e uma força de medição de 4 mN, mostrado na Figura 25.

Figura 25 – Rugosímetro portátil para a medição da rugosidade



Fonte: Universidade de Caxias do Sul (2018).

Para a definição do comprimento de amostragem da medição da rugosidade, utilizou-se a norma ISO 4288:1996, cujos valores orientativos são apresentados na Tabela 2. De acordo com os valores esperados de R_a de até 1 μm , selecionou-se o comprimento de amostragem (*Cutt-off*) de 0,8 mm.

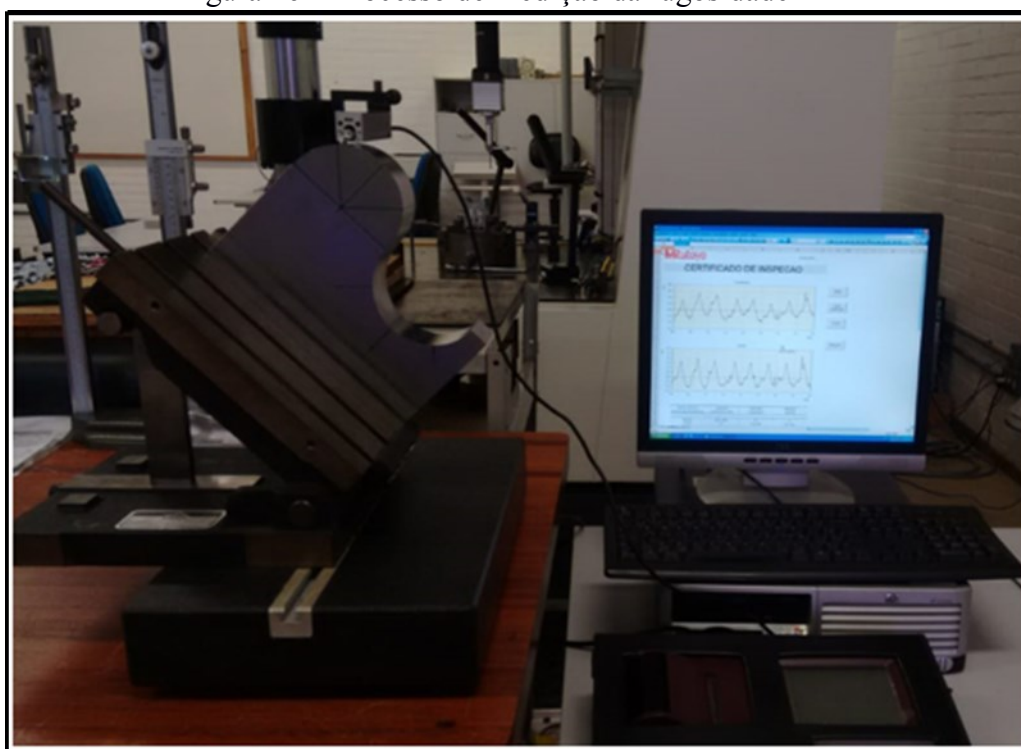
Tabela 2 – Comprimentos de amostragem e avaliação de rugosidade

Rugosidade (μm)		Comprimento de amostragem (<i>Cutt-off</i>) (mm)	Comprimento de avaliação (mm)
R_a	R_z		
< 0,02	< 0,1	0,08	0,4
0,02-0,1	0,1-0,5	0,25	1,25
0,1-2	0,5-10	0,8	4,0
2-10	10-50	2,5	12,5
> 10	> 50	8,0	40,0

Fonte: Adaptada de ISO 4288:1996.

Para completar as análises no aspecto qualitativo, quanto à textura, utilizou-se um estereoscópio trinocular de medição universal marca Entex, modelo TNE-10B, que encontra-se no Laboratório de Novas Tecnologias de Produção (LNTP) da Universidade de Caxias do Sul (UCS). Em 9 dos 10 pontos estipulados para medição, realizaram-se fotografias com o estereoscópio com ampliação de 10, 30 e 45 vezes. O posicionamento da amostra, no ângulo proposto, realizou-se com a auxílio de uma mesa de seno e blocos padrão, tanto para as fotografias, como para a medição da rugosidade. A Figura 26 ilustra o processo de medição da rugosidade.

Figura 26 – Processo de medição da rugosidade



Fonte: Universidade de Caxias do Sul (2018).

Realizaram-se medições para três parâmetros de rugosidade: R_a , R_z e R_y ou $R_{máx}$ e para cada parâmetro efetuaram-se cinco medições em pontos equidistantes, no sentido transversal dos corpos de prova, conforme Figura 26. Para a avaliação final, considerou-se a média dos cinco valores medidos para cada ponto e para cada parâmetro.

Toda a execução do trabalho na usinagem das amostras, assim como na medição da rugosidade e na fotografia das texturas, foi realizada com o acompanhamento de um laboratorista qualificado para as operações.

3.4.2 Desgaste da ferramenta

O desgaste da ferramenta de corte é inevitável e tem influência significativa sobre o processo de usinagem. Esse desgaste é o resultado do contato entre a ferramenta e a peça e depende de fatores mecânicos, térmicos, químicos e abrasivos, que variam dependendo da estratégia utilizada e dos parâmetros de corte empregados. Portanto, o desgaste torna-se uma variável de saída, pois afeta diretamente a rugosidade e a textura dos corpos de prova, assim como a vida útil da ferramenta e a redução dos tempos de processo.

3.5 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

Para identificar de forma mais clara onde estão as diferenças nos resultados, utilizou-se a metodologia da análise de variância (ANOVA). O método ANOVA permite duas saídas para análise: com a hipótese nula (H_0), conclui-se que os valores analisados são iguais entre si; com a hipótese alternativa (H_1), os valores diferem pelo menos em uma situação. (RIBEIRO; CATEN, 2011). Quando a hipótese nula é rejeitada, uma metodologia que pode ser utilizada para comparação das médias dos pontos analisados é a diferença mínima significativa (DMS). Um dos testes para encontrar a DMS é o teste “t” de Student em que realiza-se a comparação múltipla entre todas as médias analisadas de duas a duas, a fim de identificar onde encontram-se as diferenças. (BERTÉLI, 2018).

O teste “t” de Student ocorre da forma que é calculado o módulo da diferença entre as médias de um ponto e outro e após são comparados com o valor de DMS. Se o valor for maior que o parâmetro de DMS, então a diferença é significativa, se não, não é significativa. A equação (10) é utilizada para cálculo da DMS, conforme Bertéli (2018):

(10)

Em que:

t = dado estatístico tabelado, considera graus de liberdade e nível de significância;

MQR = média quadrática; e

k = número de repetições de cada tratamento.

Para o trabalho utilizou-se o nível de significância de 95% de confiança. A média quadrática (MQR) foi retirada da ANOVA em cada caso e para o valor k; sempre se utilizou

10, em função das cinco medições do teste, somadas às cinco medições da réplica. As tabelas comparativas foram detalhadas no Apêndice B. A metodologia foi aplicada para o CP03 e CP04, entre os pontos de cada corpo de prova individualmente, considerando todos os valores de rugosidade medidos, sendo somente na réplica 02.

Na usinagem do teste inicial, buscou-se estabilizar o processo e analisar possíveis falhas decorrentes do processo, como instabilidades e ajustes de programa de usinagem. Na réplica 01 analisou-se o desgaste do inserto, em que a usinagem proposta já descartara as instabilidades e os problemas detectados no ensaio inicial. Portanto, para o teste inicial e na réplica 01, não efetuaram-se os cálculos estatísticos, somente a medição da rugosidade para posterior análise, mediante o desvio padrão.

Na sequência, efetuou-se o comparativo entre corpos de prova da réplica 02 entre os corpos de prova CP03 e CP04, conforme Apêndice B. Ressalta-se que para o estudo aplicou-se somente o parâmetro de rugosidade R_a , o qual foi medido no sentido transversal de cada corpo de prova. Para a condição dos CP01 e CP02 não executou-se análise de variância para comparativo, em função da limitação da máquina de usinagem, e com isso não realizou-se réplica para estes corpos de prova. Este fato é detalhado no capítulo seguinte.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados detalhados obtidos dos ensaios do capítulo 3. Além do ensaio inicial, realizaram-se duas réplicas do experimento para a proposta de usinagem transversal, a fim de auxiliar nas discussões dos resultados. As discussões são apresentadas de forma separada para cada estratégia de usinagem adotada.

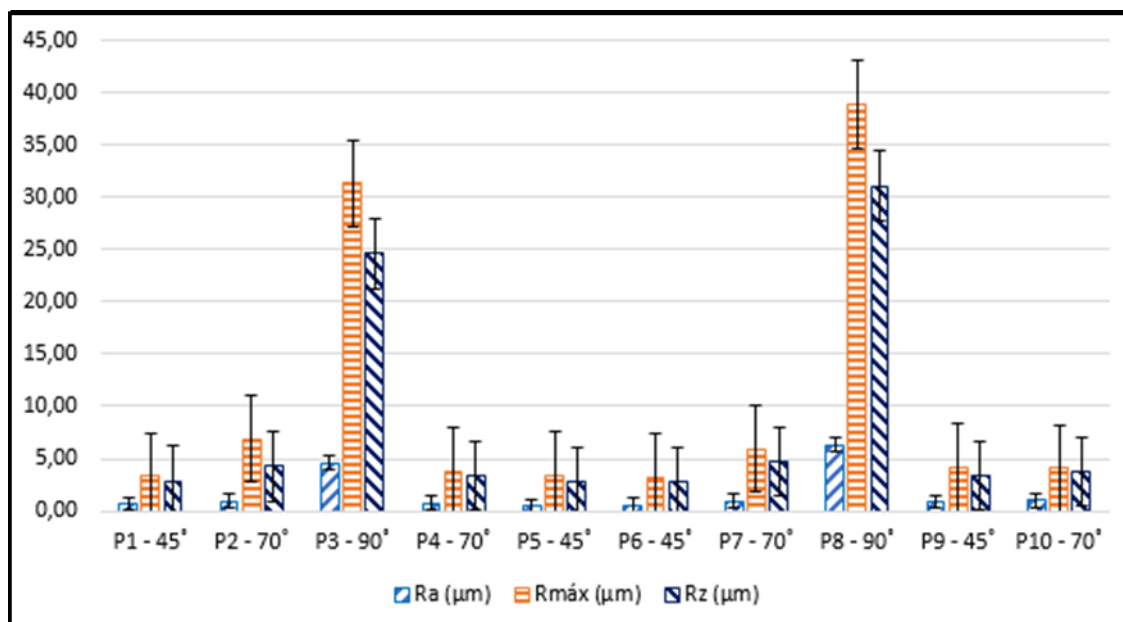
4.1 USINAGEM LONGITUDINAL COM VELOCIDADE ROTACIONAL E AVANÇO CONSTANTE (CP01)

Esta condição consiste em utilizar o diâmetro nominal da ferramenta para o cálculo dos parâmetros de corte na usinagem. Conforme dados fixos citados na seção 3.2.4, calcularam-se a velocidade rotacional (rpm) e a velocidade de avanço (v_f) para a usinagem, no sentido do raio/sentido longitudinal. Utilizaram-se uma velocidade rotacional de 2387 rpm e velocidade de avanço de 955 mm/min, em que retiraram-se 8.282 mm³ de cavaco, em apenas um passe.

4.1.1 Análise de rugosidade para o CP01

Os valores de rugosidade unificados apresentam-se no gráfico da Figura 27, e representam a média das cinco medições para cada parâmetro de rugosidade, na condição de usinagem do corpo de prova 01.

Figura 27 – Rugosidade CP01



Fonte: Elaboração do autor (2018).

Observam-se, no gráfico da Figura 27, valores semelhantes de rugosidade no parâmetro Ra nos pontos P1, P4, P5 e P6. No ponto P1, a ferramenta atua na ascendente em uma inclinação a 45° e, nos pontos P4, P5, P6, na descendente em uma inclinação a 45°, 70° e 45°, respectivamente. Nos pontos P2, P4, P7, P9 e P10 apresentam-se valores de rugosidade Ra mais elevados do que os pontos anteriores, porém semelhantes entre si. Nos pontos P2, P9 e P10, a ferramenta atua na ascendente em uma inclinação de 70°, 45° e 70°, respectivamente, e nos pontos P4 e P7 na descendente em uma inclinação a 45°. Podem ser destacados, nesta condição de usinagem, valores menores de rugosidade Ra para os pontos P1, P5 e P6, todos referentes a 45° de inclinação. Conforme resultados obtidos por Souza (2004), os pontos, em que a ferramenta atua em uma região mais afastada do centro, apresentam melhores resultados de rugosidade, pontos estes a 45°, quando comparados com os demais.

O gráfico permite identificar valores elevados de rugosidade para os pontos P3 e P8, regiões em que a ferramenta atua perpendicularmente à superfície usinada. O resultado do parâmetro Ra nos pontos P3 e P8 não revelam o perfil da superfície, porém, quando analisa-se o R_{máx}, percebem-se irregularidades na região. Nesta condição, a ferramenta utiliza principalmente seu centro para a remoção do material, na qual o cavaco é deformado, sem efetuar o corte por cisalhamento. Segundo Scandiffio, Diniz e Souza (2017), em tais casos pode haver o aumento de rugosidade, assim como o desgaste prematuro da ferramenta.

4.1.2 Análise de textura para o CP01

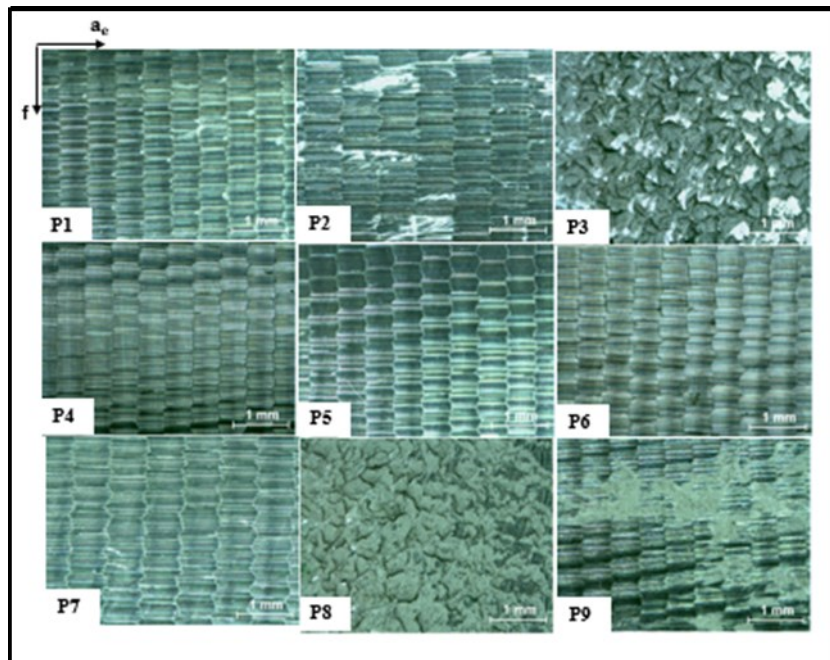
Para a avaliação da textura na Figura 28, demonstra-se o unificado de imagens geradas do ponto P1 ao P9 para o primeiro corpo de prova. Em cada ponto, posicionou-se a amostra centralizada no estereoscópio. As imagens são demonstradas com ampliação de 15 vezes.

De acordo com o item 4.1.1, observa-se que, com exceção dos pontos P3 e P8, os demais permitem a identificação da passagem da ferramenta com clareza; além disso, apresentam diferenças de homogeneidade e regularidade no tamanho das células. Nos pontos P1 e P2, em que a ferramenta atua na ascendente, percebe-se melhor homogeneidade no P1. Nos pontos P4, P5, P6 e P7, em que utilizou-se a estratégia descendente, fica evidente a irregularidade das linhas na passagem da ferramenta, e o caminho do gume torna-se perceptível nas extremidades das linhas.

Nos pontos P3 e P8 não ocorre a mecânica adequada do corte e sim o amassamento do material, em função da velocidade de corte muito baixa, próxima ao centro da ferramenta;

este fato eleva significativamente os valores da rugosidade. O trabalho de Souza (2004) confirma que, quando utiliza-se o centro na usinagem com ferramentas de ponta esférica, ocorre o amassamento do material e não o corte por cisalhamento, em função da velocidade de corte tender a zero, no centro da fresa.

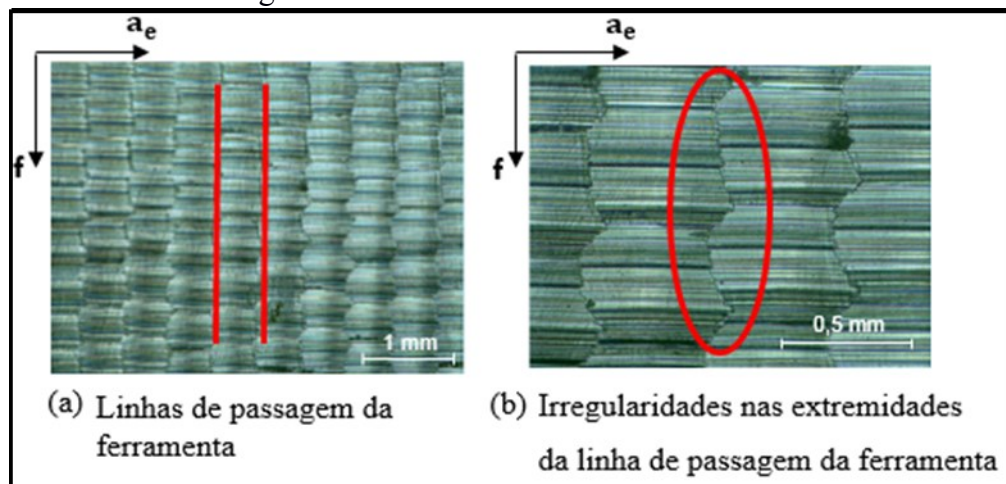
Figura 28 – Imagens de textura CP01



Fonte: Elaboração do autor (2018).

Na Figura 29, a letra (a) exemplifica as linhas de passagem da ferramenta para o ponto P6 e, também, a letra (b), as irregularidades citadas na extremidade da linha de passagem da ferramenta.

Figura 29 – Peculiaridades da textura no P6

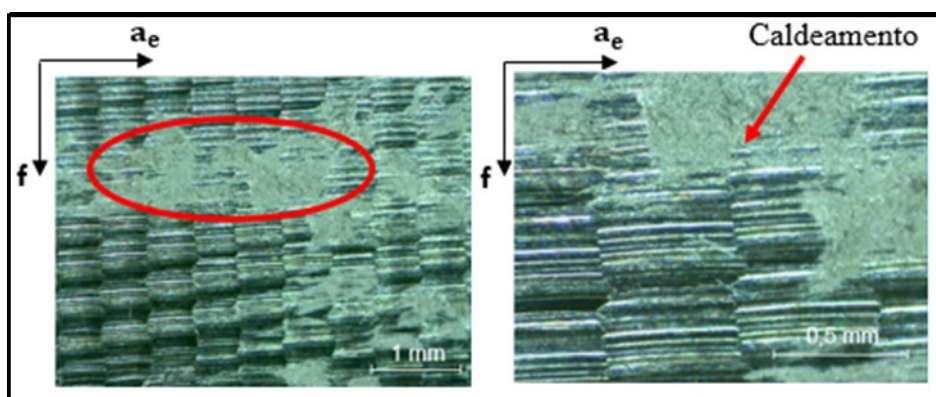


Fonte: Elaboração do autor (2018).

As marcas deixadas pela ferramenta, na Figura 29, apresentam características onduladas e dependem basicamente dos parâmetros de corte utilizados. O incremento lateral (a_e) e o avanço por gume (f_z) são parâmetros que possuem uma parcela significativa na rugosidade da superfície usinada. (JUNG; YANG; LEE, 2005).

No ponto 9 percebe-se a possibilidade da ocorrência de caldeamento de material na superfície da peça. O caldeamento ocorre quando há elevada geração de calor na superfície. Desta forma, ocasiona a redução da resistência mecânica do material na região e, então, plastificação do material no local. (NICOLA; MISSELL; ZEILMANN, 2010). A condição de deformação e caldeamento também foi identificada no estudo de Nicola (2008) para a estratégia ascendente. No ensaio de Schroeter (2017), pode-se observar partículas de material aderidas à aresta do inserto. Este material aderido, também conhecido como caldeamento, ocorre devido à ação de forças elevadas durante o processo de usinagem ou pelo atrito entre o cavaco e a face da ferramenta. A Figura 30 indica o caldeamento na superfície do material, para a condição de usinagem ascendente.

Figura 30 – Caldeamento no P9



Fonte: Elaboração do autor (2018).

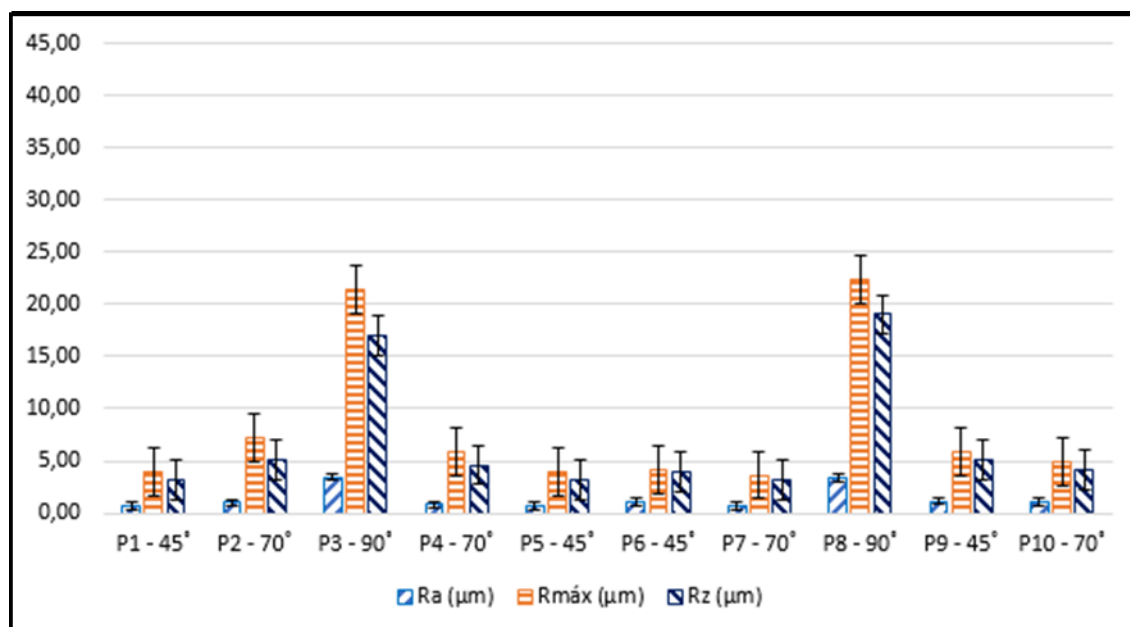
4.2 USINAGEM LONGITUDINAL COM VELOCIDADE ROTACIONAL E AVANÇO VARIÁVEL (CP02)

Esta condição consiste em utilizar o diâmetro efetivo da ferramenta para o cálculo dos parâmetros de corte na usinagem. Conforme dados fixos citados na seção 3.2.4, calculou-se a velocidade rotacional (rpm) e a velocidade de avanço (v_f) para a usinagem, no sentido do raio/sentido longitudinal. Utilizou-se uma velocidade rotacional e de avanço, em que sua variação ocorre a cada 1º corpo de prova. Retiraram-se 8.282 mm³ de cavaco em apenas um passe.

4.2.1 Análise de rugosidade para o CP02

Os valores de rugosidade coletados apresentam-se no gráfico da Figura 31, e representam a média das cinco medições para cada parâmetro de rugosidade, na condição de usinagem do corpo de prova 02.

Figura 31 – Rugosidade CP02



Fonte: Elaboração do autor (2018).

Verifica-se no gráfico da Figura 31 valores semelhantes de rugosidade no parâmetro Ra em todos os pontos, com exceção dos pontos P3 e P8. O resultado do parâmetro Ra nos pontos não revela o perfil da superfície, porém, quando analisa-se o Rmáx, percebem-se picos de irregularidades nas regiões. Observa-se novamente neste corpo de prova que os parâmetros de rugosidade para os pontos P3 e P8 destoam dos demais, pelo fato de a utilização do centro da ferramenta ser para o corte; entretanto, os valores nestes pontos tiveram reduções significativas dos parâmetros, quando comparados ao CP01. O ponto P3 obteve redução de aproximadamente 33% no valor de Ra, 46% para Rmáx e 45% para Rz. Os menores valores de rugosidade encontrados para esta condição de usinagem foram identificados no P1, com usinagem ascendente a 45° e no P7 com usinagem descendente, com 70° de inclinação, ambos com resultado de Ra de 0,67 μm.

Destaca-se que a redução de valores nos pontos P3 e P8 ocorre em função da ferramenta usinar com velocidade rotacional e com avanço máximo nestas regiões, devido ao diâmetro de contato, em relação à peça ser menor neste ponto do corpo de prova. Segundo

König e Klocke (2008), os valores de rugosidade tendem a ser menores em regiões com maiores parâmetros de corte.

Na usinagem do CP02, identifica-se uma limitação durante o ensaio, em que a máquina, para a cada linha do programa em cima da peça, até chegar na velocidade rotacional desejada. Este é um fato relevante por não haver grandes melhorias na condição superficial nos demais pontos. Souza (2018) comenta que, na leitura do programa pelo comando numérico, existe um tempo médio de processamento de cada linha para o envio dos sinais e acionamentos dos eixos da máquina. Desta forma, os segmentos de reta utilizados para indicar o deslocamento da ferramenta, juntamente com o tempo médio de processamento, são características que podem influenciar na velocidade de avanço. Estas restrições implicam solavancos na máquina durante o processo, provocando irregularidade na movimentação da ferramenta e, com isso, a qualidade superficial não é satisfatória.

Este ensaio apresenta a oportunidade de ser refeito em outra máquina, com uma aceleração maior de acionamento em seus eixos, a fim de verificar o real comportamento da condição de usinagem. Com isso, o ensaio limitou-se ao teste inicial e não prosseguiu com a réplica do experimento para a condição de usinagem em questão. A condição proposta de usinagem não permitiu a comparação direta em relação aos parâmetros (CP02 com CP01), uma vez que o ensaio foi prejudicado pelos solavancos da máquina, impactando na qualidade superficial e no tempo de processamento. Assim, optou-se pela descontinuidade dos ensaios no sentido de usinagem longitudinal. O ensaio inicial teve importante relevância para o trabalho, visto que permitiu identificar variáveis não previstas no início do processo e, com isso, propiciou a continuidade dos ensaios com as demais estratégias que não apresentaram limitação.

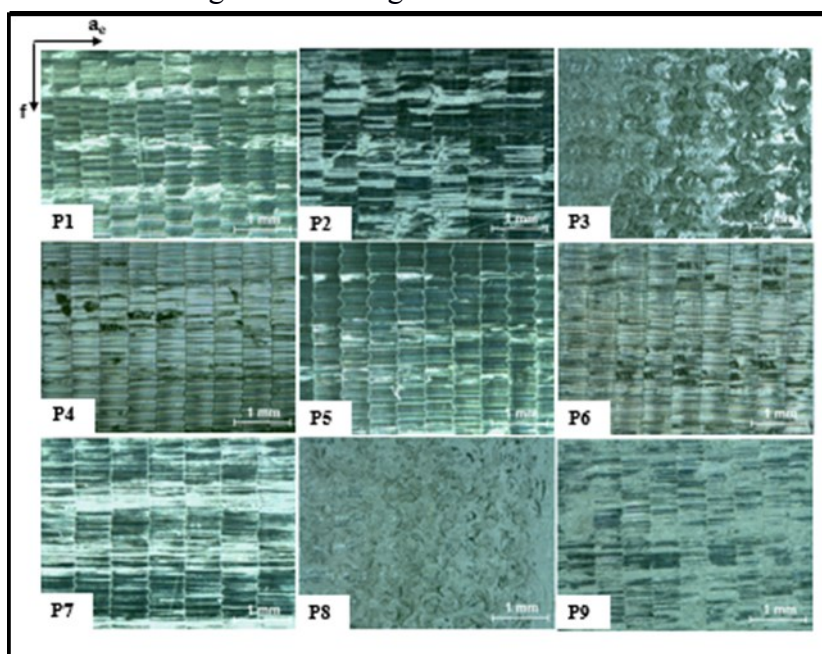
4.2.2 Análise de textura para o CP02

Observa-se, na Figura 32, o unificado de imagens geradas do ponto P1 ao P9 para a segunda amostra, em complemento aos dados de rugosidade obtidos. As imagens são demonstradas com ampliação de 15 vezes e fotografias, no centro do corpo de prova a cada ponto.

Conforme o item 4.2.1, observa-se que, com exceção dos pontos P3 e P8, os demais permitem a identificação da passagem da ferramenta; mesmo assim, apresentam diferenças de homogeneidade e regularidade no tamanho das células, o que pode complementar a análise sob os valores de rugosidade. Os pontos P3 e P8, em função do amassamento do material na

região do corte, não revelaram as linhas de passagem da ferramenta nas imagens. Este fato pode ser complementado com os altos valores dos parâmetros de rugosidade, nessa região. Nicola (2008) afirma que o contorno das células, ou seja, as demarcações das ondulações da passagem da ferramenta, pode justificar a regularidade ou irregularidade de uma superfície.

Figura 32 – Imagens de textura CP02



Fonte:Elaboração do autor (2018).

Na Figura 32, os pontos P2, P4 e P9 apresentam picos de irregularidades no parâmetro $R_{\text{máx}}$ identificados nas imagens de textura, em que nota-se possível adesão de material ou caldeamento na superfície usinada, assim confirmando os dados anteriormente apresentados no gráfico de rugosidade do CP02. No ponto P4, a ferramenta atua na descendente em uma inclinação a 45° e nos pontos P2 e P9 a ferramenta atua na ascendente, em uma inclinação a 45° . Pode-se acrescentar que os pontos P2 e P9 foram usinados com a condição vertical ascendente, em que, no estudo de Nicola (2008) também foi identificada a pior condição de trabalho para esta estratégia, pois encontram-se materiais aderidos à superfície usinada. Segundo estudos de Borba (2016), no torneamento de aços endurecidos, a formação dos cavacos consiste na separação de segmentos na região de cisalhamento, em que se unem posteriormente, através do caldeamento. Os cavacos não são cisalhados e sim arrancados, o que faz com que a superfície seja danificada.

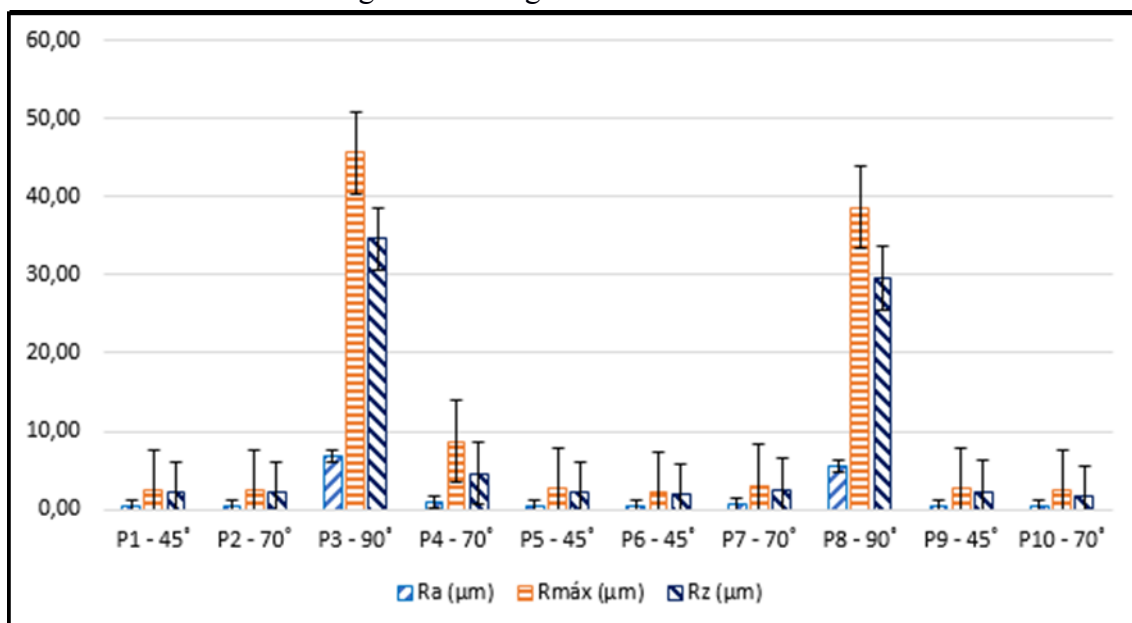
4.3 USINAGEM TRANSVERSAL COM VELOCIDADE ROTACIONAL E AVANÇO CONSTANTE (CP03)

Esta condição consiste em utilizar o diâmetro nominal da ferramenta para o cálculo dos parâmetros de corte na usinagem. Conforme dados fixos citados na seção 3.2.4, calculou-se a velocidade rotacional (rpm) e a velocidade de avanço (v_f) para a usinagem no sentido transversal ao raio. Utilizou-se uma velocidade rotacional de 2387 rpm e velocidade de avanço de 955 mm/min, em que retiraram-se 8.282 mm³ de cavaco por passe. Na primeira réplica, retirou-se um volume de 33.128 mm³ de cavaco, a fim de verificar o desgaste do inserto. No teste e na segunda réplica utilizou-se a mesma condição com insertos novos, em que retiraram-se 8.282 mm³ de cavaco em apenas um passe.

4.2.1 Análise de rugosidade para o CP03

Os valores de rugosidade unificados apresentam-se no gráfico da Figura 33 para o teste, no gráfico da Figura 34 para a réplica 01 e no gráfico da Figura 35 para a réplica 02, em que representam a média das cinco medições para cada parâmetro de rugosidade, na condição de usinagem do corpo de prova 03.

Figura 33 – Rugosidade CP03 – Teste



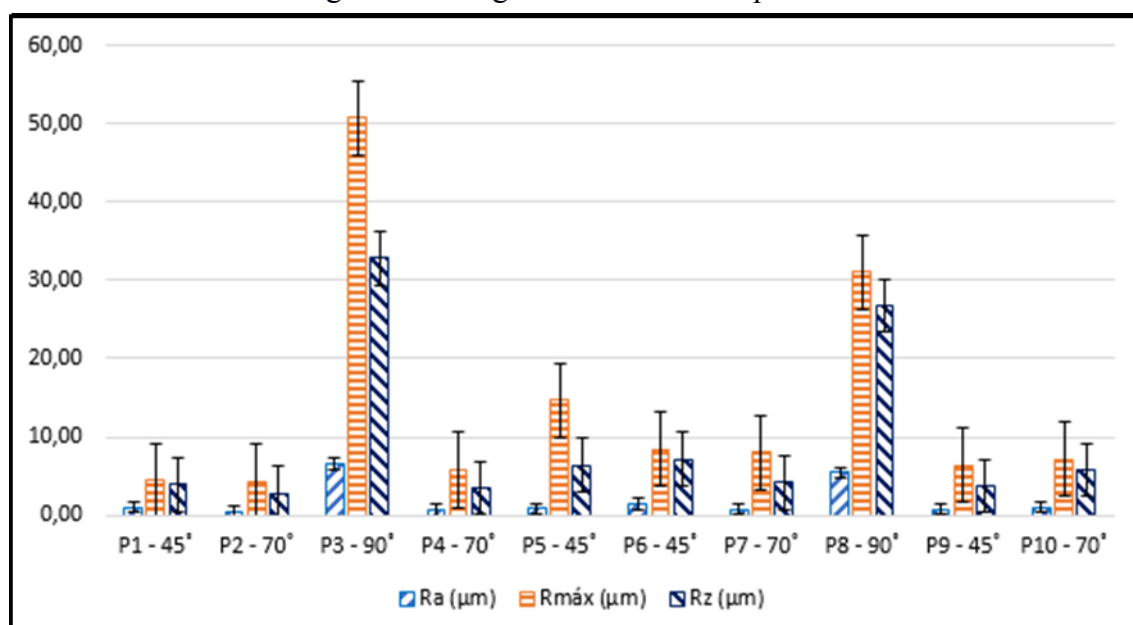
Fonte: Elaboração do autor (2018).

Constatam-se, no gráfico da Figura 33, valores semelhantes de rugosidade no parâmetro Ra nos pontos P1, P2, P5, P6, P9 e P10. Nos pontos P1, P2, P9 e P10, a ferramenta atua na ascendente em uma inclinação a 45°, 70°, 45° e 70°, respectivamente, e nos pontos P5

e P6 a ferramenta atua na descendente em uma inclinação a 45°. Nos pontos P4 e P7, apresentam-se valores mais elevados do que os anteriores, porém semelhantes entre si; em ambos, a ferramenta atua na descendente em uma inclinação a 45°. O resultado do parâmetro Ra no ponto P4 não revela a perfil da superfície, porém, quando analisa-se o R_{máx}, percebe-se um pico de irregularidades na região.

O gráfico permite identificar valores elevados de rugosidade para os pontos P3 e P8, regiões em que a ferramenta atua perpendicularmente à superfície usinada. O resultado do parâmetro Ra nos pontos P3 e P8 não revela o perfil da superfície; entretanto, quando analisa-se o R_{máx}, percebe-se um pico de irregularidades na região. Segundo Scandiffio, Diniz e Souza (2017), em tais casos a mecânica de corte por cisalhamento não acontece, o cavaco é arrancado provocando um aumento de rugosidade na região.

Figura 34 – Rugosidade CP03 – Réplica 01



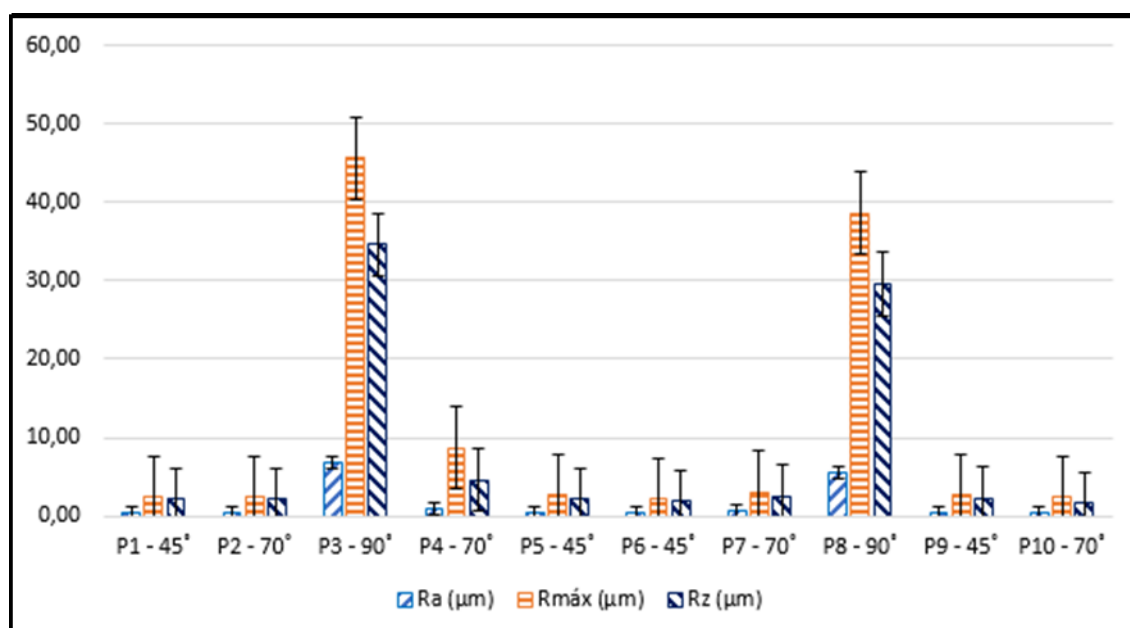
Fonte: Elaboração do autor (2018).

No gráfico da Figura 34 mostra-se o resultado da rugosidade na superfície usinada, provocado pelo desgaste do inserto, em que retirou-se um volume de 33.128 mm³ de cavaco em quatro passes de 8.282 mm³. Nesta condição verifica-se um pequeno aumento de rugosidade no parâmetro Ra, nos pontos P1, P5, P6, P7, P9 e P10, e uma pequena redução de rugosidade no parâmetro Ra nos pontos P2, P3, P4 e P8, com relação ao ensaio inicial. Observa-se que, com exceção dos pontos P3 e P8, os valores da rugosidade no parâmetro Ra são semelhantes entre si, porém, quando analisa-se o parâmetro R_{máx}, percebem-se picos de irregularidades nas regiões.

Nos pontos P3 e P8, em que a ferramenta atua perpendicularmente à superfície e que o corte por cisalhamento não ocorre, percebe-se uma situação distinta. Para o ponto P3 o parâmetro $R_{\text{máx}}$ apresenta um aumento, já para o ponto P8, uma redução com relação ao ensaio inicial. Estes pontos apresentam efeitos não considerados no experimento proposto, como vibração decorrente dos esforços de corte, posicionamento da ferramenta, dificultando a saída do cavaco, entre outras instabilidades.

No gráfico da Figura 35, observa-se que os resultados obtidos na réplica 02 reiteram as mesmas considerações apresentadas no teste inicial. Para a usinagem com inserto novo, o gráfico demonstra valores semelhantes da rugosidade, assim como o comportamento em cada ponto, validando o experimento para a análise estatística.

Figura 35 – Rugosidade CP03 – Réplica 02



Fonte: Elaboração do autor (2018).

Com os valores unificados das medições do CP03 entre teste e réplica 02 identificam-se que, entre os pontos do CP03, existem diferenças de rugosidades a serem destacadas, conforme análise de variância realizada. Desta forma, a ANOVA rejeitou H_0 , sugerindo que uma comparação ponto a ponto fosse realizada.

Nas análises considerou-se a média entre os valores do teste e a réplica 02 em conjunto. Mediante o teste de *t-Student* para identificar a diferença mínima significativa entre os pontos para o CP03, pode-se concluir que os pontos P3 e P8 diferem das demais regiões. O teste DMS destacou também a diferença significativa entre o ponto P4 e o P10, em que a condição ascendente (P10) teve resultado de R_a de 0,358 μm e o ponto P4 com rugosidade R_a

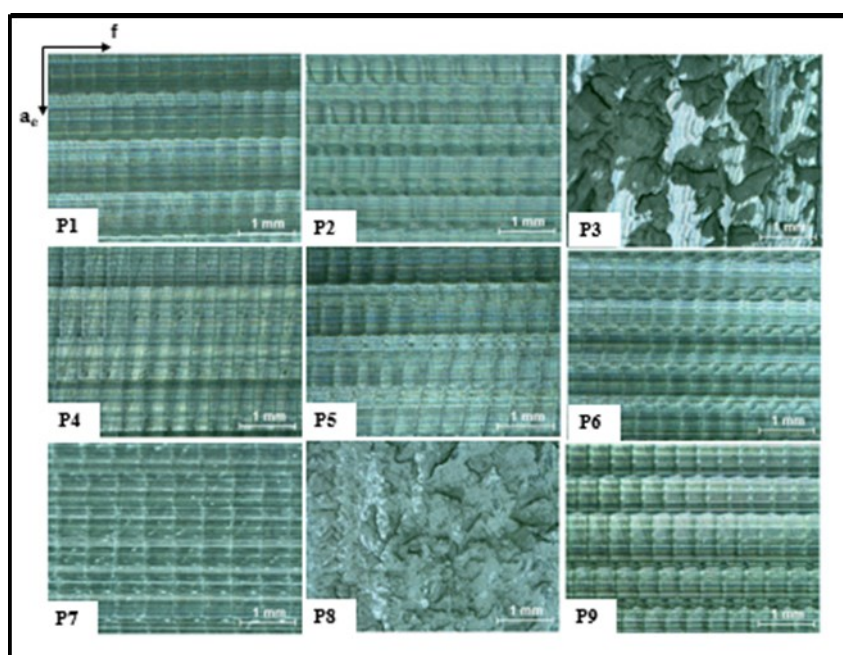
de 1,044 μm . Para os demais pontos, quando comparados entre si, não foi identificada diferença relevante entre os valores do parâmetro Ra.

Com a análise dos parâmetros Ra, Rz e R máx , para as angulações entre si, considerado separadamente o raio côncavo e convexo, por exemplo, ponto P1 com P5, ponto P2 com P4, ponto P6 com P10 e ponto P7 com P9, identificam-se na maioria dos casos valores de rugosidade menores para a condição de usinagem ascendente. Dentro das características de seu experimento, Vacaro (2013) concluiu que a melhor condição encontrada para a usinagem de topo esférico, em planos inclinados, foi a horizontal ascendente. Desta forma, a área de contato da ferramenta com a peça corresponde a uma região de maior gradiente de velocidade de corte, o que induz a menores forças de corte e, conseqüentemente, menores deformações na superfície.

4.3.2 Análise de textura para o CP03

Observa-se na Figura 36 CP03 – teste, na Figura 38 CP03 – réplica 01 e na Figura 40 CP03 – réplica 02, o unificado de imagens geradas do ponto P1 ao P9 para a terceira amostra, em complemento aos dados de rugosidade obtidos. As imagens são demonstradas com ampliação de 15 vezes e fotografias no centro do corpo de prova a cada ponto.

Figura 36 – Imagens de textura – CP03 Teste

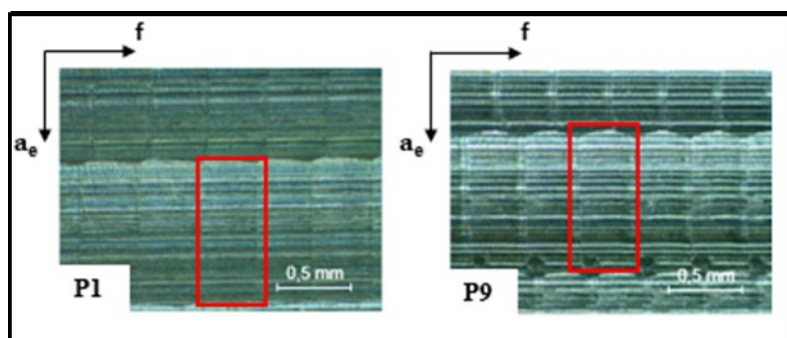


Fonte: Elaboração do autor (2018).

Conforme os resultados obtidos no gráfico da Figura 33, observa-se na Figura 36 que todos os pontos permitem a identificação da passagem da ferramenta, exceto os pontos P3 e P8; além disso, apresentam diferenças de homogeneidade e regularidade no tamanho das células. Nos pontos P3 e P8, em que a ferramenta atua perpendicularmente à peça, fica evidente maior irregularidade no ponto P3, em relação ao ponto P8, confirmando assim um valor de rugosidade maior no ponto P3. Segundo Scandiffio, Diniz e Souza (2017), quando a ponta da ferramenta está envolvida no processo de corte, a aragem pode danificar a superfície, causando deformação elástica e plástica da peça, sem a formação do cavaco.

No ensaio do CP03 – teste pode-se destacar, por exemplo, o formato mais alongado das células na direção do incremento lateral, nos pontos P1 e P9. Este resultado é esperado, uma vez que o parâmetro de incremento lateral ($a_e = 0,5 \text{ mm}$) é maior do que o valor determinado para avanço por gume ($f_z = 0,2 \text{ mm}$). A Figura 37 ilustra o formato alongado para os pontos citados, com ampliação de 30 vezes. No entanto, este resultado não foi identificado por Vacaro (2013), que, ao analisar a estratégia horizontal ascendente, o autor encontrou o resultado inverso, possivelmente pela ocorrência de instabilidade dinâmica na usinagem dos corpos de prova.

Figura 37 – Formato alongado das células para P1 e P9



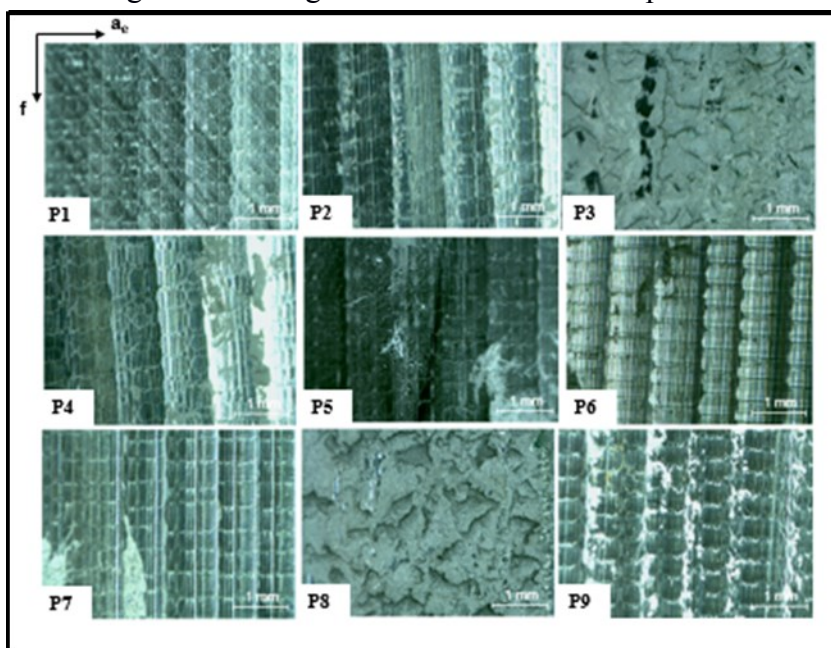
Fonte: Elaboração do autor (2018).

A Figura 38 mostra as imagens do ensaio do CP03 – réplica 01, em que todos os pontos apresentam um resultado de difícil identificação nas linhas de passagem da ferramenta, como também no tamanho e na inclinação das células. As imagens dos pontos P3 e P8 destoam das demais, devido à atuação da ferramenta perpendicular à superfície no corte, confirmando um aumento da rugosidade, identificada anteriormente no gráfico da Figura 34.

Pode-se destacar pontos com material aderido, ocasionados possivelmente pelo desgaste apresentado no inserto, em que possíveis alterações geométricas, ocorridas no gume

durante a usinagem, afetam a qualidade superficial e estão relacionadas à vida útil da ferramenta. (KÖNIG; KLOCKE, 2008).

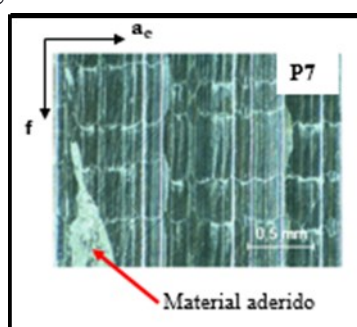
Figura 38 – Imagens de textura – CP03 Réplica 01



Fonte: Elaboração do autor (2018).

A Figura 39 ilustra o resultado não homogêneo no P7, com ampliação de 30 vezes, sendo usinado no sentido descendente. No ponto P7, o material aderido apresenta-se de forma bastante visível, pois a ferramenta começa a atuar com seu centro na retirada do cavaco, em que a adesão é provocada pela baixa velocidade de corte, que tende a zero no centro do inserto.

Figura 39 – Material aderido no P7

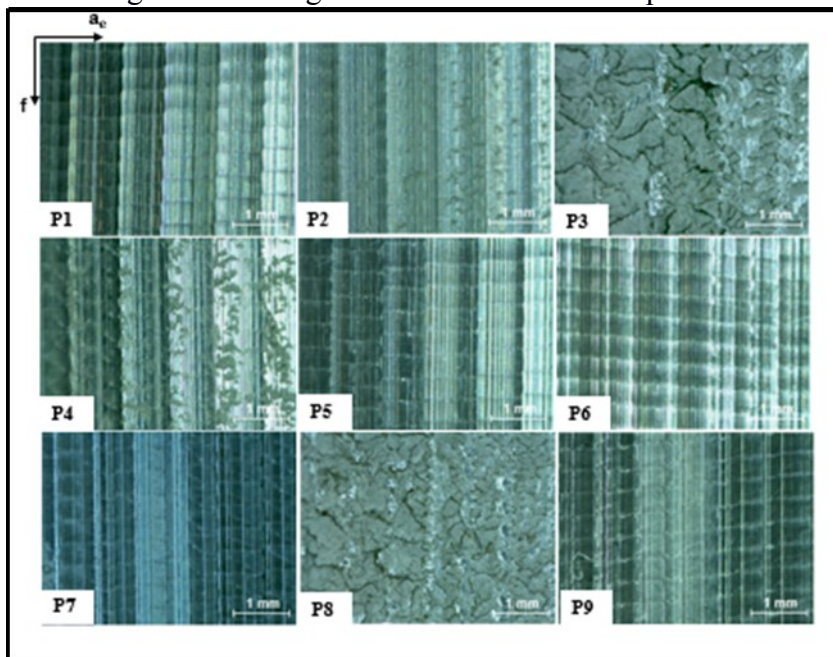


Fonte: Elaboração do autor (2018).

De acordo os resultados obtidos no gráfico da Figura 35, observa-se na Figura 40 qu, com exceção dos pontos P3 e P8, os demais permitem a identificação da passagem da

ferramenta; além disso, apresentam diferenças de homogeneidade e regularidade no tamanho das células.

Figura 40 – Imagens de textura – CP03 Réplica 02

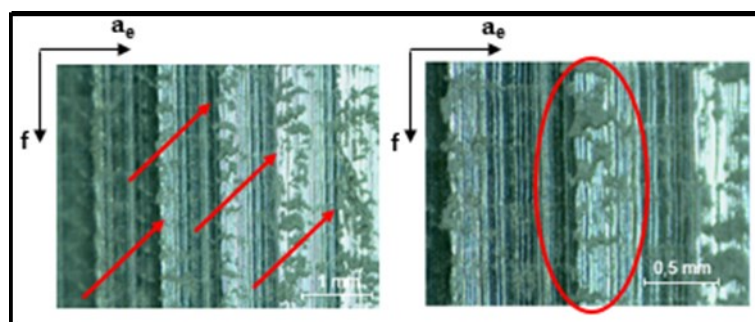


Fonte: Elaboração do autor (2018).

Na usinagem do CP03 – réplica 02 com as mesmas condições do CP03 – teste, o ponto P1 pode ser considerado aquele com maior homogeneidade nas linhas de passagem da ferramenta, pois possui também um dos menores valores de rugosidade atrelado à condição de usinagem do CP03 ($R_a = 0,49 \mu\text{m}$ de média entre teste e réplica 02).

Os pontos com os maiores picos de rugosidade são identificados pela má-formação da textura no material, os quais podem ser identificados pelo ponto P3 e P8, tanto para o teste inicial, quanto para a réplica 02. Uma situação relevante na réplica 02 é o material aderido à superfície na região do ponto 4, conforme indicado na Figura 41.

Figura 41 – Material aderido no ponto P4 – CP03 Réplica 02

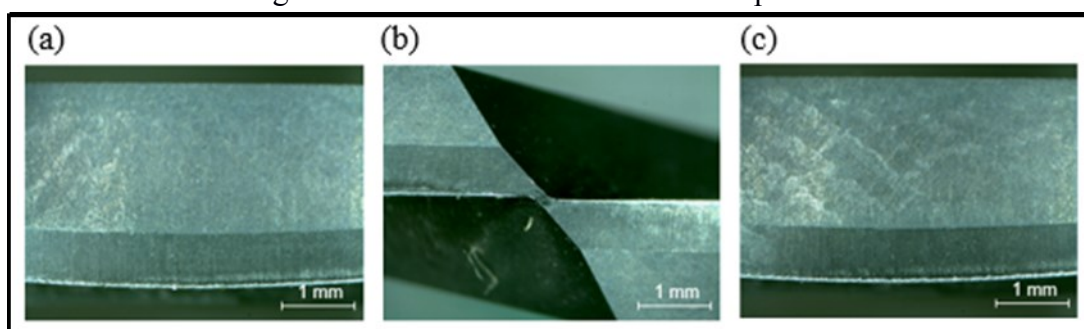


Fonte: Elaboração do autor (2018).

4.3.3 Desgaste dos insertos na usinagem CP03 – Réplica 01

Na usinagem das três amostras com a estratégia e os parâmetros definidos para o corpo de prova CP03, em que utilizou-se um inserto novo para cada ensaio, somente a réplica 01 apresentou um desgaste de 0,07 mm no gume de corte. Este desgaste foi provocado devido ao maior volume de cavaco retirado da peça, a fim de provocar uma usinagem com tempo maior.

Figura 42 – Fotos do inserto CP03 – Réplica 01



Fonte: Elaboração do autor (2018).

A usinagem no CP03 – réplica 01 equivale ao tempo de quatro vezes uma usinagem de acabamento das demais amostras. A Figura 42 demonstra, com ampliação de 15 vezes, na letra (a) o gume 1 medido a 45° de inclinação, na letra (b) a ponta do inserto medido perpendicularmente à superfície e a letra (c) o gume 2 medido a 45° de inclinação. O desgaste foi uniforme nas três regiões medidas.

4.4 USINAGEM TRANSVERSAL COM VELOCIDADE ROTACIONAL E AVANÇO VARIÁVEL (CP04)

Esta condição consiste em utilizar o diâmetro efetivo da ferramenta para o cálculo dos parâmetros de corte na usinagem. Conforme dados fixos citados na seção 3.2.4, calcularam-se a velocidade rotacional (rpm) e a velocidade de avanço (v_f) para a usinagem, no sentido transversal ao raio. Na primeira réplica, retirou-se um volume de 33.128 mm³ de cavaco, a fim de verificar o desgaste do inserto, realizado em quatro passes. Ao teste e à segunda réplica utilizou-se a mesma condição com insertos novos, em que retiraram-se 8.282 mm³ de cavaco, em apenas um passe. O gume de corte sofre diferentes solicitações durante a usinagem, de acordo com a forma geométrica da superfície; portanto, espera-se ter uma melhor condição superficial quando é realizado o ajuste dos parâmetros de corte para a região exata de contato, entre a ferramenta e a peça. (ERDIM; LAZOGLU; OZTURK, 2006).

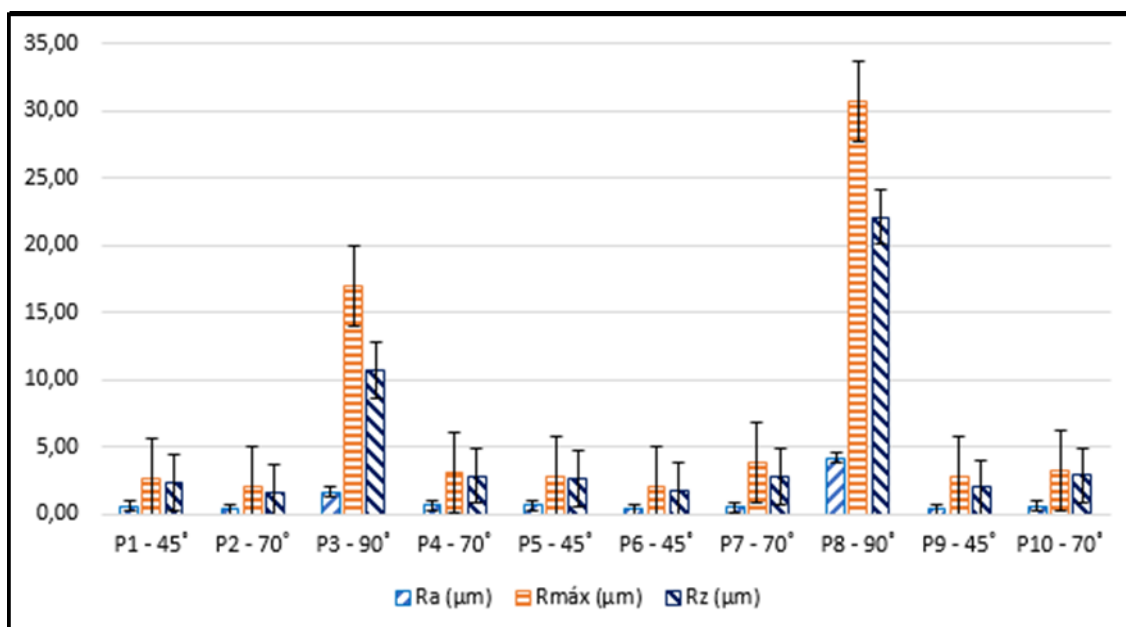
4.4.1 Análise de rugosidade para o CP04

Os valores de rugosidade unificados apresentam-se no gráfico da Figura 43 para o teste, no gráfico da Figura 44 para a réplica 01 e, no gráfico da Figura 45, para a réplica 02, em que representam a média das cinco medições para cada parâmetro de rugosidade, na condição de usinagem do corpo de prova 04.

A Figura 43 mostra o resultado do ensaio com relação à superfície usinada no ensaio do CP04 – teste. Quando comparado o CP04 – teste com o CP03 – teste, verificam-se resultados de rugosidade muito semelhantes; porém, cabe ressaltar valores relevantes como contribuição deste trabalho. Por exemplo, as rugosidades dos pontos P2, P6 e P9 com Ra de 0,3 μm , uma vez que valores comuns para o fresamento são de aproximadamente 1,6 μm e valores atingíveis e possíveis na casa de 0,4 μm (DIN 4766, 1981).

No exemplo do ponto P2, o diâmetro efetivo é de 11,97 mm. A velocidade rotacional utilizada foi de 3.989 rpm e a velocidade de avanço de 1.633 mm/min, tendo como resultante uma velocidade de corte de 150 m/min. Já para o CP03 – teste, o valor da rugosidade em Ra 0,5 μm , com uma velocidade rotacional utilizada de 2.387 rpm e uma velocidade de avanço 954 mm/min, resulta em uma velocidade de corte de 90 m/min. Neste ponto específico, houve uma melhora na qualidade superficial na ordem de 40% e um ganho de produtividade na ordem de 42%.

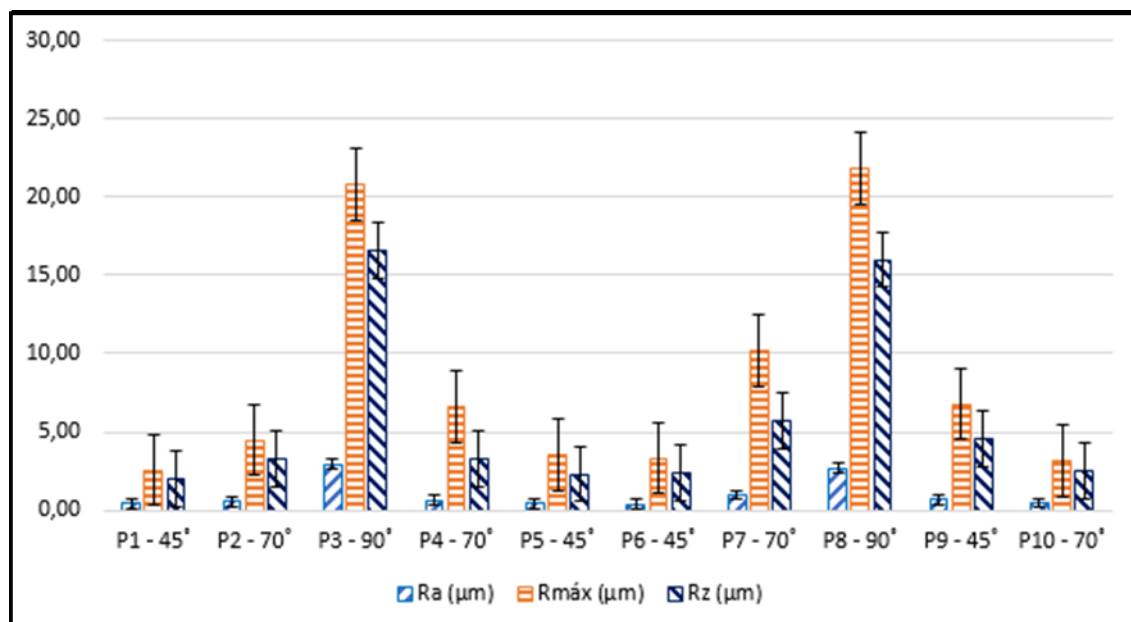
Figura 43 – Rugosidade CP04 – Teste



Fonte: Elaboração do autor (2018).

A Figura 44 mostra a análise do efeito provocado pelo desgaste no inserto da superfície usinada, na réplica 01, em que retirou-se um volume de 33.128 mm³ de cavaco em quatro passes de 8.282 mm³.

Figura 44 – Rugosidade CP04 – Réplica 01

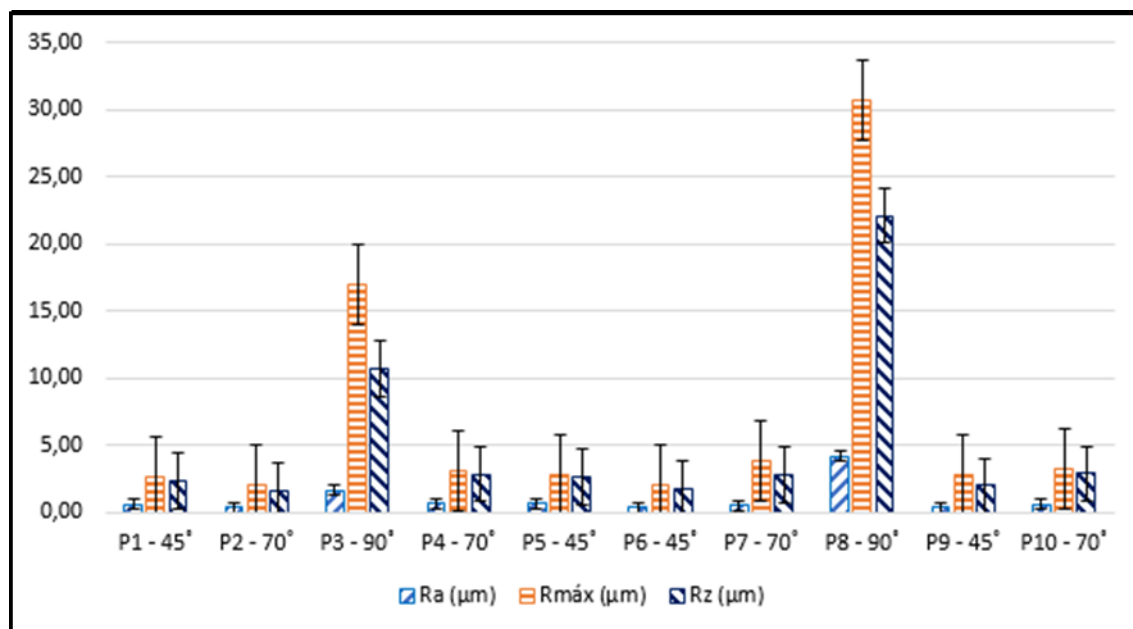


Fonte: Elaboração do autor (2018).

Verifica-se uma redução de rugosidade em alguns pontos, condição esperada no ensaio; além disso, com um padrão mais homogêneo comparado com o CP03 – réplica 01. O menor valor no parâmetro de rugosidade Ra é de 0,38 μm no P6, em que a ferramenta atua na descendente em uma inclinação a 45°. Nos pontos P1 e P5, o valor do parâmetro Ra é um pouco superior 0,40 μm, em que a ferramenta atua na ascendente para o P1 e na descendente para o P5, ambos a uma inclinação de 45°. Fazendo uma análise conjunta entre os pontos P1, P2, P4, P5, P6, P9 e P10, pode-se observar uma diferença muito pequena entre o maior valor de rugosidade no parâmetro Ra de 0,68 μm no ponto P9, para um Ra de 0,38 no P6, sendo, assim, de 0,3 μm. O ponto P7 apresenta uma condição distinta dos demais, em que a ferramenta atua na descendente a uma inclinação de 70°, com um valor Ra de 0,98 μm. Para o ponto P3, a rugosidade no parâmetro Ra é de 2,95 μm e, no ponto P8, a rugosidade é de 2,65 μm; em ambos os casos, a ferramenta atua com seu centro na usinagem. Os resultados mais homogêneos podem ser evidenciados também em uma análise nos parâmetros Rmax e Rz; sendo assim, estes parâmetros mais próximos tornam-se uma contribuição relevante para este trabalho.

No gráfico da Figura 45, observa-se que os resultados obtidos na réplica 02 reiteram as mesmas considerações apresentadas no teste inicial. Para a usinagem com inserto novo, o gráfico demonstra valores semelhantes da rugosidade, assim como o comportamento em cada ponto, validando o experimento para a análise estatística.

Figura 45 – Rugosidade CP04 – Réplica 02



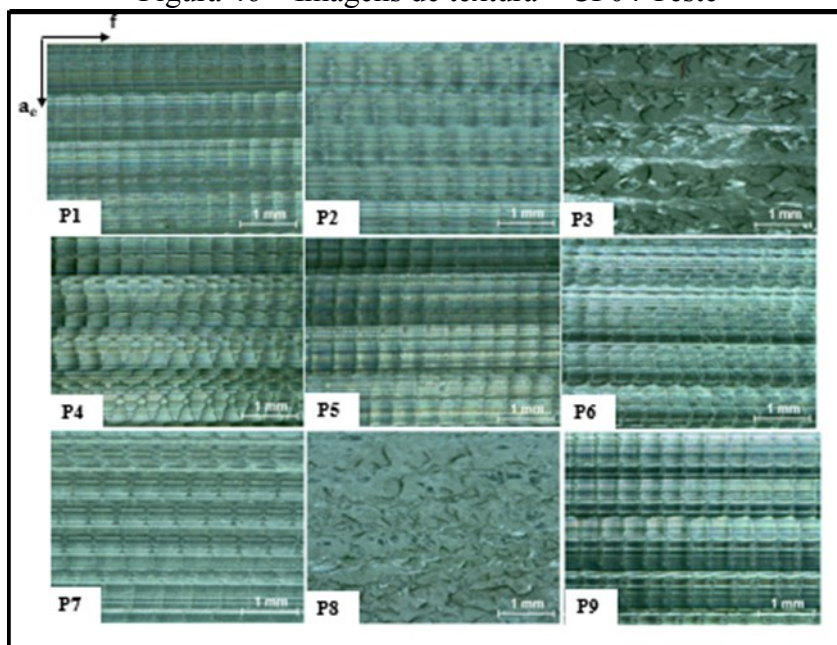
Fonte: Elaboração do autor (2018).

Para comparativo entre os pontos dentro do CP04 teste e réplica 02, foram unificados os valores de medição do teste e da réplica, a fim de verificar, mediante a metodologia da análise de variância, se existem diferenças entre os pontos do CP04. A análise resultou na rejeição de H_0 , ou seja, foi confirmado que existem pontos diferentes entre si. Com o resultado da diferença mínima significativa, pelo teste *t-student*, identificou-se que as diferenças aparecem nas comparações com os pontos P3 e P8, regiões que apresentam maiores valores de rugosidade, em função do amassamento do material, no momento do corte. A metodologia permitiu identificar que entre os demais pontos não há distinção significativa. A diferença entre o ponto P4 e P10, identificada na usinagem do CP03 teste e réplica 02, foi equalizada para a condição de usinagem do CP04 teste e réplica 02, possivelmente pelo cálculo mais adequado dos parâmetros de corte, em cada região de contato entre ferramenta e peça.

4.4.2 Análise de textura para o CP04

Observa-se na Figura 46 CP04 – teste, na Figura 47 CP04 – réplica 01 e na Figura 48 CP04 – réplica 02, o unificado de imagens geradas do ponto P1 ao P9 para a quarta amostra, em complemento aos dados de rugosidade obtidos. As imagens são demonstradas com ampliação de 15 vezes e fotografias ao centro do corpo de prova a cada ponto.

Figura 46 – Imagens de textura – CP04 Teste



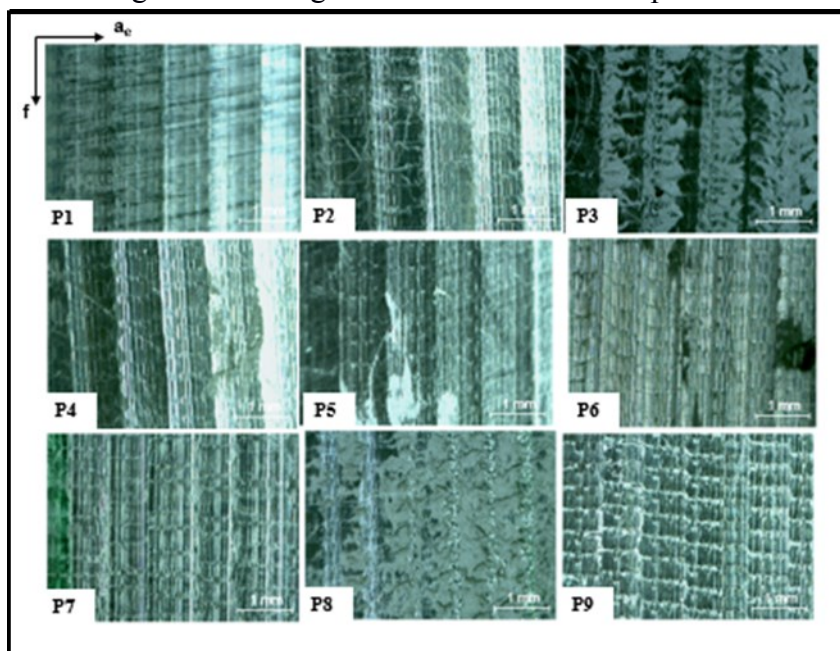
Fonte: Elaboração do autor (2018).

Conforme os resultados obtidos no gráfico da Figura 43, observa-se na Figura 46 que todos os pontos permitem a identificação da passagem da ferramenta, exceto o ponto P8. As irregularidades na formação da superfície e o formato alongado das células também podem ser observados em alguns pontos. No ponto P3, mesmo onde a ferramenta atua perpendicularmente à superfície usinada, em que não ocorre o corte por cisalhamento, mas sim o amassamento do material, pode-se observar, de forma sutil, o caminho da ferramenta evidenciando o melhor resultado da rugosidade. No ponto P4 identifica-se que houve algum tipo de instabilidade, que pode ter ocorrido devido à vibração no processo, em função da estratégia descendente, somado à utilização da parte mais central do gume.

Para o ensaio do CP04 – réplica 01, em que retirou-se uma quantidade de material quatro vezes maior, a fim de provocar um desgaste do inserto, observa-se na Figura 47 que existe maior homogeneidade da superfície em vários pontos e com fácil identificação das linhas de passagem da ferramenta. Pode-se observar que tanto no ponto P3 quanto no ponto P8, regiões onde a ferramenta atua perpendicularmente à superfície na usinagem, fica notória

a passagem da ferramenta. As imagens contextualizam o resultado obtido no gráfico da Figura 44, em que pode-se obter um resultado mais homogêneo, que valida a estratégia utilizada.

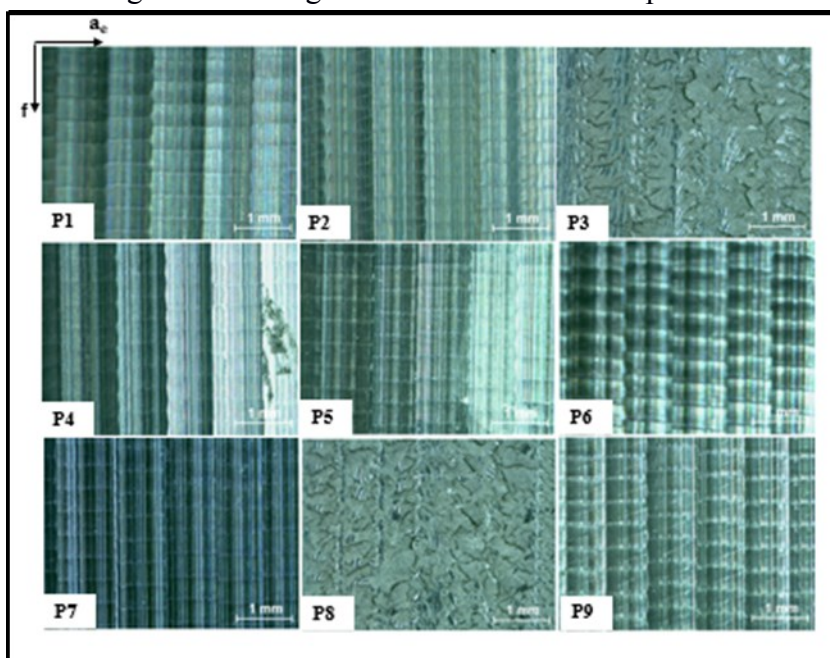
Figura 47 – Imagens de textura CP04 – Réplica 01



Fonte: Elaboração do autor (2018).

Da mesma forma para o ensaio CP04 – réplica 02, identifica-se, na Figura 48, que as imagens evidenciam irregularidades na formação da superfície e um formato alongado das células em alguns pontos.

Figura 48 – Imagens de textura CP04 – Réplica 02



Fonte: Elaboração do autor (2018).

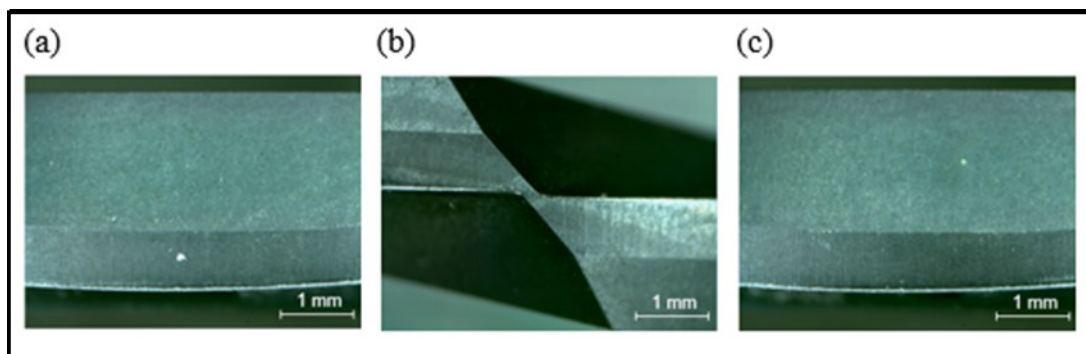
No ponto P4, pode-se observar material aderido, em que a ferramenta atua na descendente em uma inclinação a 70° , nesta região a usinagem é feita em condições próximas ao centro da ferramenta. Pode-se identificar o caminho da passagem da ferramenta em todos os pontos, até mesmo nos P3 e P8. Nos pontos P3 e P8, a ferramenta atua perpendicularmente à superfície na usinagem, e o corte por cisalhamento não ocorre de forma ideal. As imagens de forma geral complementam os resultados encontrados no gráfico da Figura 45, que mostra as medições da rugosidade e valida a estratégia utilizada.

4.4.3 Desgaste dos insertos na usinagem CP04 – Réplica 01

Na usinagem das três amostras com a estratégia e os parâmetros definidos para o corpo de prova CP04, em que utilizou-se um inserto novo para cada ensaio, somente a réplica 01 apresentou desgaste no gume de corte. Este desgaste foi provocado devido ao maior volume de cavaco retirado da peça, a fim de provocar uma usinagem com tempo maior.

Diferentemente do CP03 – réplica 01, em que o desgaste ocorreu de forma uniforme, o CP04 – réplica 01 apresentou um desgaste distinto para cada ponto medido. A Figura 49 demonstra, com ampliação de 15 vezes, na letra (a) o gume 1 medido a 45° de inclinação, em que o desgaste foi de 0,04 mm; na letra (b) a ponta do inserto medido perpendicularmente à superfície, em que o desgaste foi de 0,05 mm e na letra (c) o gume 2 é medido a 45° de inclinação, e o desgaste foi de 0,06 mm. A diferença do desgaste em cada ponto medido pode ter influência direta nos erros da medição, pois trata-se de valores muito próximos e de difícil qualificação.

Figura 49 – Fotos do inserto CP04 – Réplica 01



Fonte: Elaboração do autor (2018).

4.5 COMPARATIVO ENTRE CP03 E CP04

A análise de variância ANOVA foi aplicada em comparativo entre os corpos de prova CP03 e CP04, porém sendo avaliados ponto a ponto. Concluiu-se que para os pontos P1 (45°, ascendente), P2 (70°, ascendente), P5 (45°, descendente) e P8 (90°), aceita-se H_0 , ou seja, pode-se considerar que não há ganhos significativos na qualidade superficial nestes pontos, quando comparados o CP03 com o CP04.

A ANOVA permitiu identificar diferenças significativas nos pontos P3 (90°), P4 (70°, descendente), P6 (45°, descendente), P7 (70°, descendente), P9 (70°, ascendente). Para os pontos citados houve melhoria da qualidade superficial do CP04 (parâmetros de corte calculados ponto a ponto), em relação ao CP03 (parâmetros de corte fixos). Pode-se ressaltar uma redução no R_a , por exemplo no ponto P3, em que a relação ao CP03 chega a ter aproximadamente 173% de ganho em qualidade superficial, o que justifica-se pelo aumento dos parâmetros de corte na estratégia do CP04. Por mais que neste ponto ocorra o fenômeno de amassamento do material, é nesta região que a ferramenta está com a maior rotação e velocidade de avanço; justifica-se assim o ganho em qualidade superficial neste ponto. O único ponto que não teve melhoria na qualidade superficial foi o ponto P10, em que a ANOVA sinalizou a diferença entre pontos. Quando analisam-se as médias do CP03 com o CP04, verifica-se que, para o CP04, o ponto P10 teve aumento no parâmetro de R_a de aproximadamente 43%.

A análise entre CP'S pode ser visualizada a partir da ótica em que a ANOVA demonstrou que não há diferenças de valores entre os corpos de prova. O P1, por exemplo, ponto em que a análise de variância aceitou H_0 , demonstra similaridade de resultados. Pode-se destacar também que a mudança de raios dos corpos de prova do teste, em relação à réplica, não impactou alterações significativas de resultado.

4.6 TEMPO DE PROCESSO

O tempo de processo é a resultante dos movimentos ativos e passivos na fabricação de uma peça. Este trabalho apresenta um tópico relevante que é o comparativo do tempo de processo, que cada estratégia adotada leva para usinar a amostra. A proposta na usinagem do CP04 foi utilizar o diâmetro efetivo no cálculo da velocidade rotacional, conforme a região de contato da ferramenta com a peça. Esta condição aumenta os parâmetros de corte e

proporciona, segundo König e Klocke (2008), além de ganhos na qualidade superficial, a redução em tempo de processo.

Pode-se ressaltar que existe ganho em tempo de usinagem do CP04 em relação ao CP03, visto que existe o ajuste da velocidade rotacional, mediante o diâmetro efetivo. Consequentemente, aumenta-se a velocidade de avanço (mm/min) e, com isso, a ferramenta percorre o mesmo comprimento de usinagem de forma mais rápida, quando comparado aos parâmetros adotados ao corpo de prova CP03. Tendo em vista a utilização do diâmetro nominal para o cálculo da velocidade rotacional e de avanço, a mesma permanece constante em toda a usinagem.

Durante a usinagem da réplica 02 para o CP03 e CP04, mensurou-se o tempo de processo, desde o ponto inicial do programa de usinagem; ponto este definido como o zero máquina, até completar a usinagem da peça. A Tabela 3 mostra os tempos medidos em cada estratégia, em que houve um ganho percentual de 29% do CP04 em relação ao CP03.

Tabela 3 – Comparativo de tempos

Corpo de prova	Parâmetro de corte	Estratégia	Tempo de usinagem
CP03	Fixos	Transversal	49'18"
CP04	Variável	Transversal	38'22"
Ganho percentual em tempo			29%

Fonte: Elaboração do autor (2018).

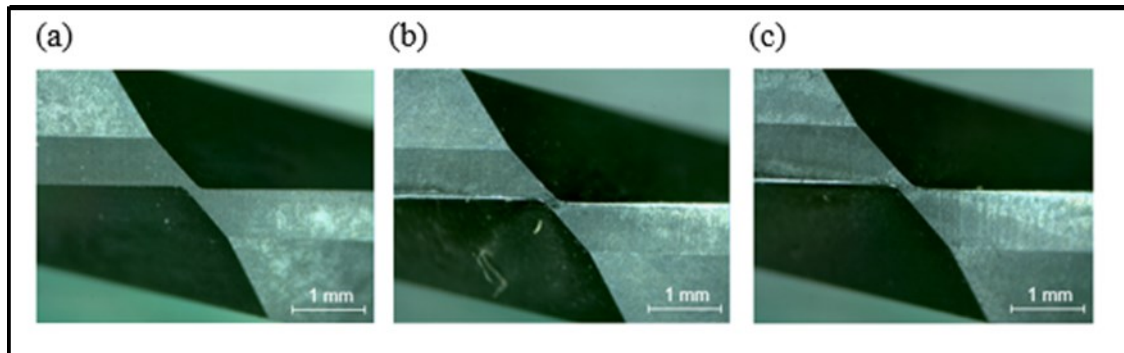
4.7 DESGASTE DA FERRAMENTA

As ferramentas de corte estão sujeitas a solicitações térmicas e mecânicas, nas quais o motivo do desgaste está na combinação do efeito de altas temperaturas e fortes carregamentos mecânicos na usinagem. (KLOCKE, 2011). Este trabalho teve como objetivo compreender as vantagens e limitações nas diferentes estratégias ensaiadas, a fim de determinar o melhor método a ser utilizado, com relação à vida da ferramenta. A vida da ferramenta pode ser definida como sendo o tempo em que a mesma atua efetivamente, sem perder o corte ou até atingir o critério previamente estabelecido.

O desgaste apresentado em ambas as estratégias ensaiadas foi o de flanco. O desgaste de flanco ocorre devido à abrasão causada por elementos duros no material da peça, sendo o desgaste mais comum e preferível porque oferece um controle estável à vida da ferramenta. (KLOCKE, 2011). A Figura 50 mostra, em ampliação de 15 vezes, na letra (a) a ponta de um inserto novo sem desgaste, a letra (b) a ponta do inserto do corpo de prova CP03, que

apresenta um desgaste de flanco de 0,07 mm e a letra (c) a ponta do inserto do corpo de prova CP04 que apresenta um desgaste de flanco de 0,06 mm.

Figura 50 – Comparação dos insertos – Réplica 01



Fonte: Elaboração do autor (2018).

O ganho percentual na utilização da estratégia proposta, com relação à vida da ferramenta, foi na ordem de 14%, na comparação da estratégia com parâmetros fixos. Para ambos os insertos retirou-se a mesma quantidade de cavaco com volume constante de 33.128 mm^3 , em quatro passes de 8.282 mm^3 . Decidiu-se pela comparação na ponta do inserto, pois é onde existem os maiores efeitos com relação à variação da velocidade de corte na usinagem.

5 CONCLUSÃO

Em virtude dos ensaios realizados para os quatro corpos de prova, foi possível compreender a influência das estratégias de corte adotadas, com relação à qualidade superficial e ao desgaste da ferramenta, mediante a variação dos parâmetros da velocidade rotacional e do avanço. Ao analisar os resultados apresentados, conclui-se que o aumento dos parâmetros de corte tendem a melhorar a qualidade superficial da amostra usinada, assim como reduzir o desgaste da ferramenta, o que vai ao encontro da bibliografia pesquisada.

Em vista dos argumentos apresentados, não foi possível chegar a resultados conclusivos para a estratégia de usinagem longitudinal, quando comparada ao processo com os parâmetros de corte fixos (CP01) e de corte variáveis (CP02) pela limitação da máquina de usinagem, conforme citado no capítulo anterior. Apesar da limitação da máquina para comparativo entre os corpos de prova CP01 e CP02, é possível afirmar que, em ambas as amostras, os pontos P3 e P8 diferenciam-se dos demais, em função do amassamento do material, quando a ferramenta atua principalmente com seu centro. Mesmo com o amassamento do material, no ponto P3 conclui-se que houve melhora nos níveis de rugosidade pelo aumento dos parâmetros de corte, em que por exemplo, o parâmetro Ra teve uma redução de 33% no corpo de prova CP02, em relação ao CP01. Pode-se considerar que para parâmetros de corte fixos, no caso do corpo de prova CP01, melhores resultados são identificados, quando a ferramenta atua mais próxima de seu diâmetro nominal (pontos a 45°). Para os corpos de prova com usinagem transversal, sendo para parâmetros de corte fixos (CP03) e variáveis (CP04), foi possível concluir que, quando analisados individualmente, os pontos P3 e P8 também diferem dos demais, em função do amassamento do material nessa região de contato da ferramenta com a peça, por conta da velocidade de corte no centro da fresa tender a zero, tornando assim a região mais crítica para operação. No corpo de prova CP03, o ponto P4 mostra uma diferença significativa, em relação ao ponto P10, o que leva a concluir que a condição ascendente pode ser mais favorável no aspecto de qualidade superficial, quando a usinagem ocorre no sentido transversal da peça, com parâmetros de corte fixos. As imagens geradas em cada ponto possibilitaram complementar os dados de rugosidade e entendimento dos resultados.

A comparação entre os corpos de prova CP03 e CP04, para cada ponto analisado, permite afirmar que é vantajoso realizar os cálculos dos parâmetros de corte, utilizando-se o diâmetro efetivo da ferramenta para a usinagem. Dos dez pontos analisados, com relação à

qualidade superficial, observou-se melhoria em cinco pontos, em quatro pontos a qualidade se manteve igual e, em apenas um ponto, obteve-se redução de qualidade superficial.

Para a condição de usinagem do CP04, foi possível concluir que os ajustes nos parâmetros de corte equalizaram a diferença significativa entre os pontos P4 e P10, identificada na usinagem com parâmetros fixos, mantendo apenas em evidência as diferenças significativas nos pontos P3 e P8.

Para finalizar, por mais que já seja justificável a aplicação dos parâmetros de corte corrigidos em superfícies complexas, pelo ganho em qualidade superficial, destaca-se o resultado obtido em produtividade, na redução do tempo de processo na ordem de 29%, assim como o aumento da vida útil da ferramenta de aproximadamente 14%, quando comparado a parâmetros usuais da indústria, para a condição de usinagem na direção transversal.

6 SUGESTÃO PARA NOVOS TRABALHOS

O grande número de variáveis envolvidas neste estudo permite que sejam sugeridas algumas alternativas de trabalhos futuros, em torno deste tema. Abaixo estão listadas algumas sugestões identificadas:

- a) realizar o experimento novamente em um centro de usinagem com velocidade rotacional superior a 30.000 rpm e com uma aceleração acima de 3G, a fim de comprovar as vantagens obtidas;
- b) replicar o ensaio com a utilização do diâmetro de contato entre a ferramenta e a peça e confrontar com os resultados obtidos neste experimento;
- c) realizar um experimento com a utilização de um cabeçote com insertos a 45° na usinagem de uma superfície plana, mediante a mesma metodologia utilizada neste trabalho;
- d) realizar o ensaio com fresas de metal duto inteiriço, para confronto dos resultados;
- e) estudar e aplicar modelos matemáticos para a condição proposta neste estudo, a fim de confrontar os resultados obtidos;
- f) correlacionar, por meio de modelos matemáticos, os perfis de rugosidade com as imagens de textura geradas, com o intuito de identificar e prever tendências no comportamento da superfície; e
- g) realizar estudos para o entendimento da vibração a atuação das forças de usinagem, em pontos que não apresentaram melhora na qualidade superficial, entre os corpos de prova.

REFERÊNCIAS

- BAPTISTA, A. L. D. B. Aspectos metalúrgicos na avaliação da usinabilidade de aços. **Revista Escola de Minas**, 2002. ISSN 1807-0353. Disponível em: <http://www.scielo.br>. Acesso em: 26 abr. 2018.
- BAPTISTA, R.; SIMÕES, J. F. A. Three and five axes milling of sculptured surfaces. **Journal of Materials Processing Technology**, p. 398-403, dez. 1999.
- BERTÉLI, M. O. **Testes de comparação de médias**. Notas de Aula. 18 slides, color. Caxias do Sul. 2018.
- BET, L. **Estudo da medição da textura de superfícies com sondas mecânicas e sondas ópticas tipo seguidor**. 1999. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis – SC, 1999.
- BORBA, V. R. **Análise da força de usinagem e da rugosidade no torneamento de aços endurecidos com ferramentas de PCBN e de metal-duro**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2016.
- BOUJELBENE, M. et al. Productivity enhancement in dies and molds manufacturing by the use of C1 continuous tool path. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 44, p. 101-107, ago. 2004.
- CHEN, S. J.; HUANG, K. Y.; CHEN, S. M. Feedrate optimization and tool profile modification for the high-efficiency ball-end milling process. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 45, p. 1070-1076, 2005.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2002.
- COSTA, H. N. D. Parâmetros de avaliação da rugosidade (acabamento superficial). **Moldes Injeção Plásticos**, 2018. Disponível em: <http://moldesinjecao plasticos.com.br/parametros-de-avaliacao-da-rugosidade-acabamento-superficial>. Acesso em: 25 jul. 2018.
- DAVIM, J. P. (ed.). **Machining: fundamentals and recent advances**. University of Aveiro - Portugal: Springer, 2008.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8. ed. São Paulo: Artliber, 2013.
- DOBLER, J. K. **Estudo comparativo de estratégias de usinagem na fabricação de um molde de alumínio**. 2014. Monografia (Engenharia Mecânica) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - Unijuí. Panambi – RS, 2014. p. 27.
- ERDIM, H.; LAZOGLU, I.; OZTURK, B. Feedrate scheduling strategies for free-form surfaces. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 46, p. 747-757, 2006.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blucher, 1970. v. 1.

FIKLER, M. **Desenvolvimento de compósitos utilizando matriz de polietileno e fibras do resíduo de malharia**. 2005. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul – RS, 2005. p. 56.

FILHO, M. S. D. S. **Fresamento por regiões como uma alternativa na usinagem de cavidades para moldes de injeção através de sistemas CAD/CAM**. 2000. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2000. p. 121.

FRACARO, J. **Fabricação pelo processo de usinagem e meios de controle**. Curitiba – PR: Intersaberes, 2017. v. 1.

GOMES, J. D. O. **Fabricação de superfícies de forma livre por fresamento no aço temperado ABNT 420, na liga de alumínio AMP 8000 e na liga de cobre Cu-Be**. 2001. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis – SC, 2001. p. 166.

GOMES, J. D. O. Análise da utilização de fresas de topo esférico de dentes helicoidais e de dentes retos no acabamento de superfícies complexas no aço SAE H13 (48 HRC). In: COBEF - CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 2., 2003, Uberlândia – MG. **Anais [...]** Maio 2003. p. 1-10,

HAMDAN, A.; SARHAN, A. A. D.; HAMDI, M. An optimization method of the machining parameters in high-speed machining of stainless steel using coated carbide tool for best surface finish. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 58, p. 81-91, 2012.

JUNG, T.-S.; YANG, M.-Y.; LEE, K.-J. A new approach to analysing machined surfaces by ball-end milling, part I. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 25, p. 833-840, 2005.

KISHAWY, H. A. et al. "Effect of coolant strategy on tool performance, chip morphology and surface quality during high-speed machining of A356 aluminum alloy. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 45, p. 219-227, 2005.

KLOCKE, F. **Manufacturing processes 1**. RWTH. ed. Steinbachstr. Germany: Springer, 2011. v. 1.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren 1 - Drehen, Fräsen, Bohren**. 8. ed. Berlin: Springer- Verlag, 2008.

MACEDO, M. C. D.; GOMES, Í. R. B.; SOUZA, L. G. M. D. Caracterização de amostras por microscopia óptica e por microdureza de materiais metálicos ferrosos e não ferrosos. **Revista de Educação, Ciência e Tecnologia do IFRS**, Campus Porto Alegre, p. 48-61, 2015. v. 2.

MACHADO, Á. R. *et al.* **Teoria da usinagem dos materiais**. 2. ed. São Paulo – SP: Edgar Blucher, 2011. v. 1.

MESQUITA, N. G. D. M. D. **Avaliação e escolha de uma superfície segundo sua função e fabricação**. 1992. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 1992. p. 6.

- MOREIRA, C. Microscópio ótico. **Ciência Elementar**, v. 1, p. 1-3, out./dez. 2013.
- NEVES, D. **Uma contribuição ao fresamento de matrizes com fresa de topo**. 2002. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 2002.
- NICOLA, G. L. **Análise de Superfícies Fresadas por Diferentes Estratégias em Aço AISI H13 Endurecido**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul – RS, 2008.
- NICOLA, G. L.; MISSELL, F. P.; ZEILMANN, R. P. Surface quality in milling of hardened. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 49, p. 53-69, 2010.
- OLIVEIRA, A. C. D. **Programação de estratégias de fresamento a altas velocidades (HSM) na manufatura de molde e matrizes através de sistemas CAM**. 2002. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002. p. 155.
- OLIVEIRA, J. M. **Caracterização da integridade de superfícies usinadas para produção de moldes e matrizes**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul – RS, 2006. p. 34-110.
- OST, C. A. **Análise da qualidade superficial no fresamento de aço P20 com diferentes tratamentos de ferramentas e condições de lubrificantes**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul – RS, 2016. p. 33-34.
- PAUCKSCH, E. *et al.* **Zerspantechnik: Prozesse, Werkzeuge, Technologien**. 12. ed. Vieweg-Teubner: Kindle Edition, 2008.
- PEREIRA, P. Blog da mecânica. **Acabamento superficial**, 2014. Disponível em: <http://mecanica-blog.blogspot.com.br/2014/09/acabamento-superficial.html>. Acesso em: 27 abr. 2018.
- PIVETTA, S. C. **Uma contribuição ao estudo do fresamento de aço endurecido com fresa de topo esférico**. 2005. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 2005. p. 110.
- POLLI, M. L. **Análise da estabilidade dinâmica do processo de fresamento a altas velocidades de corte**. 2005. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2005. p. 145.
- REBEYKA, C. J. **Princípios dos processos de fabricação por Usinagem**. Curitiba – PR: Intersaberes, 2016. v. 1.
- RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. S. T. **Projeto de experimentos: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UFRGS, Porto Alegre**, 2011. p. 142.
- SADÍLEK, M. *et al.* Aspects of using tool axis inclination angle. **Journal of Mechanical Engineering**, v. 57, p. 681-688, 2011.

SALAMI, R.; SADEGUI, M. H.; MOTAKEF, B. Feed rate optimization for 3-axis ball-end milling of sculptured surfaces. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 15, p. 760-767, dez. 2006.

SANDVIK. **Manual Técnico de Usinagem**, Suécia, 2012.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. São Paulo – SP: Artliber, 2007. v. 1.

SCANDIFFIO, I.; DINIZ, A. E.; SOUZA, A. F. D. Evaluating surface roughness, tool life, and machining force when milling free-form shapes on hardened AISI D6 steel. **Int J Adv Manuf Technol**, p. 2075-2086, jul. 2016.

SCANDIFFIO, I.; DINIZ, A. E.; SOUZA, A. F. D. The influence of tool-surface contact on tool life and surface roughness when milling free-form geometries in hardened steel. **Int J Adv Manuf Technol**, v. 92, p. 615-626, 2017.

SCHROETER, F. G. E. E. R. B. Influência dos parâmetros de corte no fresamento frontal de ferro fundido cinzento GG25 com ferramentas de cerâmica. **Máquinas e Metais**, v. 53, p. 44-60, Maio 2017.

SECCO, D. D. C. **Fresamento de aço para moldes e matrizes em condições criogênicas**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho Faculdade de Engenharia Campos de Ilha Solteira. Ilha Solteira – SP, 2015.

SME. **Tool and manufacturing engineers handbook**. 4. ed. Dearborn/Michigan: SME, Quality control and assembly, cap. 5 Surface technology, v. IV, 1987.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.

SOARES, L. R. D. L. **Fresamento do aço SAE 4340 temperado e revenido utilizando ferramentas de metal duro recobertas**. 2017. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Guaratinguetá – SP, 2017. p. 37.

SOUZA, A. F. D. **Contribuições ao fresamento de geometrias complexas aplicando a tecnologia de usinagem com altas velocidades**. 2004. Tese (Doutorado) – Universidade de São Carlos, São Carlos – SP, 2004.

SOUZA, A. F. D. et al. Investigating the cutting phenomena in free-form milling using a ball-end cutting tool for die and mold manufacturing. **Int J Adv Manuf Technol**, p. 1565-1577, jan. 2014.

SOUZA, A. F. D. **Usinagem em altas velocidades (HSC)**. Disponível em: <http://moldesinjecaoplasticos.com.br/usinagem-em-altas-velocidades-hsc/>. Acesso em: 21 set. 2018.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 6. ed. Florianópolis: UFSC, 2005a. v. 1.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II**. 3. ed. Florianópolis: UFSC, 2005b.

TABENKIN, A. Moder machine stop. **Surface Finish A Machinist's Tool. A Design Necessity**, 1999. Disponível em: <https://www.mmsonline.com/articles/surface-finish-a-machinist39s-tool-a-design-necessity>. Acesso em: 27 abr. 2018.

TOH, C. K. **Cutter path orientations when high-speed finish milling inclined hardened stell**. Advanced Manufacturing Technology: Springer, 2005.

TSCHATTSCH, H. **Applied machining technology**. Dresden - Germany: Springer, 2009. v. 1.

VACARO, T. **Otimização do fresamento de topo esférico de planos inclinados aplicando o método de algoritmos genéticos**. 2013. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul – RS, 2013.

VAKONDIOS, D. *et al.* Influence of milling strategy on the surface roughness in ball end milling. **Measurement**, v. 45, p. 1480-1488, 2012.

VAN DER VOORT, G. Optical microscopy. *In*: EDITION, T. **Metals Handbook**. [S.l.]: American Society for Metals, v. 9, 1985. p. 71.

WECK, M. Handbook of machine tools. **Metrological Analysis and Performance**, Aachen, v. 4, 1984.

WEINGAERTNER, W. L. *et al.* Influência das características do suporte da ferramenta sobre a estabilidade dinâmica na usinagem do aço ABNT H13. **Máquinas e Metais**, p. 64-75, abr. 2007.

WITTE, H. **Máquinas ferramenta: elementos básicos de máquinas e técnicas de construção**. 7. ed. São Paulo: Hemus, 1998. v. 1.

WRUBLAK, O.; PILATTI, L. A.; PEDROSO, B. Parâmetros e métodos de usinagem e sua relação com os custos de processo e o acabamento final do produto. *In*: ENCONTRO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA DO CAMPOS GERAIS, 4., 2008, Paraná. **Anais [...]**

ZEILMANN, R. P. **Ensaio Experimental 03 – EE03: a avaliação dos critérios de usinabilidade do aço AISI H13 – Ensaio de variação dos parâmetros de corte com ferramenta de topo esférico, d = 6 mm**. Universidade de Caxias do Sul – UCS, Caxias do Sul - RS. 2003.

ZEILMANN, R. P.; SANTIN, R.; NICOLA, G. L. Qualidade superficial em fresamento de topo esférico. **Máquinas e Metais**, p. 152-159, out. 2006.

APÊNDICE A – RUGOSIDADE DO TESTE, RÉPLICA 01 E RÉPLICA 02

Da Tabela 4 a 27, apresentam-se os valores de rugosidade medidos no ensaio-teste, réplica 01 e réplica 02, em que consideram-se as cinco medições para cada ponto, nos parâmetros Ra, R_{máx} e Rz.

Tabela 4 – Medições Ra CP01 – Teste

CP01 – Ra								
Pontos	1	2	3	4	5	Soma	Média	Desvio padrão
P1	0,61	0,63	0,58	0,71	0,77	3,30	0,66	0,08
P2	0,71	1,19	1,10	0,73	0,91	4,64	0,93	0,22
P3	4,66	4,05	4,85	4,39	4,96	22,91	4,58	0,37
P4	0,65	0,65	0,89	0,73	0,77	3,69	0,74	0,10
P5	0,46	0,55	0,53	0,53	0,42	2,49	0,50	0,06
P6	0,58	0,65	0,60	0,50	0,59	2,92	0,58	0,05
P7	0,84	1,02	1,05	1,01	0,89	4,81	0,96	0,09
P8	7,39	6,27	6,82	5,30	5,67	31,45	6,29	0,84
P9	0,84	0,92	0,87	0,89	0,78	4,30	0,86	0,05
P10	1,01	1,06	1,12	0,83	0,97	4,99	1,00	0,11

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 5 – Medições R_{máx} CP01 – Teste

CP01 – R _{máx}								
Pontos	1	2	3	4	5	Soma	Média	Desvio padrão
P1	2,74	3,27	3,05	4,11	3,27	16,44	3,29	0,51
P2	3,77	12,12	9,91	3,96	4,59	34,35	6,87	3,88
P3	27,32	26,49	42,29	29,60	31,11	156,81	31,36	6,38
P4	3,29	3,79	4,28	4,29	3,59	19,24	3,85	0,44
P5	3,52	3,03	3,33	3,42	3,44	16,74	3,35	0,19
P6	3,39	3,57	2,77	3,34	3,06	16,13	3,23	0,31
P7	4,19	7,15	5,60	7,51	5,13	29,58	5,92	1,39
P8	42,72	42,99	42,16	34,94	31,72	194,53	38,91	5,22
P9	3,77	5,86	3,72	3,84	3,35	20,54	4,11	1,00
P10	4,45	3,96	4,36	3,54	4,05	20,36	4,07	0,36

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 6 – Medições Rz CP01 – Teste

CP01 – Rz								
Pontos	1	2	3	4	5	Soma	Média	Desvio padrão
P1	2,56	2,89	2,68	3,17	3,03	14,33	2,87	0,25
P2	2,98	5,63	5,56	3,27	3,86	21,30	4,26	1,26
P3	23,53	21,00	29,03	24,27	25,25	123,08	24,62	2,93
P4	3,03	3,26	3,90	3,28	3,33	16,80	3,36	0,32
P5	2,70	2,66	2,90	2,85	2,65	13,76	2,75	0,12
P6	2,79	3,06	2,60	2,79	2,65	13,89	2,78	0,18
P7	3,77	4,97	5,07	5,12	4,40	23,33	4,67	0,58
P8	35,61	33,25	35,49	24,54	26,61	155,50	31,10	5,18
P9	3,22	3,90	3,28	3,40	3,90	17,70	3,54	0,33
P10	3,73	3,83	4,08	3,19	3,67	18,50	3,70	0,33

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 7 – Medições Ra CP02 – Teste

CP02 – Ra								
Pontos	1	2	3	4	5	Soma	Média	Desvio padrão
P1	0,60	0,91	0,59	0,54	0,71	3,35	0,67	0,15
P2	0,99	1,01	0,97	0,93	1,16	5,06	1,01	0,09
P3	3,60	3,52	2,77	3,52	3,77	17,18	3,44	0,39
P4	0,56	0,55	0,80	1,06	0,99	3,96	0,79	0,24
P5	0,89	0,63	0,59	0,79	0,48	3,38	0,68	0,16
P6	1,05	1,13	1,06	0,88	0,95	5,07	1,01	0,10
P7	0,66	0,47	0,83	0,75	0,65	3,36	0,67	0,13
P8	3,46	3,62	3,16	3,18	3,64	17,06	3,41	0,23
P9	1,08	1,14	1,08	1,24	1,15	5,69	1,14	0,07
P10	1,15	1,20	1,13	0,82	0,95	5,25	1,05	0,16

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 8 – Medições Rmáx CP02 – Teste

CP02 – Rmáx								
Pontos	1	2	3	4	5	Soma	Média	Desvio padrão
P1	5,65	4,70	3,25	2,84	3,52	19,96	3,99	1,16
P2	8,02	10,09	5,45	4,84	7,61	36,01	7,20	2,11
P3	20,63	25,23	18,52	24,50	18,49	107,37	21,47	3,23
P4	4,06	3,95	7,42	7,28	6,90	29,61	5,92	1,76

P5	4,75	3,12	5,11	3,74	2,84	19,56	3,91	0,99
P6	4,60	4,27	4,18	3,94	4,05	21,04	4,21	0,25
P7	3,87	2,89	3,98	3,87	3,66	18,27	3,65	0,44
P8	26,97	20,69	17,95	20,76	25,32	111,69	22,34	3,70
P9	5,02	4,77	4,93	6,16	8,48	29,36	5,87	1,56
P10	5,44	5,56	4,34	3,88	5,31	24,53	4,91	0,75

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 9 – Medições Rz CP02 – Teste

CP02 – Rz								
Pontos	1	2	3	4	5	Soma	Média	Desvio padrão
P1	3,46	3,85	2,91	2,60	3,01	15,83	3,17	0,49
P2	5,17	6,20	4,36	4,42	5,37	25,52	5,10	0,76
P3	17,29	16,53	14,81	18,97	17,31	84,91	16,98	1,51
P4	3,52	3,36	5,26	5,25	5,53	22,92	4,58	1,05
P5	3,77	2,69	3,15	3,54	2,60	15,75	3,15	0,51
P6	3,95	4,09	3,90	3,60	3,93	19,47	3,89	0,18
P7	3,25	2,51	3,88	3,37	3,13	16,14	3,23	0,49
P8	18,74	16,83	14,12	17,88	17,65	85,22	17,04	1,77
P9	4,57	4,54	4,33	5,34	6,47	25,25	5,05	0,88
P10	4,72	4,87	4,03	3,21	4,11	20,94	4,19	0,66

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 10 – Medições Ra CP03 – Teste

CP03 – Ra								
Pontos	1	2	3	4	5	Soma	Média	Desvio padrão
P1	0,31	0,38	0,54	0,56	0,51	2,30	0,46	0,11
P2	0,45	0,51	0,55	0,48	0,64	2,63	0,53	0,07
P3	7,12	6,36	7,81	6,28	6,63	34,20	6,84	0,63
P4	0,94	0,95	0,72	0,89	0,69	4,19	0,84	0,12
P5	0,47	0,59	0,54	0,41	0,52	2,53	0,51	0,07
P6	0,46	0,43	0,60	0,38	0,37	2,24	0,45	0,09
P7	0,61	0,57	0,58	0,64	0,59	2,99	0,60	0,03
P8	5,31	7,12	4,68	5,00	5,95	28,06	5,61	0,96
P9	0,43	0,58	0,59	0,50	0,50	2,60	0,52	0,07
P10	0,32	0,21	0,22	0,23	0,42	1,40	0,28	0,09

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 11 – Medições R_{máx} CP03 – Teste

CP03 – R_{máx}								
Pontos	1	2	3	4	5	Soma	Média	Desvio padrão
P1	1,96	2,03	2,29	2,61	3,37	12,26	2,45	0,57
P2	1,92	2,33	2,80	2,42	2,73	12,20	2,44	0,35
P3	45,00	42,21	52,85	48,32	39,93	228,31	45,66	5,10
P4	13,76	6,96	4,71	13,00	4,69	43,12	8,62	4,45
P5	2,47	2,70	3,61	1,86	2,26	12,90	2,58	0,65
P6	2,21	2,21	2,40	1,86	2,19	10,87	2,17	0,20
P7	3,24	2,73	2,61	3,75	2,69	15,02	3,00	0,49
P8	37,32	41,06	37,66	38,77	37,95	192,76	38,55	1,50
P9	2,16	3,65	2,82	2,23	2,45	13,31	2,66	0,61
P10	4,72	1,70	1,43	1,68	2,09	11,62	2,32	1,36

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 12 – Medições R_z CP03 – Teste

CP03 – R_z								
Pontos	1	2	3	4	5	Soma	Média	Desvio padrão
P1	1,74	1,94	2,14	2,22	2,34	10,38	2,08	0,24
P2	1,83	2,00	2,21	2,09	2,29	10,42	2,08	0,18
P3	35,60	33,11	39,16	33,85	31,62	173,34	34,67	2,89
P4	6,23	4,49	3,73	5,33	3,02	22,80	4,56	1,27
P5	2,08	2,14	2,47	1,75	2,13	10,57	2,11	0,26
P6	1,76	2,05	2,05	1,67	1,65	9,18	1,84	0,20
P7	2,72	2,39	2,28	2,78	2,47	12,64	2,53	0,21
P8	26,13	33,26	28,31	28,57	31,59	147,86	29,57	2,83
P9	1,88	2,66	2,61	1,87	2,11	11,13	2,23	0,39
P10	2,19	1,26	1,27	1,40	1,82	7,94	1,59	0,41

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 13 – Medições R_a CP03 – Réplica 01

CP03 – R_a								
Pontos	1	2	3	4	5	Soma	Média	Desvio padrão
P1	0,98	1,06	1,03	1,00	0,89	4,96	0,99	0,06
P2	0,47	0,48	0,43	0,40	0,34	2,12	0,42	0,06
P3	5,68	4,85	6,56	8,35	7,07	32,51	6,50	1,34
P4	0,72	0,67	0,72	0,43	0,69	3,23	0,65	0,12

P5	0,74	1,37	0,89	0,48	0,64	4,12	0,82	0,34
P6	1,48	1,24	1,46	1,42	1,36	6,96	1,39	0,10
P7	0,97	1,23	0,44	0,63	0,64	3,91	0,78	0,31
P8	4,65	5,38	6,08	4,85	6,37	27,33	5,47	0,75
P9	0,76	1,14	0,63	0,67	0,67	3,87	0,77	0,21
P10	1,00	0,92	1,04	1,20	1,02	5,18	1,04	0,10

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 14 – Medições R_{máx} CP03 – Réplica 01

CP03 – R_{máx}								
Pontos	1	2	3	4	5	Soma	Média	Desvio padrão
P1	3,77	4,77	4,76	4,59	4,01	21,90	4,38	0,46
P2	4,57	5,46	2,50	5,63	3,31	21,47	4,29	1,36
P3	37,18	36,22	49,50	82,15	48,45	253,50	50,70	18,63
P4	8,65	4,08	6,08	2,57	7,52	28,90	5,78	2,48
P5	5,83	49,83	7,01	3,90	6,50	73,07	14,61	19,72
P6	7,94	7,68	9,50	8,12	9,08	42,32	8,46	0,78
P7	10,46	18,07	3,58	3,72	4,06	39,89	7,98	6,34
P8	25,56	29,99	37,04	29,11	33,38	155,08	31,02	4,37
P9	4,62	18,64	2,83	3,12	2,58	31,79	6,36	6,91
P10	6,14	6,73	5,89	8,26	8,75	35,77	7,15	1,28

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 15 – Medições R_z CP03 – Réplica 01

CP03 – R_z								
Pontos	1	2	3	4	5	Soma	Média	Desvio padrão
P1	3,71	4,20	4,14	3,95	3,45	19,45	3,89	0,31
P2	2,78	3,68	2,19	2,80	2,55	14,00	2,80	0,55
P3	29,46	25,53	32,55	37,15	39,28	163,97	32,79	5,59
P4	4,30	3,16	3,89	2,23	3,75	17,33	3,47	0,80
P5	4,30	14,37	5,20	3,43	4,39	31,69	6,34	4,53
P6	7,29	6,31	7,77	7,29	6,98	35,64	7,13	0,54
P7	4,47	6,74	2,71	3,57	3,10	20,59	4,12	1,61
P8	23,04	25,98	29,04	26,07	29,76	133,89	26,78	2,70
P9	3,50	7,36	2,55	2,66	2,45	18,52	3,70	2,09
P10	5,06	5,52	5,22	6,55	6,55	28,90	5,78	0,72

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 16 – Medições Ra CP03 – Réplica 02

CP03 – Ra								
Pontos	1	2	3	4	5	Soma	Média	Desvio padrão
P1	0,58	0,52	0,51	0,41	0,59	2,61	0,52	0,07
P2	0,26	0,48	0,20	0,44	0,25	1,63	0,33	0,13
P3	6,83	5,16	4,22	5,60	6,71	28,52	5,70	1,09
P4	0,83	1,59	1,29	0,89	1,65	6,25	1,25	0,38
P5	0,54	0,50	0,52	0,60	0,37	2,53	0,51	0,08
P6	0,66	0,57	0,67	0,47	0,63	3,00	0,60	0,08
P7	0,80	0,68	0,65	0,58	0,58	3,29	0,66	0,09
P8	1,78	1,66	1,70	2,50	3,18	10,82	2,16	0,66
P9	0,85	0,64	0,97	0,81	0,82	4,09	0,82	0,12
P10	0,47	0,44	0,35	0,44	0,48	2,18	0,44	0,05

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 17 – Medições Rmáx CP03 – Réplica 02

CP03 – Rmáx								
Pontos	1	2	3	4	5	Soma	Média	Desvio padrão
P1	2,88	2,59	2,37	2,15	2,44	12,43	2,49	0,27
P2	5,34	6,35	2,98	5,29	5,91	25,87	5,17	1,30
P3	40,36	39,05	47,75	51,67	51,49	230,32	46,06	6,03
P4	7,31	15,26	14,05	7,97	13,00	57,59	11,52	3,64
P5	2,54	2,82	2,68	2,78	2,46	13,28	2,66	0,15
P6	2,83	2,32	3,66	2,71	3,02	14,54	2,91	0,49
P7	7,96	5,81	3,45	3,80	3,53	24,55	4,91	1,96
P8	17,38	15,78	10,64	30,88	27,86	102,54	20,51	8,53
P9	3,94	3,78	4,38	4,03	4,54	20,67	4,13	0,32
P10	2,29	2,27	2,12	2,24	2,29	11,21	2,24	0,07

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 18 – Medições Rz CP03 – Réplica 02

CP03 – Rz								
Pontos	1	2	3	4	5	Soma	Média	Desvio padrão
P1	2,37	2,36	2,05	1,91	2,28	10,97	2,19	0,20
P2	3,03	4,84	1,96	3,57	3,20	16,60	3,32	1,04
P3	32,96	24,91	22,90	30,37	38,30	149,44	29,89	6,21
P4	5,88	11,13	8,57	6,25	8,40	40,23	8,05	2,11

P5	2,35	2,35	2,29	2,57	1,93	11,49	2,30	0,23
P6	2,61	2,17	3,17	2,13	2,70	12,78	2,56	0,43
P7	4,72	3,64	3,11	3,11	3,25	17,83	3,57	0,68
P8	9,84	8,63	9,10	15,37	19,96	62,90	12,58	4,94
P9	3,59	3,04	3,78	3,38	3,81	17,60	3,52	0,32
P10	2,04	1,97	1,76	2,05	2,13	9,95	1,99	0,14

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 19 – Medições Ra CP04 – Teste

CP04 – Ra								
Pontos	1	2	3	4	5	Soma	Média	Desvio padrão
P1	0,46	0,64	0,56	0,62	0,70	2,98	0,60	0,09
P2	0,45	0,26	0,35	0,27	0,26	1,59	0,32	0,08
P3	1,37	1,89	2,15	1,15	1,49	8,05	1,61	0,40
P4	0,68	0,62	0,64	0,67	0,66	3,27	0,65	0,02
P5	0,67	0,51	0,64	0,66	0,69	3,17	0,63	0,07
P6	0,32	0,27	0,31	0,44	0,32	1,66	0,33	0,06
P7	0,52	0,55	0,73	0,44	0,38	2,62	0,52	0,13
P8	3,79	4,34	4,32	3,81	4,68	20,94	4,19	0,38
P9	0,36	0,35	0,30	0,21	0,36	1,58	0,32	0,06
P10	0,62	0,61	0,67	0,49	0,48	2,87	0,57	0,08

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 20 – Medições Rmáx CP04 – Teste

CP04 – Rmáx								
Pontos	1	2	3	4	5	Soma	Média	Desvio padrão
P1	2,21	2,71	2,13	2,38	3,35	12,78	2,56	0,50
P2	2,30	2,31	1,88	1,64	1,74	9,87	1,97	0,31
P3	11,23	18,45	21,89	10,19	22,96	84,72	16,94	5,94
P4	3,37	2,84	3,04	3,45	3,00	15,70	3,14	0,26
P5	3,32	2,43	3,04	2,61	2,77	14,17	2,83	0,35
P6	1,94	2,21	1,68	2,72	1,88	10,43	2,09	0,40
P7	2,99	2,77	5,01	3,26	5,08	19,11	3,82	1,13
P8	30,99	26,88	30,02	29,38	36,39	153,66	30,73	3,51
P9	3,00	2,85	3,07	1,71	3,45	14,08	2,82	0,66
P10	3,34	3,77	3,49	2,86	2,55	16,01	3,20	0,49

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 21 – Medições Rz CP04 – Teste

CP04 – Rz								
Pontos	1	2	3	4	5	Soma	Média	Desvio padrão
P1	2,02	2,42	2,07	2,18	2,69	11,38	2,28	0,28
P2	2,04	1,51	1,61	1,35	1,31	7,82	1,56	0,29
P3	8,31	12,15	13,59	8,93	10,60	53,58	10,72	2,20
P4	2,92	2,62	2,87	2,97	2,85	14,23	2,85	0,13
P5	2,73	2,32	2,76	2,51	2,60	12,92	2,58	0,18
P6	1,71	1,71	1,58	2,20	1,60	8,80	1,76	0,25
P7	2,64	2,36	3,56	2,32	3,05	13,93	2,79	0,52
P8	19,54	24,28	19,38	20,75	26,58	110,53	22,11	3,19
P9	2,20	2,06	2,02	1,47	2,13	9,88	1,98	0,29
P10	3,01	3,20	3,16	2,51	2,38	14,26	2,85	0,38

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 22 – Medições Ra CP04 – Réplica 01

CP04 – Ra								
Pontos	1	2	3	4	5	Soma	Média	Desvio padrão
P1	0,48	0,36	0,36	0,36	0,43	1,99	0,40	0,05
P2	0,66	0,58	0,44	0,54	0,52	2,74	0,55	0,08
P3	2,91	3,22	3,36	2,56	2,69	14,74	2,95	0,34
P4	0,51	0,33	1,16	0,57	0,52	3,09	0,62	0,32
P5	0,34	0,52	0,35	0,42	0,37	2,00	0,40	0,07
P6	0,43	0,28	0,43	0,34	0,43	1,91	0,38	0,07
P7	1,17	0,68	0,96	1,44	0,66	4,91	0,98	0,33
P8	2,43	3,13	2,11	2,32	3,28	13,27	2,65	0,52
P9	0,57	0,72	0,69	0,66	0,78	3,42	0,68	0,08
P10	0,49	0,43	0,33	0,48	0,56	2,29	0,46	0,09

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 23 – Medições Rmáx CP04 – Réplica 01

CP04 – Rmáx								
Pontos	1	2	3	4	5	Soma	Média	Desvio padrão
P1	3,98	2,35	2,01	2,10	2,38	12,82	2,56	0,81
P2	4,17	3,27	3,48	4,20	7,26	22,38	4,48	1,61
P3	19,47	25,03	19,69	20,02	19,85	104,06	20,81	2,37
P4	3,26	1,80	22,82	2,72	2,49	33,09	6,62	9,07

P5	2,62	6,91	2,29	3,93	2,00	17,75	3,55	2,02
P6	3,96	2,71	3,00	2,75	4,18	16,60	3,32	0,70
P7	18,74	4,17	7,45	14,30	6,33	50,99	10,20	6,10
P8	25,26	22,33	16,44	24,27	20,85	109,15	21,83	3,46
P9	5,01	5,27	5,18	8,59	9,87	33,92	6,78	2,28
P10	3,49	3,59	2,14	2,80	3,51	15,53	3,11	0,63

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 24 – Medições Rz CP04 – Réplica 01

CP04 – Rz								
Pontos	1	2	3	4	5	Soma	Média	Desvio padrão
P1	2,34	1,83	1,79	1,84	1,93	9,73	1,95	0,23
P2	3,15	3,01	3,16	3,24	3,76	16,32	3,26	0,29
P3	16,85	16,97	17,33	15,82	16,03	83,00	16,60	0,65
P4	2,67	1,55	6,87	2,41	2,67	16,17	3,23	2,08
P5	1,86	3,60	1,67	2,55	1,84	11,52	2,30	0,80
P6	2,06	1,69	2,30	1,94	3,85	11,84	2,37	0,86
P7	6,60	3,63	5,60	8,48	4,16	28,47	5,69	1,95
P8	16,43	17,55	13,47	16,42	16,16	80,03	16,01	1,52
P9	3,71	3,98	4,78	4,47	5,65	22,59	4,52	0,76
P10	2,77	2,43	1,82	2,45	3,06	12,53	2,51	0,46

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 25 – Medições Ra CP04 – Réplica 02

CP04 – Ra								
Pontos	1	2	3	4	5	Soma	Média	Desvio padrão
P1	0,63	0,37	0,65	0,44	0,60	2,69	0,54	0,13
P2	0,58	0,60	0,63	0,63	0,53	2,97	0,59	0,04
P3	3,33	1,34	3,21	3,10	3,90	14,88	2,98	0,97
P4	0,35	0,33	1,16	0,57	0,52	2,93	0,59	0,34
P5	0,41	0,40	0,65	0,53	0,55	2,54	0,51	0,10
P6	0,41	0,50	0,54	0,44	0,51	2,40	0,48	0,05
P7	0,27	0,26	0,29	0,26	0,41	1,49	0,30	0,06
P8	3,08	3,20	4,35	4,74	5,76	21,13	4,23	1,12
P9	0,59	0,49	0,67	0,54	0,59	2,88	0,58	0,07
P10	0,51	0,51	0,38	0,40	0,46	2,26	0,45	0,06

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 26 – Medições R_{máx} CP04 – Réplica 02

CP04 - R_{máx}								
Pontos	1	2	3	4	5	Soma	Média	Desvio padrão
P1	2,98	2,68	4,55	2,23	2,69	15,13	3,03	0,89
P2	2,64	2,95	3,23	3,10	2,85	14,77	2,95	0,23
P3	22,59	8,92	23,85	28,30	52,41	136,07	27,21	15,84
P4	1,86	1,80	22,82	2,72	2,49	31,69	6,34	9,22
P5	2,26	2,04	2,88	2,38	2,63	12,19	2,44	0,33
P6	2,08	2,36	2,93	2,04	3,12	12,53	2,51	0,49
P7	1,78	1,88	2,49	1,62	2,69	10,46	2,09	0,47
P8	21,12	35,31	27,58	28,93	37,53	150,47	30,09	6,53
P9	2,82	2,42	2,99	2,67	2,66	13,56	2,71	0,21
P10	3,19	5,63	2,97	2,60	2,68	17,07	3,41	1,26

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 27 – Medições R_z CP04 – Réplica 02

CP04 - R_z								
Pontos	1	2	3	4	5	Soma	Média	Desvio padrão
P1	2,53	2,07	2,91	2,02	2,44	11,97	2,39	0,36
P2	2,40	2,78	2,74	2,76	2,39	13,07	2,61	0,20
P3	18,58	7,76	19,80	18,40	22,24	86,78	17,36	5,58
P4	1,62	1,55	6,87	2,41	2,27	14,72	2,94	2,23
P5	2,01	1,79	2,57	2,19	2,43	10,99	2,20	0,31
P6	1,88	2,12	2,59	1,86	2,44	10,89	2,18	0,33
P7	1,62	1,67	1,76	1,53	2,18	8,76	1,75	0,25
P8	16,68	20,76	20,38	23,54	26,79	108,15	21,63	3,78
P9	2,28	1,97	2,42	2,19	2,39	11,25	2,25	0,18
P10	2,46	3,07	2,49	1,93	2,18	12,13	2,43	0,43

Fonte: Elaboração do autor (2018).

APÊNDICE B – ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Nas Tabelas 28 e 29 são apresentadas as análises de variância (ANOVA) para cada corpo de prova, considerando as medições do teste e da réplica 02.

Tabela 28 – ANOVA entre corpos de prova para CP03

Fonte da variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F calculado	valor-P	F tabelado
Entre grupos	355,46	9	39,50	76,00	3,62E-38	1,99
Dentro dos grupos	46,77	90	0,51968	F calculado > F tabelado, rejeita-se		
Total	402,23	99				

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 29 – ANOVA entre corpos de prova para CP04

Fonte da variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F calculado	valor-P	F tabelado
Entre grupos	139,86	9	15,54	86,78	1,873E-40	1,99
Dentro dos grupos	16,12	90	0,1790784	F calculado > F tabelado, rejeita-se		
Total	155,98	99				

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Como em ambos os casos rejeitou-se H_0 , as Tabelas 30 e 31 demonstram o comparativo da diferença mínima significativa (DMS) para os CP03 e CP04, para identificar as divergências entre pontos dentro de cada corpo de prova.

Tabela 30 – Cálculo DMS CP03

T	1,99	
Média Quadrática	0,52	
K	10	
DMS	0,64	
Comparativo de médias	Resultado	Resposta
P1-P2	0,07	não significativa
P1-P3	5,78	Significativa
P1-P4	0,55	não significativa
P1-P5	0,02	não significativa
P1-P6	0,03	não significativa
P1-P7	0,14	não significativa

P1-P8	3,40	Significativa
P1-P9	0,18	não significativa
P1-P10	0,13	não significativa
P2-P3	5,85	Significativa
P2-P4	0,62	não significativa
P2-P5	0,08	não significativa
P2-P6	0,10	não significativa
P2-P7	0,20	não significativa
P2-P8	3,46	Significativa
P2-P9	0,24	não significativa
P2-P10	0,07	não significativa
P3-P4	5,23	Significativa
P3-P5	5,77	Significativa
P3-P6	5,75	Significativa
P3-P7	5,64	Significativa
P3-P8	2,38	Significativa
P3-P9	5,60	Significativa
P3-P10	5,91	Significativa
P4-P5	0,54	não significativa
P4-P6	0,52	não significativa
P4-P7	0,42	não significativa
P4-P8	2,84	Significativa
P4-P9	0,38	não significativa
P4-P10	0,69	Significativa
P5-P6	0,02	não significativa
P5-P7	0,12	não significativa
P5-P8	3,38	Significativa
P5-P9	0,16	não significativa
P5-P10	0,15	não significativa
P6-P7	0,10	não significativa
P6-P8	3,36	Significativa
P6-P9	0,15	não significativa
P6-P10	0,17	não significativa
P7-P8	3,26	Significativa
P7-P9	0,04	não significativa
P7-P10	0,27	não significativa
P8-P9	3,22	Significativa
P8-P10	3,53	Significativa
P9-P10	0,31	não significativa

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 31 – Cálculo DMS CP04

T	1,99	
Média Quadrática	0,18	
K	10	
DMS	0,38	
Comparativo de médias	Resultado	Resposta
P1-P2	0,11	não significativa
P1-P3	1,73	significativa
P1-P4	0,05	não significativa
P1-P5	0,00	não significativa
P1-P6	0,16	não significativa
P1-P7	0,16	não significativa
P1-P8	3,64	significativa
P1-P9	0,12	não significativa
P1-P10	0,05	não significativa
P2-P3	1,84	significativa
P2-P4	0,16	não significativa
P2-P5	0,11	não significativa
P2-P6	0,05	não significativa
P2-P7	0,05	não significativa
P2-P8	3,75	significativa
P2-P9	0,01	não significativa
P2-P10	0,06	não significativa
P3-P4	1,67	significativa
P3-P5	1,72	significativa
P3-P6	1,89	significativa
P3-P7	1,88	significativa
P3-P8	1,91	significativa
P3-P9	1,85	significativa
P3-P10	1,78	significativa
P4-P5	0,05	não significativa
P4-P6	0,21	não significativa
P4-P7	0,21	não significativa
P4-P8	3,59	significativa
P4-P9	0,17	não significativa
P4-P10	0,11	não significativa
P5-P6	0,17	não significativa
P5-P7	0,16	não significativa
P5-P8	3,64	significativa
P5-P9	0,13	não significativa
P5-P10	0,06	não significativa
P6-P7	0,01	não significativa
P6-P8	3,80	significativa
P6-P9	0,04	não significativa
P6-P10	0,11	não significativa
P7-P8	3,80	significativa
P7-P9	0,04	não significativa

P7-P10	0,10	não significativa
P8-P9	3,76	significativa
P8-P10	3,69	significativa
P9-P10	0,07	não significativa

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Nas tabelas a seguir, apresentam-se as análises de variância (ANOVA) para cada ponto em comparação entre corpos de prova (CP03 com CP04), levando em consideração as medições do teste e da réplica 02.

Tabela 32 – ANOVA entre corpos de prova para P1

Fonte da variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F calculado	valor-P	F tabelado
Entre grupos	0,03	1	0,03	2,85	0,11	4,41
Dentro dos grupos	0,18	18	0,010128	F calculado < F tabelado, aceita-se		
Total	0,21	19				

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 33 – ANOVA entre corpos de prova para P2

Fonte da variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F calculado	valor-P	F tabelado
Entre grupos	0,01	1	0,01	0,22	0,64	4,41
Dentro dos grupos	0,41	18	0,0229222	F calculado < F tabelado, aceita-se		
Total	0,42	19				

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 34 – ANOVA entre corpos de prova para P3

Fonte da variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F calculado	valor-P	F tabelado
Entre grupos	79,16	1	79,16	76,33	6,83E-08	4,41
Dentro dos grupos	18,67	18	1,03704278	F calculado > F tabelado, rejeita-se		
Total	97,83	19				

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 35 – ANOVA entre corpos de prova para P4

Fonte da variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F calculado	valor-P	F tabelado
Entre grupos	0,90	1	0,90	10,52	4,51E-03	4,41
Dentro dos grupos	1,54	18	0,0854578	F calculado > F tabelado, rejeita-se		
Total	2,43712	19				

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 36 – ANOVA entre corpos de prova para P5

Fonte da variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F calculado	valor-P	F tabelado
Entre grupos	0,02	1	0,02	2,51	0,13	4,41
Dentro dos grupos	0,15	18	0,008418	F calculado < F tabelado, aceita-se		
Total	0,17	19				

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 37 – ANOVA entre corpos de prova para P6

Fonte da variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F calculado	valor-P	F tabelado
Entre grupos	0,07	1	0,07	6,21	0,02	4,41
Dentro dos grupos	0,20	18	0,011204	F calculado > F tabelado, rejeita-se		
Total	0,27	19				

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 38 – ANOVA entre corpos de prova para P7

Fonte da variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F calculado	valor-P	F tabelado
Entre grupos	0,24	1	0,24	16,31	7,71E-04	4,41
Dentro dos grupos	0,26	18	0,014436	F calculado > F tabelado, rejeita-se		
Total	0,50	19				

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 39 – ANOVA entre corpos de prova para P8

Fonte da variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F calculado	valor-P	F tabelado
Entre grupos	0,51	1	0,51	0,22	0,64	4,41
Dentro dos grupos	40,79	18	2,2662539	F calculado < F tabelado, aceita-se		
Total	41,30	19				

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 40 – ANOVA entre corpos de prova para P9

Fonte da variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F calculado	valor-P	F tabelado
Entre grupos	0,25	1	0,25	8,97	0,01	4,41
Dentro dos grupos	0,50	18	0,027707	F calculado > F tabelado, rejeita-se		
Total	0,75	19				

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 41 – ANOVA entre corpos de prova para P10

Fonte da variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F Calculado	valor-P	F tabelado
Entre grupos	0,12	1	0,12	11,75	3E-03	4,41
Dentro dos grupos	0,18	18	0,0102206	F calculado > F tabelado, rejeita-se		
Total	0,30	19				

Fonte: Elaboração do autor (2018).

APÊNDICE C – PARÂMETROS DE CORTE PROPOSTOS PARA CP02 E CP04

A Tabela 42 apresenta os parâmetros utilizados nos ensaios, na usinagem dos corpos de prova CP02 e CP04, nos pontos de medição da rugosidade. Cada ponto mostra o ângulo de inclinação, a característica da usinagem, o diâmetro efetivo de corte (mm), utilizado para o cálculo da velocidade rotacional (rpm) e a velocidade de avanço (mm/min) com a constante velocidade de corte (m/min).

Tabela 42 – Parâmetros propostos CP02 e CP04

Ponto	Inclinação	Característica	Diâmetro efetivo de corte	rpm		
P1	45°	Ascendente	17,62	2710	1084	150
P2	70°	Ascendente	11,97	3989	1596	150
P3	90°	Perpendicular	5,76	8290	3316	150
P4	70°	Descendente	6,84	6981	2792	150
P5	45°	Descendente	14,14	3377	1351	150
P6	45°	Descendente	14,14	3377	1351	150
P7	70°	Descendente	6,84	6981	2792	150
P8	90°	Perpendicular	7,03	6792	2717	150
P9	70°	Ascendente	13,01	3670	1468	150
P10	45°	Ascendente	18,21	2622	1049	150

Fonte: Elaboração do autor (2018).

ANEXO A – CERTIFICADO DA MATÉRIA-PRIMA

Figura 51 – Certificado de qualidade

DIFERRO AÇOS ESPECIAIS LTDA - CERTIFICADO DE QUALIDADE																																												
Caxias do Sul - RS RUA COMEND PIETRO ZANELLA, 1245 FONE: 3224-7800 FAX: 34-3224-7852 email: recebimento.cxs@diferro.com.br	JOINVILLE - SC RUA OTTONAR DOERFFEL, 1112 GALPAO CI-49 FONE: 47-2101-1700 FAX: 47-3438-0504 email: recebimento.joi@diferro.com.br	CACHOEIRINHA - RS RUA MANOEL JOSÉ DO NASCIMENTO, 701 FONE: 51-3303-7600 FAX: email: recebimento.poa@diferro.com.br																																										
Cliente: FUNDACAO UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL Customer OC/Purchase: Sr. Ivan - Rodrigo Pedido: 931892 Nota Fiscal: 0253760 Order Invoice																																												
Produto / Especificação: VH13 CHATO FORJADO - 55 x 180 x 255 mm 4 UN Product / Specification Peso / Weight(Kg) : 80,8000																																												
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>% C</td> <td>% Mn</td> <td>% Si</td> <td>% P</td> <td>% S</td> <td>% Cu</td> <td>% Cr</td> </tr> <tr> <td>0,390</td> <td>0,350</td> <td>0,960</td> <td>0,017</td> <td>0,003</td> <td>0,170</td> <td>5,030</td> </tr> <tr> <td>% Ni</td> <td>% Sn</td> <td>% Mo</td> <td>% Al</td> <td>% Pb</td> <td>% W</td> <td>% Ti</td> </tr> <tr> <td>0,100</td> <td></td> <td>1,220</td> <td>0,015</td> <td></td> <td>0,020</td> <td>0,000</td> </tr> <tr> <td>% Co</td> <td>% V</td> <td>% Nb</td> <td>% B</td> <td>% N</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>0,000</td> <td>0,861</td> <td></td> <td></td> <td>0,000</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>			% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Cu	% Cr	0,390	0,350	0,960	0,017	0,003	0,170	5,030	% Ni	% Sn	% Mo	% Al	% Pb	% W	% Ti	0,100		1,220	0,015		0,020	0,000	% Co	% V	% Nb	% B	% N			0,000	0,861			0,000		
% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Cu	% Cr																																						
0,390	0,350	0,960	0,017	0,003	0,170	5,030																																						
% Ni	% Sn	% Mo	% Al	% Pb	% W	% Ti																																						
0,100		1,220	0,015		0,020	0,000																																						
% Co	% V	% Nb	% B	% N																																								
0,000	0,861			0,000																																								
Corrida/Heat: 12073488 Norma: AISI H13 Standard Tratamento Térmico: RECOZIDO Heat Treatment LRT(MPa): Tensile Strength LE(MPa): Yield Strength AL(%): Enlogation Dureza: 191,00 HB Hardness																																												
Observações / Remarks: 21.12.2017 Cristiano Brunetto Assist Técnica																																												
Certificamos que os produtos aqui relacionados foram ensaiados e aprovados conforme a norma ou especificação requerida. We Hereby certify that material here in listed was inspected, tested and aproved in accordance with the standard of the especificatrion required.																																												

Fonte: Diferro Aços Especiais Ltda. (2017).

ANEXO B – NOTA FISCAL WALTER DO BRASIL