

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

PEDRO HENRIQUE SCHWAIZER

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

**CAXIAS DO SUL
2018**

PEDRO HENRIQUE SCHWAIZER

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

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade de Caxias do Sul, como requisito
parcial à obtenção de grau de Engenheiro
Mecânico. Área de atuação: Usinagem

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo P. Zeilmann.

**CAXIAS DO SUL
2018**

PEDRO HENRIQUE SCHWAIZER

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

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade de Caxias do Sul, como requisito
parcial à obtenção de grau de Engenheiro
Mecânico. Área de atuação: Usinagem

Aprovado em: 30/11/2018

Banca Examinadora

Prof. Orientador Dr. Eng^o. Rodrigo Panosso Zeilmann
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Avaliador Dr. Eng^o. Leandro Luís Corso
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Avaliador Me. Eng^o Celso Ferrarini
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Dedico este trabalho aos meus pais, Roberto Schwaizer e Teresinha Rui Schwaizer e também à minha noiva, Bruna Rafaela Maceda por estarem presentes durante toda a jornada da graduação.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Teresinha Rui Schwaizer pelo carinho e incentivo durante todos os momentos desta jornada.

Ao meu pai, Roberto Schwaizer, pela presença e apoio em todos os momentos de dificuldade.

Ao meu irmão, Leonaro Schwaizer pela amizade e parceria.

À minha noiva, Bruna Rafaela Maceda, pela compreensão e apoio nos momentos de dificuldade.

Ao professor Dr. Eng.º Rodrigo Panosso Zeilmann, pelo conhecimento, incentivo, oportunidade, dedicação, orientação e tempo dedicado.

Ao colega Ivan Leandro Debiasi, pela oportunidade de realizar este trabalho em conjunto com sua dissertação de mestrado.

Ao técnico em usinagem do LNTP da UCS, Gaston Henrique Rossa pelo conhecimento transmitido e operação do laboratório.

Ao bolsista e membro do GUS, João Davi Schenkel pelo auxílio prestado.

À todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para finalização deste trabalho de conclusão de curso.

RESUMO

Os parâmetros e estratégias de corte, quando bem definidos em um processo de fresamento de topo esférico, podem permitir superfícies de boa qualidade. A indústria de moldes e matrizes é grande requisitante de componentes com geometrias complexas e tem buscado avanços na qualidade destas superfícies afim de obter redução de processos de acabamento posteriores a usinagem. A qualidade superficial após a operação de usinagem não é suficiente para a entrada destes moldes e matrizes em linhas produtivas na indústria. Busca-se sempre a melhoria nos tempos, custos de fabricação, qualidade superficial e precisão dimensional do molde ou matriz. Com o intuito de aprimorar a qualidade superficial de moldes e matrizes, o presente estudo apresenta uma revisão bibliográfica desde os princípios da usinagem até a usinagem em formas complexas, relação de contato ferramenta-peça e contribuições de outros trabalhos para o tema. O objetivo deste experimento foi caracterizar a superfície usinada quanto a influência do fresamento de topo esférico na direção longitudinal e transversal em uma geometria complexa, variando o RPM e velocidade de avanço de acordo com o diâmetro efetivo máximo de contato entre ferramenta e peça. Para o experimento foi utilizado uma ferramenta de ponta esférica com inserto intercambiável. Quatro corpos de prova de material AISI H13 foram determinados, onde considerou-se dois corpos de prova com fresamento longitudinal e outros dois com usinagem transversal. Identificou-se para todas estratégias, que os pontos em que a ferramenta atua perpendicular à peça, ou seja, utilizando principalmente seu centro para corte, a qualidade superficial é impactada e os parâmetros Ra, Rz e R_{máx} elevam-se consideravelmente. Nota-se melhora nos resultados de rugosidade ao passo que elevam-se os parâmetros de corte. Para a condição de usinagem transversal foi possível concluir que o cálculo adequado dos parâmetros de corte permite equalizar diferenças na qualidade superficial identificadas na usinagem com parâmetros usuais. Analisando o comportamento entre corpos de prova para usinagem na direção transversal, dos dez pontos avaliados observou-se ganho em qualidade superficial em cinco pontos, em outros quatro pontos a qualidade se manteve em níveis semelhantes e em apenas um ponto houve queda de qualidade da superfície. As imagens de textura possibilitaram complementar qualitativamente a superfície com os resultados de rugosidade obtidos. Além do ganho em qualidade superficial, para a usinagem na direção transversal do corpo de prova com parâmetros calculados de acordo com o diâmetro efetivo máximo de contato, identificou-se o ganho em tempo de aproximadamente 29% no processo de usinagem.

Palavras Chave: Estratégias de corte. Fresamento de topo esférico. Rugosidade. Textura.

ABSTRACT

Cutting and strategies parameters, when well defined in a ball nose milling process, can allow good surface quality. The mold and die industry, is a big requester of components with complex geometries and have been searched advances in quality of these surfaces in order to obtain reduction of finishing processes after machining. The surface quality after the machining operation is not sufficient for the entry of these molds and die into productive lines in the industry. The improvement of manufacturing times, costs, superficial quality and dimensional accuracy are always searched for mold and die. In order to improve the surface quality of molds and dies, the present study presents a bibliographical review from the principles of machining to machining in complex surfaces, tool-piece contact and contributions of other works for this theme. The objective of this experiment was characterize the machined surface as the influence of ball nose milling in the longitudinal and transverse direction in a complex geometry when the RPM and the feed rate are variable according to the maximum effective contact diameter between tool and part. For the experiment, a ball nose milling with interchangeable insert was used. Four samples of AISI H13 material were used, where two of them with longitudinal milling and the other two with transverse milling were considered. It was identified for all strategies, that the points which the tool acts perpendicular to the part, in other words, mainly using the center for cutting, the surface quality is impacted and the parameters Ra, Rz and Rmax increase considerably. An improvement in the roughness results is observed while the cutting parameters are increased. For the transverse direction machining it was possible to conclude that the proper calculation of the cutting parameters allows to equalize differences in the surface quality identified in the machining with usual parameters. Analyzing the behavior between test samples for transverse machining, of the ten points evaluated, was identified gain in surface quality in five points, in another four points the quality remained at similar levels and only in one point there was a drop in surface quality . The texture images allowed to complement qualitatively the surface with the roughness results obtained. In addition to the gain in surface quality, for machining in the transverse direction with parameters calculated according to the maximum effective contact diameter, the gain in time of approximately 29% in the machining process was identified.

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

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ferramenta de topo esférico em uma superfície complexa.....	22
Figura 2 – Fresa insertada <i>versus</i> metal duro	23
Figura 3 – Esquemática da formação do cavaco.....	24
Figura 4 – Mecanismo de corte	24
Figura 5 – Sentidos de corte	25
Figura 6 – Intervalos de incremento e avanço no fresamento de topo esférico.....	28
Figura 7 – Topografia para diferentes sentidos de corte	29
Figura 8 – Diferença de acabamento com fresa de topo plana e esférica.....	30
Figura 9 – Contato ferramenta-peça	31
Figura 10 – Raio máximo e mínimo efetivo de corte	32
Figura 11 – Experimento de Souza (2004).....	32
Figura 12 – Resultados do experimento de Souza (2004) para Ra (μm)	33
Figura 13 – Análise qualitativa de texturas	37
Figura 14 – Elementos de uma superfície usinada	38
Figura 15 – Representação dos parâmetros Ra, Rz e R _{máx}	39
Figura 16 – Fluxograma do processo experimental.....	43
Figura 17 – Inserto e haste utilizados para o experimento	45
Figura 18 – Esboço do corpo de prova e trajetória da ferramenta.....	48
Figura 19 – Pontos de medição de rugosidade e avaliação de textura	50
Figura 20 – Rugosidades para CP01.....	52
Figura 21 – Imagens para avaliação de textura – CP01	53
Figura 22 – Particularidades da textura P6.....	54
Figura 23 – Caldeamento no P9 – CP01	54
Figura 24 – Rugosidades para CP02.....	55
Figura 25 – Imagens para avaliação de textura – CP02	57
Figura 26 – Rugosidades para CP03 - Teste.....	58
Figura 27 – Rugosidades para CP03 - Réplica.....	59
Figura 28 – Textura para CP03 - Teste.....	60
Figura 29 – Textura para CP03 - Réplica	60
Figura 30 – Material aderido ao P4 - Réplica.....	61
Figura 31 – Alongamento das células para P1 e P9	61
Figura 32 – Rugosidades para CP04 - Teste.....	62

Figura 33 – Rugosidades para CP04 - Réplica	63
Figura 34 – Textura para CP04 - Teste.....	64
Figura 35 – Textura para CP04 - Réplica.....	64
Figura 36 – Comparativo textura P1.....	66
Figura 37 – Certificado de qualidade	87

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 – Composição química do aço AISI H13	44
Tabela 2 – Comprimento de amostragem e avaliação de rugosidade	49
Tabela 3 – Comparativo de tempos	66
Tabela 4 – Medições Ra CP01	73
Tabela 5 – Medições Rmax CP01	73
Tabela 6 – Medições Rz CP01	73
Tabela 7 – Medições Ra CP02	74
Tabela 8 – Medições Rmax CP02	74
Tabela 9 – Medições Rz CP02	74
Tabela 10 – Medições Ra CP03	75
Tabela 11 – Medições Rmax CP03	75
Tabela 12 – Medições Rz CP03	76
Tabela 13 – Medições Ra CP04	76
Tabela 14 – Medições Rmax CP04	76
Tabela 15 – Medições Rz CP04	77
Tabela 16 – Medições Ra CP03 - Réplica.....	77
Tabela 17 – Medições Rmax CP03 - Réplica.....	77
Tabela 18 – Medições Rz CP03 - Réplica	78
Tabela 19 – Medições Ra CP04 - Réplica.....	78
Tabela 20 – Medições Rmax CP04 - Réplica.....	78
Tabela 21 – Medições Rz CP04 - Réplica	79
Tabela 22 – ANOVA para CP03	80
Tabela 23 – ANOVA para CP04	80
Tabela 24 – Cálculo DMS CP03	80
Tabela 25 – Cálculo DMS CP04	81
Tabela 26 – ANOVA entre corpos de prova para P1	83
Tabela 27 – ANOVA entre corpos de prova para P2	83
Tabela 28 – ANOVA entre corpos de prova para P3	83
Tabela 29 – ANOVA entre corpos de prova para P4	84
Tabela 30 – ANOVA entre corpos de prova para P5	84
Tabela 31 – ANOVA entre corpos de prova para P6	84
Tabela 32 – ANOVA entre corpos de prova para P7	84

Tabela 33 – ANOVA entre corpos de prova para P8	85
Tabela 34 – ANOVA entre corpos de prova para P9	85
Tabela 35 – ANOVA entre corpos de prova para P10	85
Tabela 36 – Parâmetros propostos CP02 e CP04	86
Quadro 1 – Exemplos de desvio de forma em superfícies	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ANOVA	<i>Analysis of variance</i>
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>
DMS	Diferença mínima significativa
et. al.	e outros
GUS	Grupo de Usinagem (da Universidade de Caxias do Sul)
HRC	<i>Hardness Rockwell C</i>
H ₀	Hipótese Nula
H ₁	Hipótese Alternativa
H13	Classe de aço para fabricação de moldes e matrizes
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
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
h_{ch}	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)
v_c	Velocidade de corte (m/min)
D	Diâmetro (mm)
n	Rotação (RPM)
v_f	Velocidade de avanço (mm/min)
f_z	Avanço por dente (mm/dente)
z	Número de dentes da ferramenta
a_e	Incremento lateral (mm)
a_p	Profundidade de corte (mm)
d_e	Diâmetro efetivo máximo (mm)
RF	Raio de ponta da ferramenta de corte (mm)
Θ	Ângulo da ferramenta em relação a peça ($^{\circ}$)
R_y	Rugosidade entre cinco intervalos de medição (μm)
le	Comprimento da amostragem (mm)
y_i	Posição da linha média no perfil de rugosidade
lm	Intervalo de medição (mm)
z_i	Rugosidade parcial (μm)
$z_{z_i,\text{máx}}$	Rugosidade parcial máxima (μm)
`	Minutos
``	Segundos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	JUSTIFICATIVA	19
1.2	AMBIENTE DE TRABALHO	19
1.3	OBJETIVOS.....	20
1.3.1	Objetivo geral.....	20
1.3.2	Objetivos específicos.....	20
2	REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1	PROCESSO DE USINAGEM	21
2.1.1	Fresamento	21
2.1.1.1	Ferramentas de corte.....	22
2.1.1.2	Mecânica do corte.....	23
2.1.1.3	Direção de corte.....	24
2.1.1.4	Parâmetros de corte	25
2.2	USINAGEM EM FORMAS COMPLEXAS	26
2.2.1	Caracterização do incremento e avanço no fresamento de topo esférico	27
2.2.2	Estratégias de corte	28
2.2.3	Relação de contato entre ferramenta de topo esférico e superfície usinada	29
2.3	USINABILIDADE	33
2.3.1	Critério de qualidade superficial.....	34
2.4	CARACTERIZAÇÃO DE SUPERFÍCIES	34
2.4.1	Textura	34
2.4.2	Rugosidade	37
2.4.2.1	Modelos matemáticos para caracterização de superfícies	40
2.5	EQUIPAMENTOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE SUPERFÍCIES	40
2.5.1	Rugosímetro	40
2.5.2	Estereoscópio.....	41
2.5.3	Microscopia óptica.....	41
2.5.4	Microscopia eletrônica de varredura.....	42

3	PROPOSTA DE TRABALHO	43
3.1	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	43
3.2	ENTRADAS FIXAS DO PROCESSO	44
3.2.1	Material	44
3.2.2	Máquina de usinagem	44
3.2.3	Ferramenta de corte	45
3.2.4	Parâmetros de corte fixos	46
3.3	VARIÁVEIS DE ENTRADA DO PROCESSO	46
3.3.1	Parâmetros de corte variáveis	46
3.3.2	Sentidos de corte	47
3.4	VARIÁVEIS DE SAÍDA DO PROCESSO	48
3.4.1	Pontos para avaliação de rugosidade e textura	48
3.5	ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
4.1	USINAGEM LONGITUDINAL COM RPM E AVANÇO CONSTANTE (CP01) ...	52
4.1.1	Análise de rugosidade para o CP01	52
4.1.2	Análise de textura para o CP01	53
4.2	USINAGEM LONGITUDINAL COM RPM E AVANÇO VARIÁVEIS (CP02).....	55
4.2.1	Análise de rugosidade para o CP02	55
4.2.2	Análise de textura para o CP02	56
4.3	USINAGEM TRANSVERSAL COM RPM E AVANÇO CONSTANTE (CP03)	58
4.3.1	Análise de rugosidade para o CP03	58
4.3.2	Análise de textura para o CP03	59
4.4	USINAGEM TRANSVERSAL COM RPM E AVANÇO VARIÁVEIS (CP04)	62
4.4.1	Análise de rugosidade para o CP04	62
4.4.2	Análise de textura para o CP04	63
4.5	COMPARATIVO ENTRE CP03 E CP04.....	65
4.6	TEMPO DE PROCESSO	66
5	CONCLUSÃO	67
6	PROPOSTA PARA NOVOS TRABALHOS	69

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
APÊNDICE A – RUGOSIDADES PARA O ENSAIO INICIAL E RÉPLICA	73
APÊNDICE B – ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	80
APÊNDICE C – PARÂMETROS DE CORTE PROPOSTOS PARA CP02 E CP04	86
ANEXO A – CERTIFICADO DA MATÉRIA PRIMA.....	87

1 INTRODUÇÃO

Os processos de fabricação apareceram em épocas antigas, quando o homem identificou que poderia processar a matéria-prima que tinha no meio ambiente para suprir necessidades básicas e acarretar benefícios. Grande parte dos objetos com os quais possuímos contato diariamente dispõe de variadas geometrias e dimensões, além de serem compostos por materiais distintos. Independente do processo de fabricação, o sequenciamento de desenvolvimento envolve projeto, escolha de material, escolha de método condizente com os resultados esperados, abrangendo sempre objetivos técnicos e econômicos, visando competitividade de custos no mercado (KÖNIG; KLOCKE, 1997). No Brasil, a indústria, a qual abrange a industrialização de componentes, no primeiro trimestre de 2018 representou 20,8% do PIB (SEBRAE, 2018).

De acordo com Usinagem Brasil (2011), o setor de moldes e matrizes de Caxias do Sul concorre com Joinville/SC na disputa para ocupar a segunda colocação no que diz respeito a polo ferramenteiro no Brasil, contando com um significativo número de organizações de pequeno, médio e grande portes. Exposta a importância da fabricação de moldes e matrizes para o cenário local, pode-se destacar que existem diversas falhas na fabricação destes componentes, segundo Guzel e Lazoglu (2003 apud SOUZA, 2004).

Uma das limitações que podem ser abordadas em torno da usinagem de moldes e matrizes é a qualidade superficial do molde após a usinagem, impossibilitando a utilização do mesmo de imediato na produção em função da rugosidade da superfície, de acordo com Boujelbene et al (2004 apud SOUZA, 2004). A usinagem de moldes e matrizes envolve geometrias complexas, uma das variáveis que contribuem para as restrições de desempenho de processo é a contínua alteração do ponto de contato entre a aresta de corte da ferramenta e a peça por efeito das mudanças na curvatura ao longo do modelo (SOUZA, 2004).

O fresamento de topo esférico é preferencialmente utilizado para acabamento de matrizes, moldes, pás de turbinas ou peças com geometria de complexa fabricação (CHAO; ALTINTAS, 2016). Desta maneira, no cenário de fresamento de topo esférico existe a possibilidade de manter a velocidade de corte constante e assim ajustar a rotação de eixo da fresa de acordo com o diâmetro de contato da ferramenta-peça. Conforme equacionamento a ser mostrado no capítulo 2, a rotação vai ser máxima no menor diâmetro de contato da ferramenta, em função da proporcionalidade da equação. Portanto, da perspectiva de ganhos com produtividade é vantajoso para o processo que se utilize a maior rotação possível pois há ganhos em tempo de usinagem e qualidade superficial da peça (KÖNIG; KLOCKE, 1997).

1.1 JUSTIFICATIVA

A definição de uma estratégia de usinagem para uma determinada condição e também caracterizar os resultados de superfície são de enorme importância para estipular o processo de fabricação da peça. As análises e escolhas adequadas das estratégias exercem influências qualitativas e financeiras em relação aos resultados encontrados, conforme Arnzt (2007 apud NICOLA, 2008). Desde componentes simples até peças mais complexas, deve-se avaliar diversas variáveis que o processo de usinagem possui para que os resultados sejam mais produtivos. Muitas destas variáveis do processo de usinagem, tais como profundidade de corte radial e axial, velocidade de avanço, velocidade de corte e diâmetro da ferramenta, podem ser manipuladas afim de buscar uma condição adequada de processamento (KÖNIG; KLOCKE, 1997).

O quesito de qualidade superficial em superfícies complexas requer estudos na busca do aperfeiçoamento dos parâmetros de corte. A condição superficial que o fresamento proporciona às peças não é satisfatória para a aplicação funcional dos moldes e matrizes. Desta forma, é necessário que sejam agregadas operações posteriores à usinagem, muitas vezes manuais, como por exemplo, o polimento. Estas etapas manuais podem comprometer a precisão dimensional do componente, agregar custo e tempo final de fabricação (SOUZA, 2004). Deste modo, faz-se necessário estudar as melhores parametrizações de processo para garantir a qualidade superficial do componente, afim de evitar ou reduzir processos posteriores de acabamento.

Os processos de acabamento manual subsequentes à usinagem possuem impactos representativos no segmento de moldes e matrizes, variando de 12% a 15% no custo e de 30% a 50% no tempo total do processo da peça acabada, conforme Mundo do Plástico (2018). Com isso, estima-se que os avanços nos estudos referente à qualidade superficial quanto a rugosidade e textura podem ter ganhos representativos em produtividade, qualidade e custo.

1.2 AMBIENTE DE TRABALHO

O presente trabalho será desenvolvido em ambiente acadêmico, precisamente na Universidade de Caxias do Sul. A UCS é a instituição de ensino superior privada mais antiga da região, fundada em 1967. Para realização do trabalho, será utilizado o Laboratório de Novas Tecnologias de Produção da universidade, que conta com um centro de usinagem de precisão, máquina de medição tridimensional e instrumentos de medição em geral. Este ambiente será

utilizado para realização da usinagem de acabamento e medição dos corpos de prova.

1.3 OBJETIVOS

Apresenta-se a seguir o que se almeja alcançar com este trabalho de conclusão de curso, por meio de pesquisas e consultas bibliográficas de forma ampla e geral, bem como específica.

1.3.1 Objetivo geral

Caracterizar a influência de diferentes estratégias de usinagem sobre a qualidade superficial no fresamento de topo esférico.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) comparar os parâmetros de rugosidade R_a , R_z e $R_{m\acute{a}x}$ em diferentes posições de um corpo de prova de geometria complexa com diferentes estratégias e parâmetros de usinagem, contemplando usinagens com direção longitudinal e transversal, descendente e ascendente;
- b) comparar os parâmetros de rugosidade R_a , R_z e $R_{m\acute{a}x}$ entre os corpos de prova para diferentes estratégias e parâmetros de usinagem, contemplando usinagens com direção longitudinal e transversal, descendente e ascendente;
- c) utilizar imagens de textura da superfície usinada pelas diferentes estratégias e parâmetros de usinagem adotados em pontos diferentes dos corpos de prova para complementar resultados de rugosidade; e
- d) identificar se há diferenças em tempo de usinagem para cada estratégia.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O presente capítulo apresenta os conceitos para dar suporte aos objetivos propostos neste trabalho de conclusão de curso. É apresentado a conceituação de termos pertinentes ao processo de fresamento para caracterizar resultados de rugosidade e textura.

2.1 PROCESSO DE USINAGEM

Pode-se definir como usinagem um processo que tenha como característica a remoção de material com geração de cavaco, cujos objetivos são determinar forma, dimensão ou acabamento de peças. O cavaco gerado do processo caracteriza-se pelo material que a ferramenta retira da peça em processo e configura-se por possuir geometria irregular (KÖNIG; KLOCKE, 1997). A usinagem fundamenta-se no estudo de mecânica no que envolve o atrito e deformações plásticas, estuda-se também a termodinâmica através dos impactos do calor e por fim pode-se abranger uma análise nas propriedades dos materiais (DIN 8580, 2003).

Conforme König e Klocke (1997), nos processos de usinagem ocorrem movimentos relativos entre o gume da ferramenta e a peça a ser usinada e desta forma as peculiaridades provenientes destes movimentos de contato, como a formação de cavaco, força de corte exigida e desgastes da ferramenta são resultantes da geometria da ferramenta escolhida.

Dentre os diversos processos de usinagem, o fresamento situa-se dentro dos processos de fabricação com extração de cavaco com ferramenta de corte com geometria definida. Este tipo de processo é bastante requisitado na produção de peças em série ou unitárias em função da grande capacidade de material a ser retirado com velocidade de processo agregado. Também pode-se citar como benefício as variações de geometria que o fresamento consegue absorver para fabricação (ZEILMANN, 2018).

2.1.1 Fresamento

Pela versatilidade, amplitude de opções de forma e produtividade agregada, o fresamento é o processo de usinagem mais utilizado na produção de moldes. Todavia, sua particularidade de corte interrompido impacta na vida da ferramenta e na integridade superficial da peça em função das cargas térmicas e mecânicas do processo (SECCO, 2015).

De acordo com Ferraresi (1969), o fresamento é um processo mecânico utilizado para alcançar formas em peças com o apoio de ferramentas usualmente multicortantes. Neste

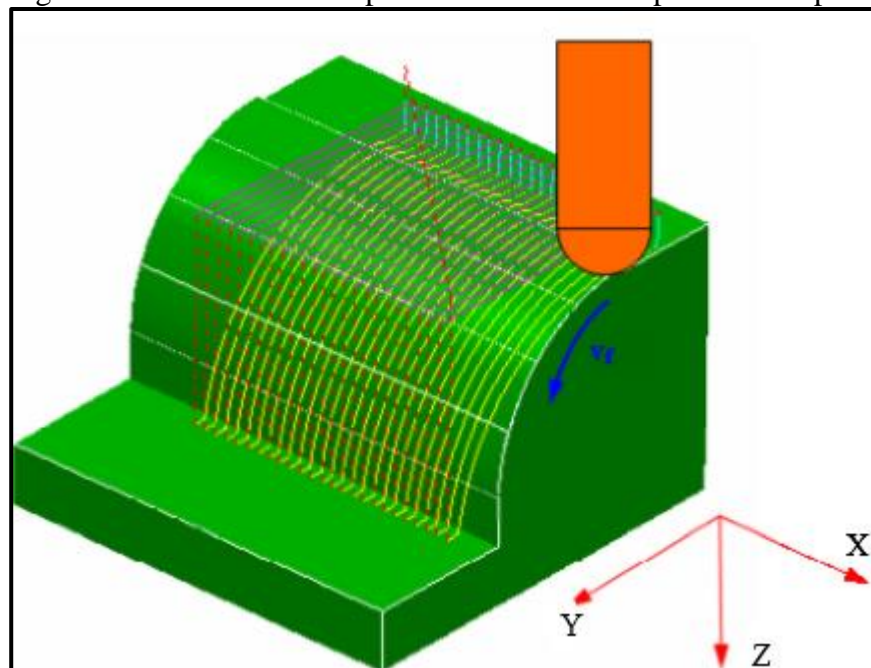
processo a ferramenta gira e ocorre o deslocamento da ferramenta ou da peça para qualquer direção.

2.1.1.1 Ferramentas de corte

O fresamento é caracterizado de acordo com o tipo de ferramenta a ser utilizada, como por exemplo: fresamento circunferencial, de topo, frontal, entre outros. (KÖNIG; KLOCKE, 1997).

A ferramenta característica mais reconhecida para o acabamento de superfícies complexas é a fresa de topo esférico (*ball-nose*) (JUNG; YANG; LEE, 2004). A geometria deste tipo de ferramenta permite que o movimento da mesma sobre a superfície usinada tangencie a forma complexa (*free-form*) executando assim, operação de cópia. Ferramentas de topo esférico abrangem usinagens com superfícies inclinadas entre 0 e 90° em relação ao eixo da fresa (NICOLA, 2008). É mostrado na Figura 1 um esboço de atuação de uma ferramenta de topo esférico em uma superfície complexa.

Figura 1 – Ferramenta de topo esférico em uma superfície complexa



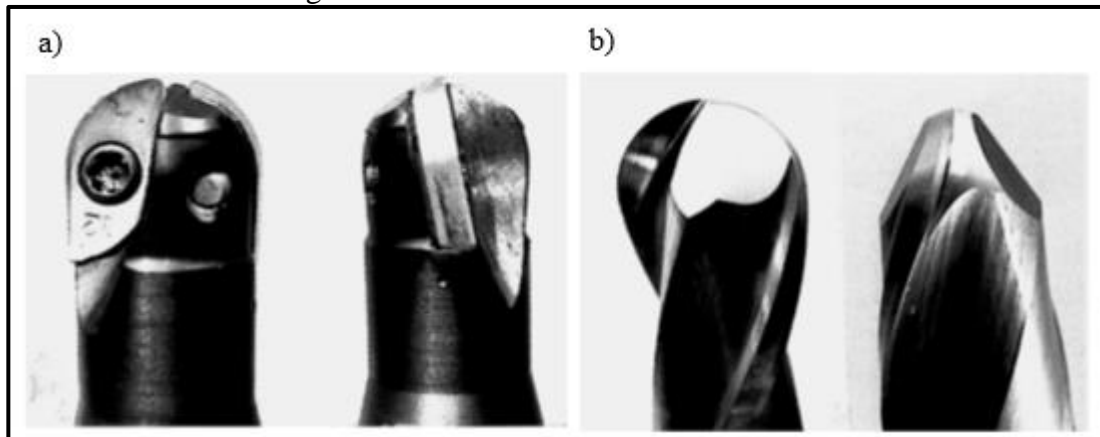
Fonte: adaptado de Souza (2004)

Conforme Urbanski et al. (2000), ferramentas de corte podem ter concepção estrutural com insertos intercambiáveis ou de confecção inteiriça. Por motivos econômicos, em operações de desbaste e semi-cabamento é mais comum observar a utilização de fresas com inserto

intercambiável, ao passo que as fresas de metal duro (inteiriça) são preferencialmente utilizadas para acabamento, mesmo que possuam limitação de diâmetro para utilização e alto custo. Também é comentado por Urbanski et al. (2000) que o metal duro dá ao processo maior capacidade de precisão em função da sua rigidez e balanço dinâmico da ferramenta.

Em contrapartida, Sandvik (1999 apud PIVETTA, 2005) diz que existe uma tendência na utilização de ferramentas com pastilhas intercambiáveis no processo de acabamento em função da redução de custo para o caso de superfícies com grande dimensão. Argumenta-se também a tendência na utilização de ferramentas insertadas para acabamento pela possibilidade de penetração em determinadas cavidades. Mostra-se através da Figura 2 uma fresa de topo esférico insertada (a) e uma de metal duro (b).

Figura 2 – Fresa insertada *versus* metal duro



Fonte: adaptado de Urbanski et al. (2000)

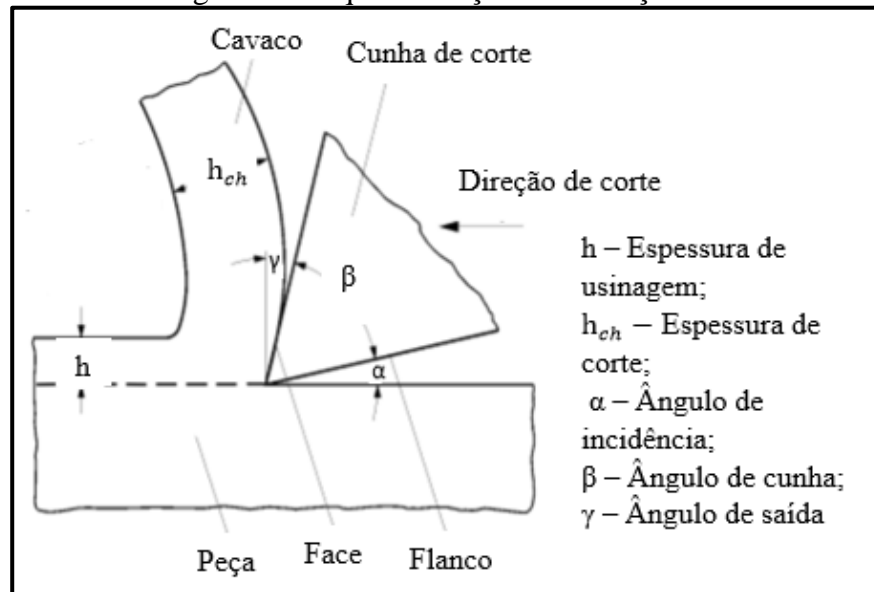
2.1.1.2 Mecânica do corte

Inicialmente, no movimento de corte, a cunha da ferramenta adentra o material da peça em questão onde ocorre deformações elásticas e plásticas. Ao cruzar a tensão de escoamento do material, da forma que com o corte que é aplicado pela cunha é gerado o cavaco (KÖNIG; KLOCKE, 1997). Este detalhamento entre o momento do corte, bem como a geometria do mecanismo de corte da cunha da ferramenta, está exemplificado na Figura 3.

Mostra-se na Figura 4 a caracterização do cavaco relacionado ao plano de cisalhamento. Segundo König e Klocke (1997), representa-se a deformação plástica em quatro áreas. A letra (a) indicada na Figura 4 pode ser definida como condição estrutural da peça, a qual é submetida a cisalhamento e gera a configuração de cavaco, conforme (b). Caso o processo de usinagem esteja ocorrendo para materiais frágeis, pode ocorrer a separação entre peça e cavaco,

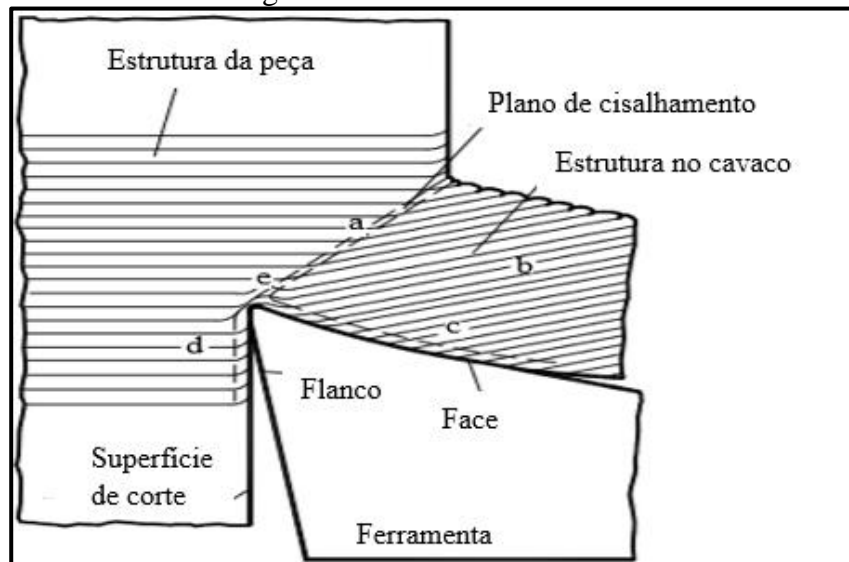
entretanto, se o material possui maior limite de escoamento, a separação só ocorre instantaneamente na posição do gume, em (e). Esforços de tração, pressão na ferramenta e altas temperaturas no processo de corte geram deformações na superfície do cavaco (c) e na superfície de corte na peça (d).

Figura 3 – Esquemática da formação do cavaco



Fonte: adaptado de König e Klocke (1997)

Figura 4 – Mecanismo de corte



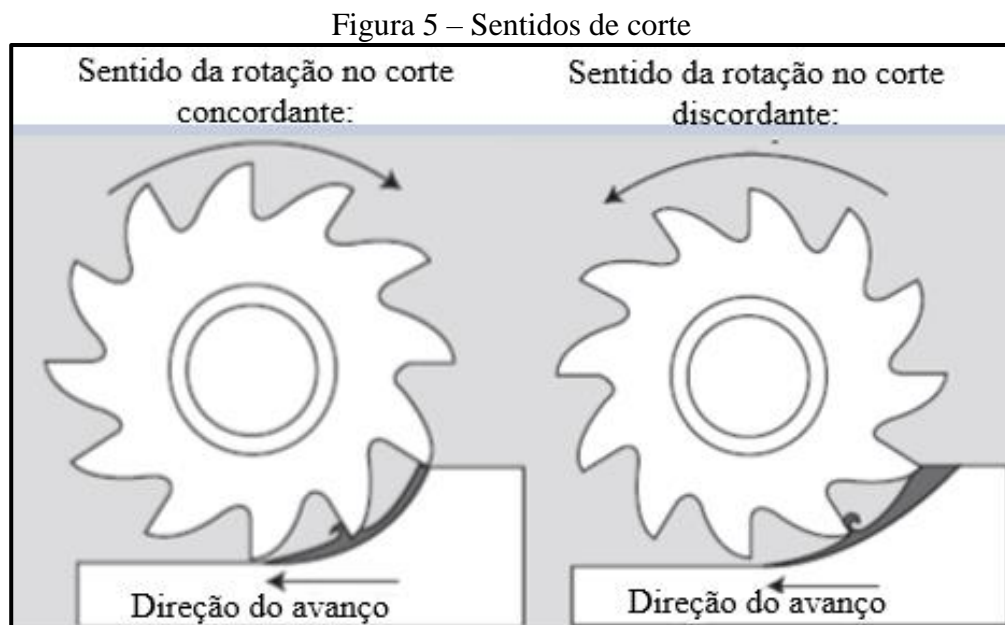
Fonte: adaptado de König e Klocke (1997)

2.1.1.3 Direção de corte

A fresagem é classificada em relação a sua direção e avanço de corte e classifica-se

como fresamento concordante ou discordante. No fresamento concordante o movimento de avanço e corte da ferramenta em relação a peça tem o mesmo sentido, onde o corte inicia-se com a espessura máxima do cavaco. No sentido discordante, a relação de avanço e corte entre peça e ferramenta tem sentidos opostos. A ferramenta que trabalha no sentido discordante possui uma vida inferior em relação a ferramenta que move-se no sentido concordante, pois, só quando a espessura de corte chega a um certo valor e ultrapassa as deformações elásticas ocorre o corte do cavaco. É resultado deste processo, o escorregamento do gume da ferramenta sobre a peça, obtendo-se assim desgaste por abrasão. Ainda no fresamento discordante, há uma propensão de soldagem do cavaco no gume da ferramenta (STEMMER, 1995).

Ainda de acordo com Stemmer (1995), uma das vantagens do fresamento concordante é o melhor acabamento superficial, em relação ao fresamento discordante. Rossi (2005 apud DEUS, 2015) comenta que o fresamento concordante deve ser evitado quando houver irregularidades residuais com presença de areia na superfície a ser usinada. Nesta condição não haverá ganhos em relação a qualidade superficial da peça. Na Figura 5, é mostrado a diferença entre um fresamento concordante e discordante.



Fonte: adaptado de Machado (2009)

2.1.1.4 Parâmetros de Corte

Conforme König e Klocke (1997), o avanço (f) e velocidade de corte (v_c) são grandezas influentes quanto a qualidade superficial na usinagem de metais. A variação da velocidade de corte em função da posição do gume da ferramenta que está em contato com a peça é uma

particularidade importante do fresamento de topo esférico (VACARO, 2013).

Diniz, Marcondes e Coppini (1999) descrevem que a velocidade de corte é consequência do deslocamento da ferramenta sobre a peça, onde a velocidade de corte é efetivamente a velocidade tangencial instantânea decorrente da rotação da ferramenta. A velocidade de corte é calculada por:

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

onde: v_c é a velocidade de corte [m/min];

d é o diâmetro da ferramenta [mm]; e

n é a rotação da ferramenta [rpm].

Para Diniz, Marcondes e Coppini (1999) a velocidade de avanço (v_f) é resultante do avanço pela rotação da ferramenta. A velocidade de avanço é calculada por:

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

onde: f é o avanço [mm/volta]; e

v_f é a velocidade de avanço [mm/min]

Quando se trabalha com ferramentas com mais de um gume, é definido o avanço por dente (f_z) onde é medido o avanço de cada dente na direção de avanço da ferramenta e condiz no desenvolvimento de usinagem em duas superfícies simultâneas (KÖNIG; KLOCKE, 1997). O cálculo do avanço, considerando o número de dentes pode ser definido como:

$$f = f_z \cdot z \quad (3)$$

onde: f_z é o avanço por dente [mm/gume]

z é o número de gumes da ferramenta

2.2 USINAGEM EM FORMAS COMPLEXAS

A interface entre a etapa de projeto de moldes e matrizes até a fabricação propriamente

dita é uma fase que demanda um tempo longo em função da complexidade do processo, onde existe uma correlação muito grande entre projeto, processo de fabricação, peça moldada final e custos. Para realização deste tipo de processamento, se faz necessário uma equipe multidisciplinar, pela necessidade de áreas diferentes do conhecimento que são requisitadas (DARÉ, 2001).

Tradicionalmente o processo de fabricação de moldes e matrizes segue as etapas citadas abaixo:

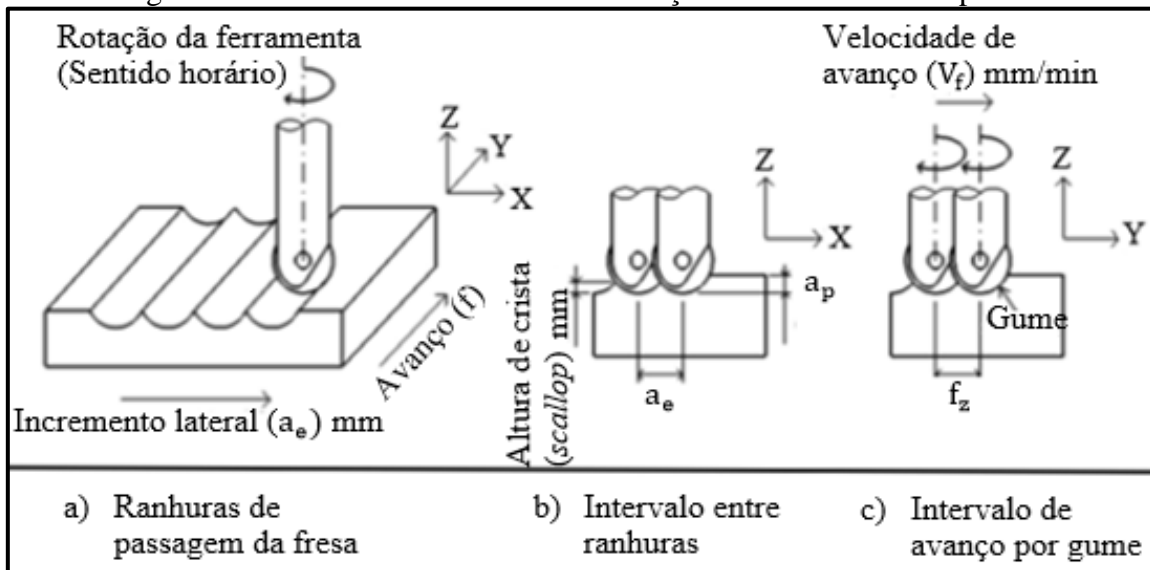
- a) desbaste: a usinagem parte do material bruto e normalmente deixa sobremetal para operação de acabamento;
- b) alívio de cantos e pré acabamento: tem por objetivo eliminar vestígios de material onde a ferramenta de desbaste não foi capaz de remover;
- c) acabamento por fresamento: pode ser realizado através de máquinas com até 5 eixos e fundamenta-se pela remoção do material deixado das operações anteriores. Busca-se nesta etapa a melhor qualidade superficial possível; e
- d) operações manuais de acabamento: em moldes e matrizes utiliza-se o polimento ou retificação para remover as imperfeições deixadas pela usinagem de acabamento. Identifica-se nesta etapa o aumento de custos do processo, tempos de manufatura e imprecisões dimensionais. Rigby (1993 apud SOUZA, 2004).

2.2.1 Caracterização do incremento e avanço no fresamento de topo esférico

A usinagem a partir de uma fresa de topo esférico gera uma superfície com marcas e ondulações em função da característica geométrica da ferramenta. O distanciamento entre uma ondulação e outra define-se pelo incremento lateral (a_e). Este incremento lateral atua significativamente na altura destas ondulações, também conhecidas como cristas (*scallop*), segundo Oliveira (2002 apud NICOLA 2008).

Para obtenção de uma melhor qualidade superficial é necessário que se trabalhe com um pequeno incremento lateral, para que a crista resultante do passe em questão seja a menor possível (NICOLA, 2008). Segundo Chen et al (2005 apud NICOLA 2008) a relação entre a variação de a_e/f_z impacta diretamente na qualidade superficial da peça. Indica-se na Figura 6 uma fresa de topo esférico em contato com uma superfície indicando o incremento lateral (a_e), o avanço por rotação (f) e a profundidade de corte (a_p).

Figura 6 – Intervalos de incremento e avanço no fresamento de topo esférico



Fonte: adaptado de Nicola (2008)

2.2.2 Estratégias de corte

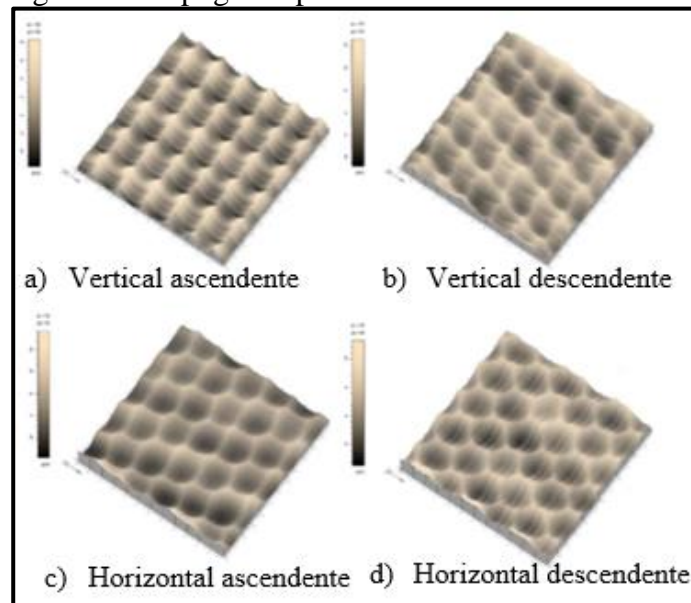
Um ponto de atenção para o fresamento de geometrias complexas é a avaliação das estratégias para trajetória da ferramenta durante a operação. As variações nestas trajetórias impactam na formação do cavaco, nas forças de corte, no desgaste da ferramenta, integridade superficial e impacta na precisão dimensional da geometria a ser usinada Becze et al (2000 apud PIVETTA 2005).

As estratégias de corte podem ser definidas como ascendente ou descendente quanto ao seu sentido, e ser classificada quanto a sua direção, vertical ou horizontal em relação ao plano inclinado (NICOLA, 2008). Pode-se afirmar que a inclinação da peça e a direção de usinagem tem influência representativa na qualidade superficial da usinagem (TÖNSHOFF; CAMACHO, 1989).

O estudo de Toh (2004) analisou a superfície gerada no material AISI H13 através de diferentes estratégias de corte, tais como: horizontal e vertical descendente e ascendente, avaliado em um processo de usinagem com fresa de topo esférico em superfície plana inclinada em 75° e em todos os casos com corte concordante. No experimento foi utilizado uma fresa de topo esférico de metal duro com 10 mm de diâmetro e seis gumes. Foram utilizados os seguintes parâmetros de corte: A velocidade inserida foi de 400 m/mim, sendo $n= 12.964$ rpm para o sentido ascendente e $n= 13.181$ rpm para o sentido descendente. O avanço por gume foi de $f_z= 0,1$ mm, incremento lateral (a_e) de 0,5 mm e profundidade de corte (a_p) de 0,5 mm. Os resultados obtidos para o corte vertical ascendente e horizontal ascendente e descendente

mostram texturas mais homogêneas. A pior textura encontrada quanto a formação e uniformidade foi a obtida pelo corte vertical descendente, dado este que pode ter sido afetado pela maior vibração da ferramenta identificada neste sentido, impactando ainda no maior desgaste da ferramenta e elevadas forças de corte para esta condição. Toh (2004) concluiu que a melhor condição superficial da peça foi quando adotou-se a estratégia de usinagem vertical ascendente, onde as marcas de atuação do gume são de fácil identificação. A Figura 7, ilustra os resultados de textura superficial para cada sentido de corte ensaiado. Na mesma linha do trabalho de Toh (2004), no estudo de Nicola (2008) foi realizado o experimento através da usinagem de um corpo de prova inclinado de material AISI H13, analisando as diferentes estratégias e sentidos de corte. A ferramenta de corte utilizada foi uma fresa de topo esférico com diâmetro de 16 mm e insertos intercambiáveis e a velocidade de corte e avanço foram mantidos constantes. A conclusão foi totalmente contrária ao estudo de Toh (2004), onde os maiores valores de rugosidade foram identificados na estratégia vertical ascendente.

Figura 7 – Topografia para diferentes sentidos de corte



Fonte: adaptado de Toh (2004)

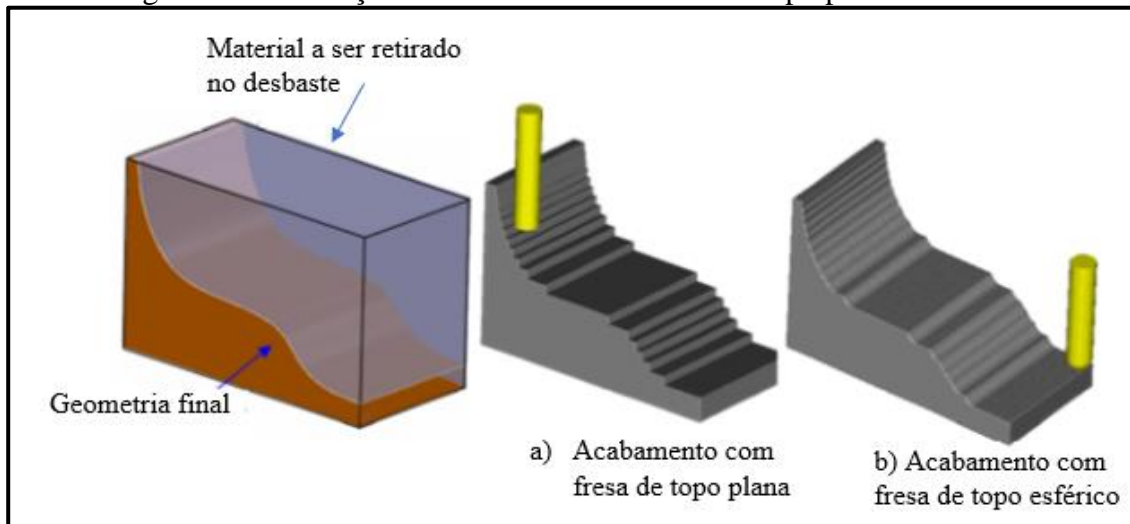
Uma possível explicação para o ocorrido pode ser a diferença de inclinação entre os dois estudos (Toh utilizou 75° e Nicola 60°) e também a utilização de uma fresa de metal duro por Toh (2004) e fresa com inserto intercambiável por Nicola (2008).

2.2.3 Relação de contato entre ferramenta de topo esférico e superfície usinada

Segundo Souza (2004) as ferramentas de topo esférico estão sendo cada vez mais

utilizadas para obtenção de qualidades superficiais elevadas. Mostra-se na Figura 8 a diferença de utilização entre uma fresa de topo esférico e a aplicação de uma fresa de topo plana, onde evidencia-se que a fresa de topo esférico, em função da sua geometria e contato com a peça, permite que a superfície se aproxime mais da geometria final desejada.

Figura 8 – Diferença de acabamento com fresa de topo plana e esférica



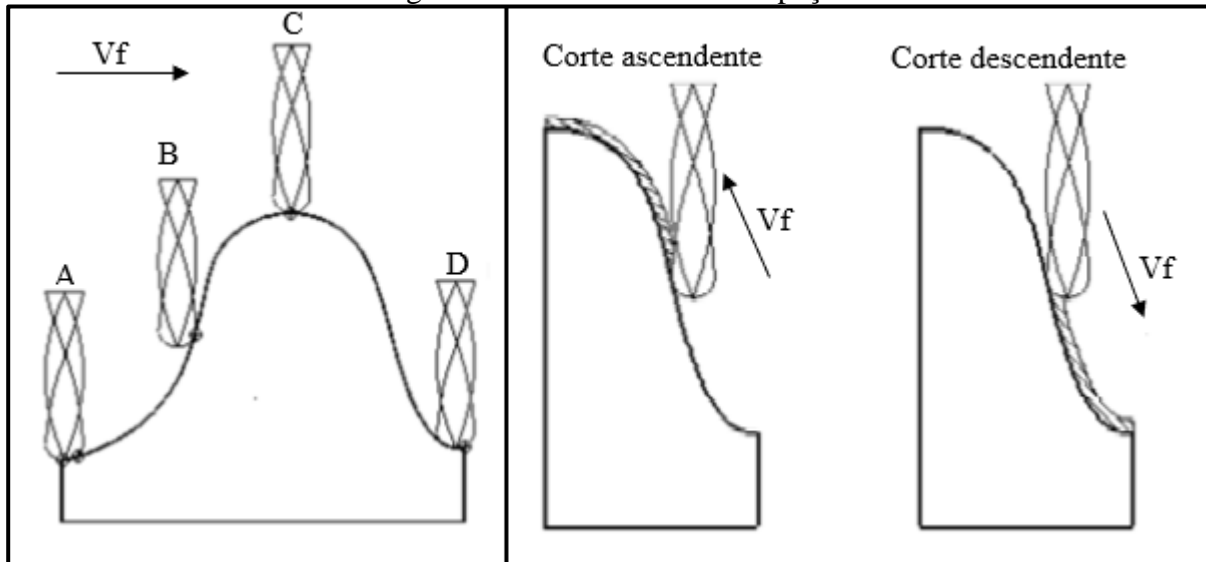
Fonte: adaptado de Souza (2004)

Para que seja possível o entendimento do fresamento de superfícies complexas é indicado que se estude o contato ferramenta-peça e seus impactos (SOUZA, 2004). Para Oliveira (2002 apud NICOLA 2008) no cálculo dos parâmetros de corte para fresas de topo esférico, assim como para análise das condições de contato, deve-se considerar o diâmetro efetivo (d_e), o qual é medido na região de contato do gume da ferramenta com a superfície da peça. Desta maneira de acordo com forma geométrica da superfície usinada, cada região do gume de corte da ferramenta está sujeita a diferentes solicitações durante o corte (ERDIM; LAZOGLU; OZTURK, 2005).

Ilustra-se na Figura 9 as variações de contato ferramenta-peça na passagem pela superfície. Na primeira esquematização da figura, no ponto A ocorre o contato do centro da ferramenta, onde a velocidade de corte é zero, e também o contato da aresta lateral. No deslocamento até o ponto D, a usinagem varia seu sentido entre ascendente e descendente, sendo descendente de C para D e ascendente de A para C. Na posição C apenas o centro da ferramenta está em contato com a peça, e na posição B a ferramenta utiliza seu diâmetro efetivo para corte, ou seja, o diâmetro nominal da ferramenta, o qual é utilizado para cálculo dos parâmetros de corte. No sentido ascendente de corte, é predominantemente solicitado o diâmetro efetivo da ferramenta, entretanto no sentido descendente da usinagem, a parte esférica

da ferramenta é utilizada, podendo variar do diâmetro efetivo até o centro, dependendo desta forma da relação de sobremetal deixado do desbaste com o raio da ferramenta a ser utilizada no processo de acabamento (SOUZA, 2004).

Figura 9 – Contato ferramenta-peça

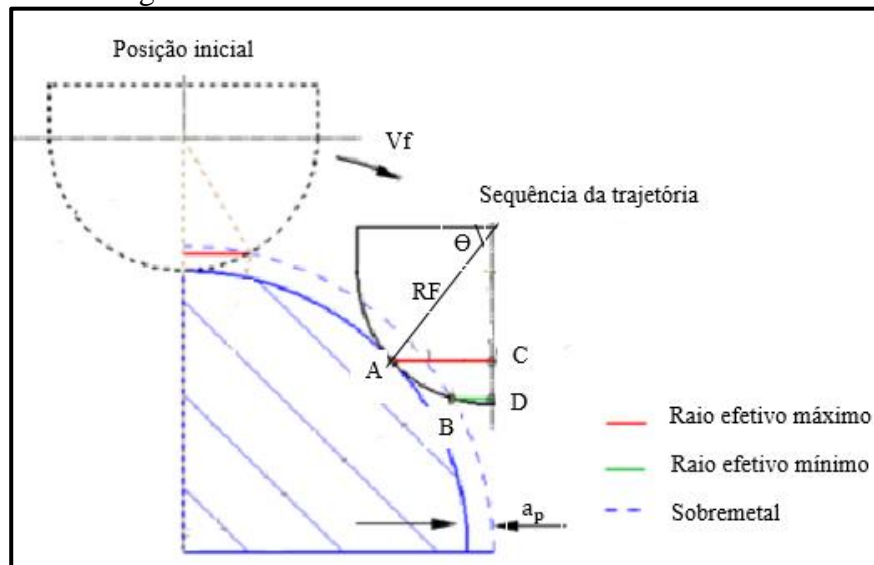


Fonte: adaptado de Souza (2004)

Em uma das abordagens do estudo de Souza (2004) foi analisado o ponto de contato efetivo do gume da ferramenta e suas características. Conforme Figura 10, observa-se que o segmento AC representa o máximo raio efetivo de corte, enquanto que o segmento BD representa o raio mínimo. Estas dimensões efetivas de contato resultam de características do processo, por exemplo: profundidade de corte (a_p), raio de ponta da ferramenta de corte (RF), pela forma da superfície e de acordo com o ângulo da ferramenta em relação a peça (Θ). Na posição inicial da ferramenta, o sobremetal está no sentido axial da ferramenta, e na sequência da trajetória esta condição altera-se para o sentido radial, destacando-se assim que o volume de sobremetal influencia no raio efetivo de corte máximo ou mínimo.

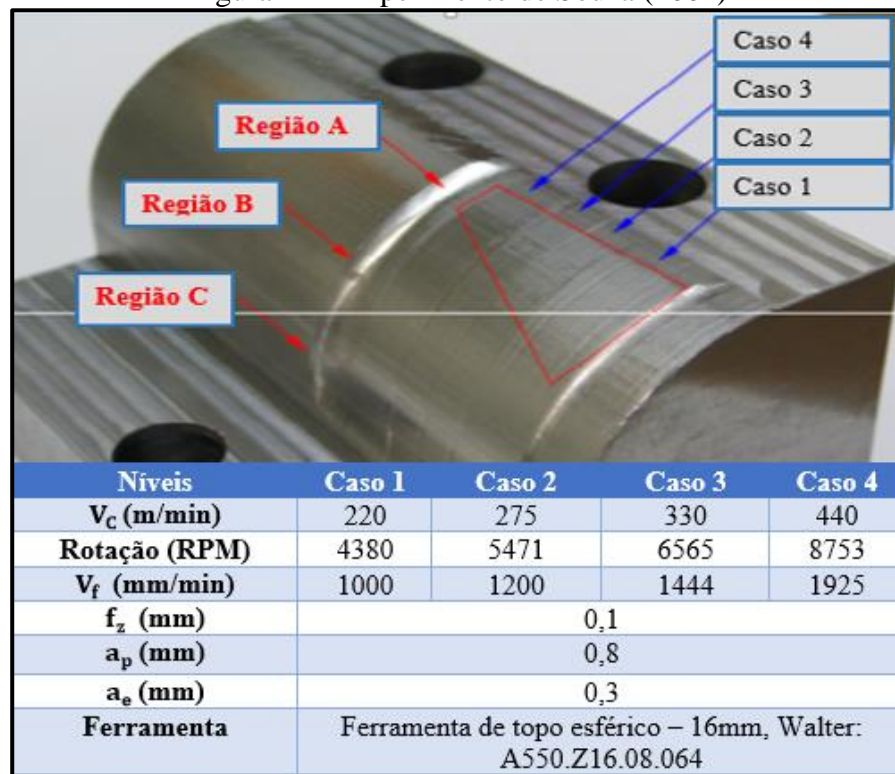
Em seu experimento, Souza (2004) considerou quatro casos de usinagem concordante descendente, e identificou três regiões diferentes para análise de contato da ferramenta, desta forma nomeando-as de A (início da usinagem, com 85° da linha horizontal), B (posição intermediária da usinagem, com 45° da linha horizontal) e C (final da usinagem, considerando 5° da linha horizontal). Os parâmetros utilizados no ensaio, bem como as posições e identificação dos casos estão demonstrados na Figura 11.

Figura 10 – Raio máximo e mínimo efetivo de corte



Fonte: adaptado de Souza (2004)

Figura 11 – Experimento de Souza (2004)

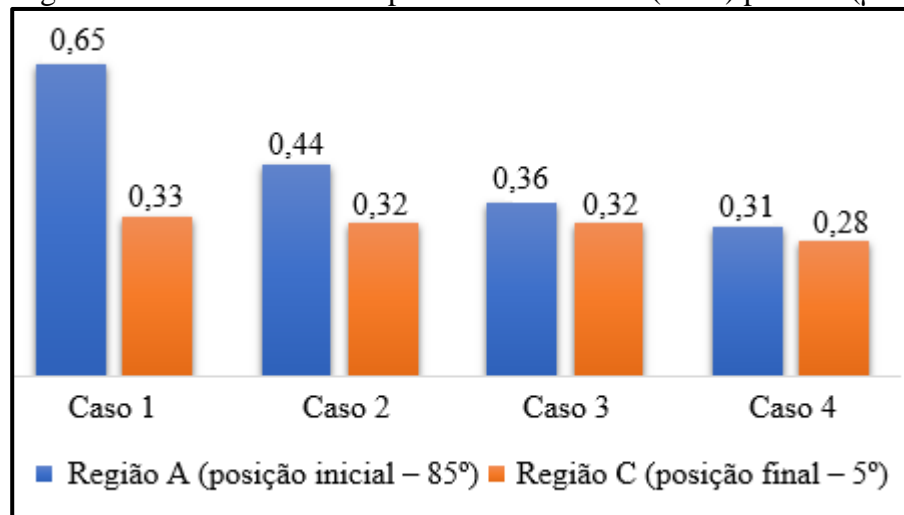


Fonte: adaptado de Souza (2004)

A medição de rugosidade obtida por Souza (2004), foi realizada através da média de cinco valores obtidos em cada região. Mostra-se na Figura 12 os resultados de rugosidade para a posição inicial e final, para cada caso abordado para R_a . Observa-se que para todos os casos a velocidade de corte teve grande influência nos resultados de rugosidade. Por exemplo, no caso 1, onde a velocidade de corte, avanço e rotação foram as mais baixas, obteve-se qualidade

superficial inferior em ambas as regiões analisadas quando comparado com os casos 2, 3 e 4. Outro ponto a destacar é que a região C, em todos os casos apresentou rugosidade mais baixa do que na posição inicial. Este fato pode ocorrer em função da região C ser mais propícia para o processo em relação ao posicionamento da ferramenta de corte, ou seja, com o contato da ferramenta mais afastado do centro da fresa. Foi concluído pelo autor, que existe uma degradação significativa da superfície usinada quando acontece a utilização do centro da ferramenta no fresamento. Esta degradação é possivelmente causada em função do esmagamento do material pela velocidade no centro da ferramenta ser muito baixa e assim não ocorrer corte. Souza (2004) ainda comenta que sempre que possível, não se utilize do posicionamento perpendicular entre ferramenta e peça no fresamento de topo esférico.

Figura 12 – Resultados do experimento de Souza (2004) para Ra (μm)



Fonte: adaptado de Souza (2004)

2.3 USINABILIDADE

Dentro do estudo da usinagem existem algumas propriedades que exercem influência sobre o processo. O termo que define o estudo destas propriedades chama-se usinabilidade. Esta é uma propriedade complexa do material a ser usinado. A usinabilidade deve ser sempre avaliada no ambiente de fabricação, englobando as condições de corte. Para avaliação deste parâmetro, usualmente são empregados quatro critérios, sendo eles: a forma do cavaco, forças de usinagem, vida da ferramenta e, por fim, a qualidade superficial da peça (KÖNIG; KLOCKE, 1997).

2.3.1 Critério de qualidade superficial

A qualidade superficial alcançada pela usinagem pode ser um parâmetro de entrada para o processo. A velocidade de corte tem grande influência na rugosidade, onde maiores rugosidades são encontradas para velocidades de corte pequenas por conta da formação de gume postiço na ferramenta e com isso as partículas formadas no gume postiço deslocam-se entre a ferramenta e peça. Quando trabalha-se com maiores velocidades, os valores de rugosidade são reduzidos, e isso é explicado pela redução da formação do gume postiço e desta maneira é formado um cavaco contínuo. Outros fatores que impactam a qualidade superficial são os ângulos de saída e de posição da ferramenta, e também o desgaste da ferramenta tem influência no resultado final da superfície gerada (KÖNIG; KLOCKE, 1997).

2.4 CARACTERIZAÇÃO DE SUPERFÍCIES

As propriedades superficiais possuem grande expressividade na qualidade das peças usinadas, visto que tem participação significativa na precisão dimensional, coeficiente de atrito, critérios de aparência, custo e desgastes envolvidos (VAKONDIOS et al., 2012). Para caracterizar superfícies, as análises geralmente utilizadas são a avaliação qualitativa da qualidade superficial quanto a textura e a medição quantitativa quanto a rugosidade (VACARO, 2013).

2.4.1 Textura

A superfície pode ser compreendida pela divisão de duas partes na estrutura do material usinado, uma delas sendo a análise dos efeitos externos, a qual relaciona-se com as propriedades de acabamento, direcionando o estudo para textura. O conceito de textura, pode ser definido como conjunto de características observadas a olho nu na superfície, conforme DIN 4761 (1978 apud BET 1999). Outra parte do estudo da superfície é o que diz respeito aos efeitos internos do material (alterações subsuperficiais), que denomina-se como integridade superficial e engloba desta forma fatores mecânicos, como micro dureza, deformação plástica e tensões residuais, por exemplo. O estudo da integridade superficial pode abranger também fatores metalúrgicos, como o estudo da recristalização e transformações metalúrgicas subsuperficiais em função da usinagem (MACHADO et al., 2009).

O acabamento ou textura podem ser definidos pela direção e número de vales e picos






presentes na superfície. A região superficial é usualmente analisada a partir de três conceitos: forma; ondulação; e rugosidade. Pode-se afirmar que o desvio de forma tem maior comprimento de onda que a ondulação e que a ondulação possui comprimento de onda maior que a rugosidade. Para mensurar quantitativamente características superficiais, são utilizados parâmetros verticais. Embora existam inúmeros parâmetros conceituados na literatura, utiliza-se um ou dois, dependendo da situação. Esta medição geralmente é realizada em cinco comprimentos de medição, chamados de *cut-offs* (TABENKIN, 1999). Aponta-se para medições corriqueiras, a rugosidade máxima entre os cinco intervalos de medição (R_y), rugosidade média aritmética (R_a), a rugosidade máxima ($R_{máx}$) e a rugosidade média (R_z) (NICOLA, 2008). Os conceitos sobre os parâmetros verticais, de rugosidade, serão abordados na seção 2.4.2.

Os desvios de forma são considerados os desvios totais entre a superfície real e a superfície ideal de projeto e, conforme mostrado no Quadro 1, os desvios são divididos em seis ordens. A escolha do segmento de análise da superfície deve ser criteriosa de tal forma que permita estatisticamente desenhar o comportamento de toda a superfície (KÖNIG; KLOCKE, 1997).

Um aspecto relevante no fresamento de topo esférico é a inclinação do eixo axial da ferramenta em relação a superfície que está sendo usinada, onde a variação do ângulo de inclinação resulta em mudanças nas condições de contato da peça e o gume de corte da ferramenta e isso implica diretamente na textura da superfície. A utilização do ângulo nulo, ou seja, utilizar a extremidade inferior da ferramenta para remoção de material, onde observa-se a velocidade de corte igual a zero, tende-se a ter uma qualidade superficial ruim (VACARO, 2013). Nos estudos de Batista (2006), utilizou-se fresas de topo esférico com revestimento de TiAlN, com 6mm de diâmetro na usinagem do aço AISI 1.2367. O aço utilizado tem aproximadamente dureza de 50 a 52 HRC. Em seu trabalho, foi possível detectar, através de análises microscópicas das texturas, o esmagamento do material quando utilizado o centro da ferramenta para usinagem. Pode-se explicar esta ocorrência pelo fato da velocidade estar zerada neste ponto e desta forma não ocorrer corte, apenas deformação do material da superfície.

O conjunto de dados quantitativos obtidos das medições de rugosidade, somando com a avaliação qualitativa do fator de textura, permitem que seja feita uma análise completa dos elementos que influenciam na qualidade superficial. Com esta saída de dados, é possível que sejam avaliadas melhorias no processo de usinagem, visto que é possível identificar e corrigir problemas com os resultados de superfície encontrados (VACARO, 2013).

Quadro 1 – Exemplos de desvio de forma em superfícies

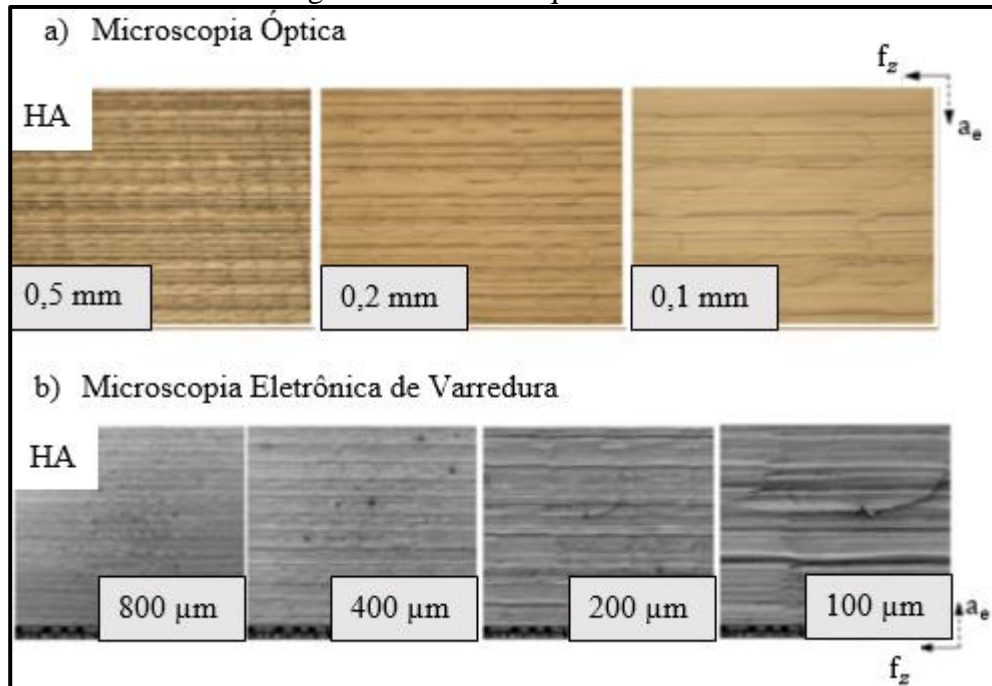
Desvios de forma (Seção de perfil apresentada aumentada)		Exemplos para cada tipo de desvio de forma	Exemplos para o surgimento do desvio
1ª Ordem: Desvio de forma 		Desnivelamento ovalado	Defeito nas guias de máquina-ferramenta, deformações por flexão da máquina ou peça, fixação incorreta da peça, deformação devido a temperatura, desgaste.
2ª Ordem: Ondulações 		Ondas	Fixação excêntrica ou defeito de forma de uma fresa, vibrações da máquina ferramenta, da ferramenta ou da peça.
3ª Ordem: 	R U G O S I D A D E	Ranhuras	Forma do gume da ferramenta, avanço ou profundidade de corte.
4ª Ordem 		Estrias Escamas Picos	Processo de formação de cavaco (arrancado, cisalhado, gume postico), deformação do material por jato de areia, formação de ressaltos devido a tratamento galvânico.
5ª Ordem: Não é mais possível representação gráfica de maneira simplificada		Estrutura do material	Processo de cristalização, modificação da superfície por ação química (decapagem), processo de corrosão.
6ª Ordem Não é mais possível representação gráfica de maneira simplificada		Estrutura reticulada do material	Processos físicos e químicos da estrutura do material, tensões e deslizamentos da estrutura cristalina;
		Superposição dos desvios de forma de 1ª a 4ª ordem	

Fonte: adaptado de König e Klocke (1997)

Baseado no trabalho de Nicola (2008), a Figura 13 mostra um exemplo de imagem gerada para análise qualitativa de textura, através de microscópio óptico (a) e microscópio eletrônico de varredura (b), com as condições de corte de uma fresa de topo esférico em estratégia horizontal ascendente. A imagem (a) apresenta ampliação de 50, 100 e 200 vezes, e a imagem (b) apresenta ampliação de 50, 100, 200 e 500 vezes. Na imagem obtida através do microscópio óptico é possível observar algumas linhas da passagem da ferramenta, mesmo que ainda não seja possível identificar claramente a separação das resultantes do avanço e incremento. Com a ampliação da imagem, já é possível identificar pequenas deformações. Na imagem mostrada através do microscópio eletrônico de varredura, observa-se mais claramente as marcas deixadas pelo avanço da ferramenta e de forma não tão nítida as marcas do incremento lateral. Mesmo que perceptível a passagem do gume sobre a peça, observa-se que esta passagem não é homogênea. Percebe-se que existe uma diferença entre as intensidades da

marca da ferramenta, o que pode ser explicado por uma possível instabilidade no contato entre ferramenta e superfície, possivelmente causada pela estrutura heterogênea do próprio material. Na figura com maior ampliação, nota-se a formação de micro-rebarba, o que pode ter sido gerado pelo desgaste do gume, que quando pressionado contra a superfície da peça gerou deformação plástica do material.

Figura 13 – Análise qualitativa de texturas



Fonte: adaptado de Nicola (2008)

2.4.2 Rugosidade

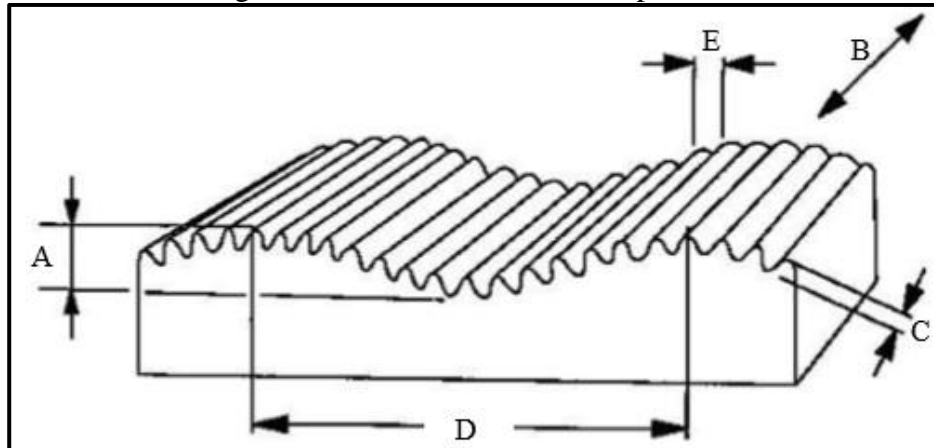
A rugosidade de uma superfície pode ser definida como conjunto de irregularidades finas ou erros micro geométricos, gerados, por exemplo, pelos seguintes aspectos no processo de usinagem: gume posição da ferramenta, desgaste da ferramenta ou ainda marcas do avanço da fresa. A rugosidade é considerada um parâmetro de saída do processo, e serve para controle da qualidade superficial (MACHADO et al., 2009).

De acordo com Camargo (2002 apud BATISTA 2006), a rugosidade pode ser estudada partindo de diversos parâmetros, que podem identificar mais de uma característica da superfície usinada. Na Figura 14 é possível identificar algumas destas características separadamente, como amplitude de ondulação (A), orientação da amplitude de ondulação (B), amplitude das cristas (C), comprimento da ondulação (D) e comprimento da rugosidade (E).

Hutchings (1992 apud NICOLA 2008) comenta que a diferença da rugosidade quando

analisada no sentido longitudinal ou transversal, pode ter grande diferença pois a partir do momento que ocorre a medição longitudinalmente não são captados desvios de terceira ordem. Pode-se afirmar que o perfil apresentado pela medição da rugosidade em uma escala de duas dimensões representa a topografia da superfície e também os valores de rugosidade mensurados na direção perpendicular ou na direção do avanço da ferramenta.

Figura 14 – Elementos de uma superfície usinada



Fonte: adaptado de Camargo (2002 apud BATISTA 2006)

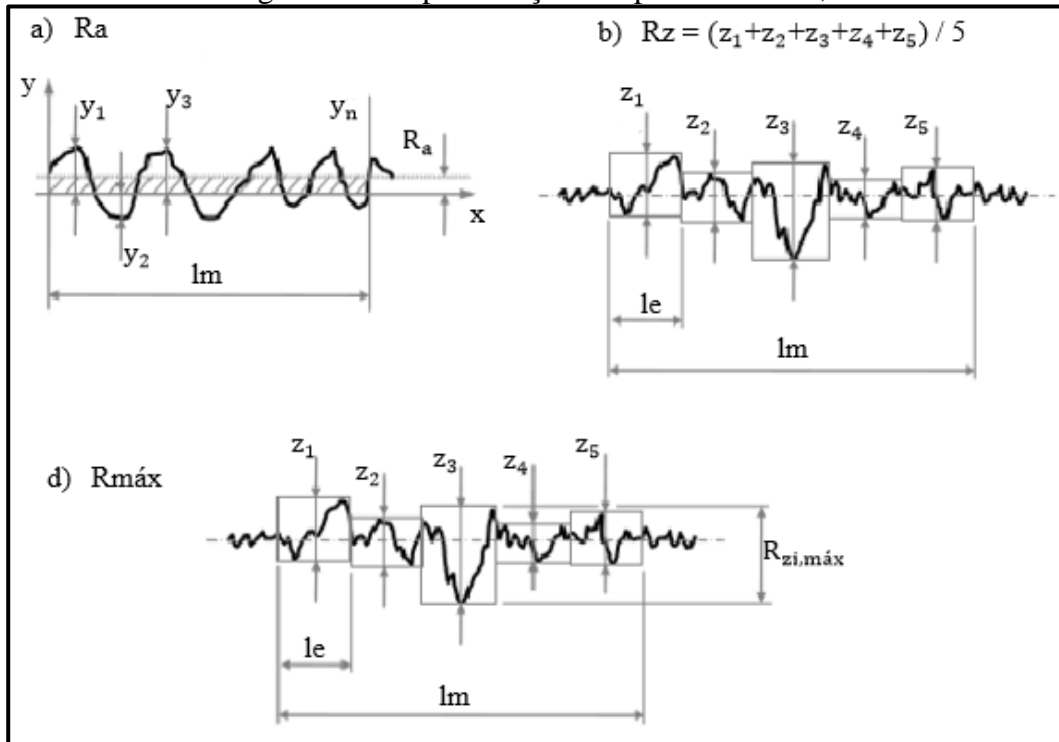
Os parâmetros de rugosidade são mensurados como diferenças em relação a linha média do perfil, conforme determinada pela ISO 4287 (1997 apud VACARO 2013). Globalmente, existem dois sistemas de medição de rugosidades, sendo o sistema da linha média (M) e o sistema da linha envolvente (E). No Brasil o sistema adotado é o da linha média, onde esta linha constitui-se paralela a direção do perfil sempre no comprimento amostrado, da forma que a soma das áreas superiores, entre a linha média e o perfil seja igual a soma das áreas inferiores, no comprimento amostrado (NICOLA, 2008). Conforme a Figura 15, o comprimento amostrado pode ser identificado como: l_e . Dentre os diversos parâmetros de rugosidade, abaixo segue a definição para aqueles que serão abordados no presente estudo:

- a) R_a : define-se como a média aritmética dos valores absolutos de afastamento (y_i) dos pontos relativos ao perfil de rugosidade sobre à linha média, dentro do intervalo de medição (l_m);
- b) R_z : define-se como a média aritmética das rugosidades parciais (z_i) dos cinco trechos de medição amostrados (l_e) subsequentes. A rugosidade parcial pode ser definida como, a medição dos resultados de maior afastamento, tanto para cima quanto abaixo da linha média, no comprimento amostrado, ISO 4287 (1997 apud

VACARO 2013); e

- c) $R_{m\acute{a}x}$: define-se pela maior rugosidade parcial ao longo de um dos cinco trechos de medição (l_m) analisados (KÖNIG; KLOCKE, 1997). Conforme Figura 15, é possível verificar que o ponto identificado como $R_{m\acute{a}x}$, é o parâmetro de rugosidade parcial máxima z_3 ($z_{z_i,m\acute{a}x}$).

Figura 15 – Representação dos parâmetros R_a , R_z e $R_{m\acute{a}x}$



Fonte: adaptado de ISO 4287 (1997 apud VACARO 2013)

É importante salientar que na medição de R_a podem não ser detectadas elevações mais bruscas no perfil analisado e desta forma não refletir a realidade do perfil usinado. Como já exposto anteriormente, este fato ocorre, pois, o R_a representa uma média dos valores medidos.

Baptista e Simões (2000) realizaram uma análise da influência de parâmetros de usinagem na qualidade superficial com intuito de atingir redução do tempo de polimento manual na fabricação de moldes. Para posicionar o leitor dentro da abrangência das rugosidades médias (R_a), foi apresentado a título de informação os níveis típicos de rugosidade média (R_a), de acordo com o acabamento aceitável em moldes. Com polimento manual, por exemplo, chega-se a valores de R_a aproximadamente em $0,5 \mu\text{m}$. Em um processo de acabamento, é possível chegar em aproximadamente $1,0 \mu\text{m}$, porém ainda assim é necessário acabamento por polimento posteriormente. Quando se chega a resultados próximos a $1,8 \mu\text{m}$ ainda se tem como rugosidade média (R_a) aceitável, porém também implica em um acabamento de polimento

manual posterior.

2.4.2.1 Modelos matemáticos para caracterização de superfícies

Utiliza-se da modelagem matemática para caracterização ou se antecipar quanto a condição superficial após a usinagem. Esta caracterização teórica possibilita o ajuste e busca dos melhores parâmetros de usinagem (VACARO, 2013). Entretanto, há fenômenos físicos que impedem a precisão desta previsão da qualidade superficial e comprometem o desenvolvimento de modelos confiáveis para avaliação da rugosidade (GRZENDA e BUSTILLO, 2013).

Os modelos matemáticos podem ser divididos em analíticos e empíricos, onde para aplicação de superfícies usinadas, deriva-se o modelo analítico em modelo numérico. No fresamento com ferramenta de ponta esférica o modelo analítico parte das relações geométricas entre a fresa e superfície gerada. Quando se estuda os modelos numéricos, as relações giram em torno da geometria da fresa e as conexões cartesianas do deslocamento do gume de corte sob a peça. Os modelos empíricos são constituídos a partir de dados obtidos através de experimentos já realizados (VACARO, 2013).

2.5 EQUIPAMENTOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE SUPERFÍCIES

A obtenção de imagens através de equipamentos microscópicos fornece suporte para entendimento da superfície usinada. Juntamente com os valores quantitativos obtidos das medições de rugosidade, as imagens geradas complementam a análise da superfície qualitativamente, conforme Zeilmann, Santin e Nicola (2006). A seguir apresenta-se um descritivo básico de alguns equipamentos apontados pela literatura para este tipo de avaliação.

2.5.1 Rugosímetro

Rugosímetros de contato funcionam da forma que um apalpador mecânico percorre um determinado comprimento em velocidade constante. As imperfeições da superfície fazem com que o equipamento tenha movimentos verticais ao longo da medição, e desta forma através de um transdutor, emita um sinal elétrico. O sinal elétrico passa por uma amplificação, filtro e armazenagem, da forma que sejam constituídos pares de pontos. Os pontos, após o processamento, são expostos graficamente e assim representam um perfil de rugosidade. O gráfico apresentado pelo rugosímetro é uma amostra bidimensional de uma seção da peça

avaliada (BET, 1999). O princípio de rugosímetro por apalpador mecânico pode ser classificado de duas formas: referência flutuante (patim) e referência fixa (NICOLA, 2008).

Segundo Bet (1999), existem limitações nos sistemas de medição de rugosidade, como a penetração do apalpador em vales de pequena dimensão em função da geometria do mesmo, marcação da superfície analisada devido a força do apalpador no deslocamento. Através de rugosímetros de apalpadores mecânicos é possível mapear e estudar uma ampla faixa de superfícies, além de ter um grande número de parâmetros de rugosidade como saída do sistema de medição (NICOLA, 2008).

2.5.2 Estereoscópio

De acordo com Santos (1985 apud CARVALHO 2010), o estereoscópio é um equipamento compostos por dois microscópios completos, cada um com sua respectiva objetiva, sistema de construção e ocular. Relata-se que o observador forma uma imagem tridimensional no cérebro, a partir da observação de duas imagens dissimilares, portanto neste equipamento o observador visualiza a imagem gerada com inclinações diferentes para cada olho.

2.5.3 Microscopia óptica

Para a caracterização de uma superfície, um método geralmente utilizado é a microscopia óptica. As imagens que este equipamento consegue fornecer, pode-se avaliar qualitativamente a superfície. O sistema de microscopia óptica funciona de forma que a imagem obtida ocorre por meio da diferença da reflexão da luz ao longo da superfície, visto que o sistema de microscopia óptica é composto essencialmente pela fonte luminosa e o sistema de lentes. Neste método, a superfície precisa ser preparada com cuidados diferenciados para que o sistema possa revelar as condições da topografia (NICOLA, 2008).

A microscopia óptica limita-se quando a profundidade de foco é reduzida para análise de amostras com topografia predominantemente formadas por vales e picos. Outro limitante é a ampliação máxima permitida, chegando em cerca de 2000 vezes. Em função destes fatos, pequenos detalhes estruturais ainda não são possíveis de detecção com a microscopia ótica, conforme comentado por Maliska (2004 apud NICOLA 2008).

2.5.4 Microscopia eletrônica de varredura

Existem duas grandes diferenças entre o microscópio óptico e o microscópio eletrônico de varredura (MEV), sendo que uma delas é que no óptico é utilizado um feixe de luz e no eletrônico é empregado um feixe de elétrons. Outra diferença é que no microscópio eletrônico de varredura o olho humano é alterado para um detector de elétrons (NICOLA, 2008).

O MEV contempla a possibilidade de gerar imagens com alta resolução e ampliação. As imagens obtidas por este sistema têm aspecto virtual, visto que a figura que visualizamos é a transformação em códigos da energia gerada pelos elétrons. O MEV parte do princípio de funcionamento onde há uma emissão de feixe de elétrons através de um filamento capilar de tungstênio, ou seja, eletrodo negativo, partindo de uma diferença de potencial (DDP) que varia de 0,5 a 30 kV. Esta DDP provoca aceleração dos elétrons e também o aquecimento do filamento, onde a parte positiva atrai os elétrons gerados, direcionando a aceleração no sentido positivo. O percurso do feixe é corrigido por lentes condensadoras que alinham o feixe em direção da fenda da objetiva. A objetiva é quem ajusta o foco do feixe, antes que os elétrons atinjam a amostra estudada (FINKLER, 2005).

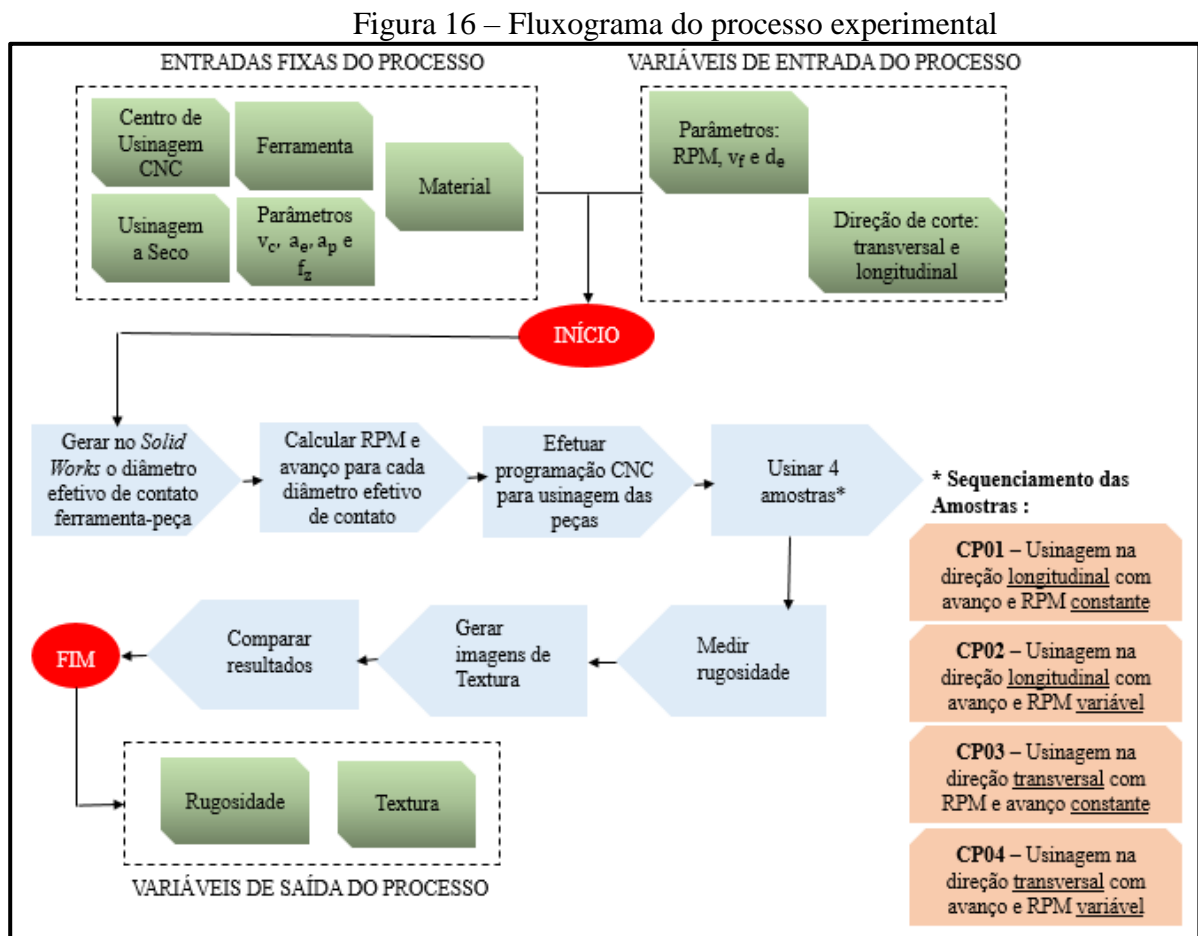
O MEV possibilita a obtenção de imagens através do método de difração de elétrons secundários, como também de elétrons retroespalhados. Utilizando o método de elétrons secundários chega-se a imagens da topografia da superfície. Por outro lado, pelo método de elétrons retroespalhados onde a imagem traduz uma diferença de contraste é possível identificar elementos químicos na superfície analisada, onde elementos de caráter mais pesado, como o ferro, apresentam tons mais claros e elementos leves, como o carbono, por exemplo, tons mais escuros (NICOLA, 2008).

3 PROPOSTA DE TRABALHO

Neste capítulo são abordados os materiais e equipamentos que foram utilizados para desenvolvimento da proposta em questão, englobando a ferramenta de corte, o material dos corpos de prova e máquina de usinagem utilizada. Foi detalhado também as variáveis de entrada e saída do processo, bem como estratégias e parâmetros de corte propostos.

3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Definiu-se uma superfície de certa complexidade para desenvolvimento do experimento proposto com a finalidade de simular uma condição real de fabricação da indústria de moldes e matrizes. Para que seja melhor compreendido o processamento do experimento, é mostrado através da Figura 16 o fluxograma experimental, englobando as variáveis de entrada e saída do processo de usinagem.



Fonte: O autor (2018)

Todas as variáveis definidas como parte do processamento foram detalhadas quanto as suas especificações, afim de situar as condições do ensaio e servir como base para realização dos ensaios.

Pode-se citar que além dos objetivos propostos neste trabalho, buscou-se contribuições às conclusões estipuladas por Toh (2004) e Nicola (2008) em seus experimentos. Diferentemente da superfície utilizada pelos autores citados anteriormente, o experimento em questão conta com a superfície em raio, a qual permite a análise da influência da variação da velocidade de corte e avanço em diferentes pontos de contato entre ferramenta e peça correlacionando com a qualidade superficial do componente.

3.2 ENTRADAS FIXAS DO PROCESSO

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

3.2.1 Material

Para os ensaios propostos, escolheu-se o aço AISI H13, com dureza aproximada de 191 HB, conforme informações do fabricante (Anexo A). Optou-se por este aço em função da grande utilização nas ferramentarias fabricantes de moldes e matrizes. O material utilizado foi fornecido pela Diferro Aços Especiais LTDA. Os corpos de prova foram fabricados a partir de um bloco único de material. Observa-se na Tabela 1 a composição química disponibilizada pelo fabricante.

Tabela 1 – Composição química do aço AISI H13

Análise [%]	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	Al	W	V
	0,39	0,35	0,96	0,02	0,003	0,17	5,03	0,10	1,22	0,02	0,02	0,86

Fonte: Adaptado de Diferro Aços Especiais (2017)

3.2.2 Máquina de usinagem

A máquina de usinagem para realização dos experimentos encontra-se no Laboratório de Novas Tecnologias de Produção da Universidade de Caxias do Sul. Trata-se do centro de

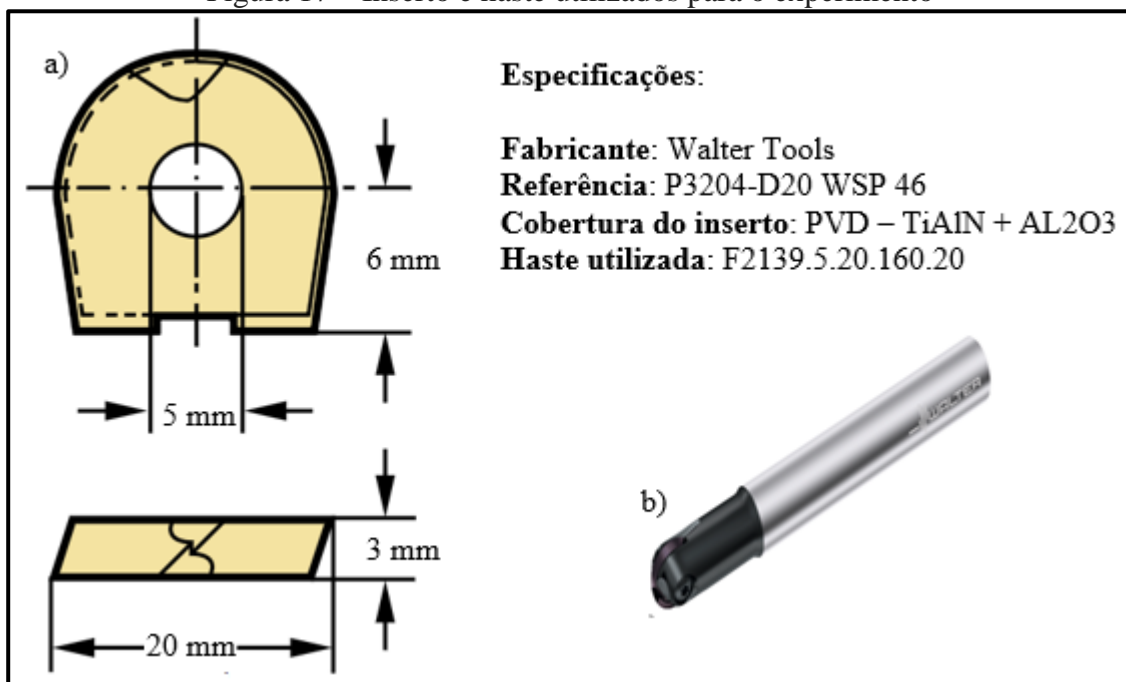
usinagem LG 500 – Hartford, com potência de 10.000 Watts, rotação máxima de 10.000 RPM e 3 eixos de atuação.

3.2.3 Ferramenta de corte

Conforme discutiu-se no capítulo 2, as fresas de topo esférico são usualmente aplicadas para busca de qualidade superficial elevada em geometrias complexas. Este fator foi determinante para escolha da ferramenta a ser utilizada.

A empresa fabricante de ferramentas Walter foi quem cedeu a haste e os insertos para o experimento. Optou-se pela utilização de uma fresa de topo esférico de diâmetro de 20 mm, com insertos intercambiáveis. O diâmetro de 20 mm foi escolhido para reduzir os níveis de RPM calculados, pois existe limitação da máquina utilizada para o experimento (10.000 RPM). Os insertos são constituídos de metal-duro com cobertura de $\text{TiAlN} + \text{Al}_2\text{O}_3$ pelo processo de deposição PVD, sugeridos para fresamento de acabamento em aços. A haste tem como material de fabricação o aço e formato cilíndrico. A Figura 17 ilustra o inserto a ser utilizado (a), bem como a haste da ferramenta (b).

Figura 17 – Inserto e haste utilizados para o experimento



Fonte: adaptado de Walter Tools (2018)

3.2.4 Parâmetros de corte fixos

Buscando eliminar algumas variáveis passíveis de influenciar nos resultados finais de rugosidade e textura, alguns parâmetros serão mantidos constantes no processo. Os parâmetros adotados seguem a recomendação do fabricante da ferramenta. Será utilizado velocidade de corte (v_c) de 150 m/min, incremento lateral (a_e) de 0,5 mm, profundidade de corte (a_p) de 0,5 mm e avanço por gume (f_z) de 0,2 mm.

3.3 VARIÁVEIS DE ENTRADA DO PROCESSO

Foi determinado para o processo variáveis de entrada, afim de identificar suas influências no experimento, tais como: sentidos de corte e variação de parâmetros de corte. Pode-se citar que existem algumas variáveis do processo que não foram abordadas no experimento em função do escopo do trabalho, porém são relevantes na usinagem. Uma das variáveis são as forças de usinagem, as quais podem influenciar os resultados visto que pode-se ter diferentes solicitações em diferentes regiões da periferia cilíndrica da ferramenta (SOUZA, 2004). Outra variável do processo que foi isolada e não analisada foi a vibração. A vibração no fresamento pode surgir entre ferramenta e peça e também na relação entre máquina com ferramenta (KÖNIG; KLOCKE, 1997). A vibração é uma variável que dificulta o controle do parâmetro de rugosidade (HAMDAN; SARHAN; HAMDI, 2012).

3.3.1 Parâmetros de corte variáveis

Nos dois corpos de prova, os quais foram considerados com RPM e velocidade de avanço variáveis, foram mantidos constantes os parâmetros de corte citados em 3.2.4 e foi variado os valores de diâmetro efetivo máximo para cada ponto de contato da ferramenta-peça. O cálculo final do RPM e velocidade de avanço ocorreu da seguinte forma:

- a) por meio do software *Solid Works*, o qual foi utilizado para modelar os corpos de prova, foi localizado o ponto exato de contato da ferramenta com a peça e, portanto, obter o diâmetro efetivo máximo de contato da fresa. Esta identificação do diâmetro foi localizada no raio com variação a cada 1°;

- b) a partir da equação 1, citada no capítulo 2, foram fixados parâmetros constantes, conforme informado no item 3.2.4 e para cada diâmetro efetivo de contato, foi calculado um RPM; e
- c) após cálculo do RPM para cada ponto de contato, através da equação 2, foi calculada a velocidade de avanço para cada ponto.

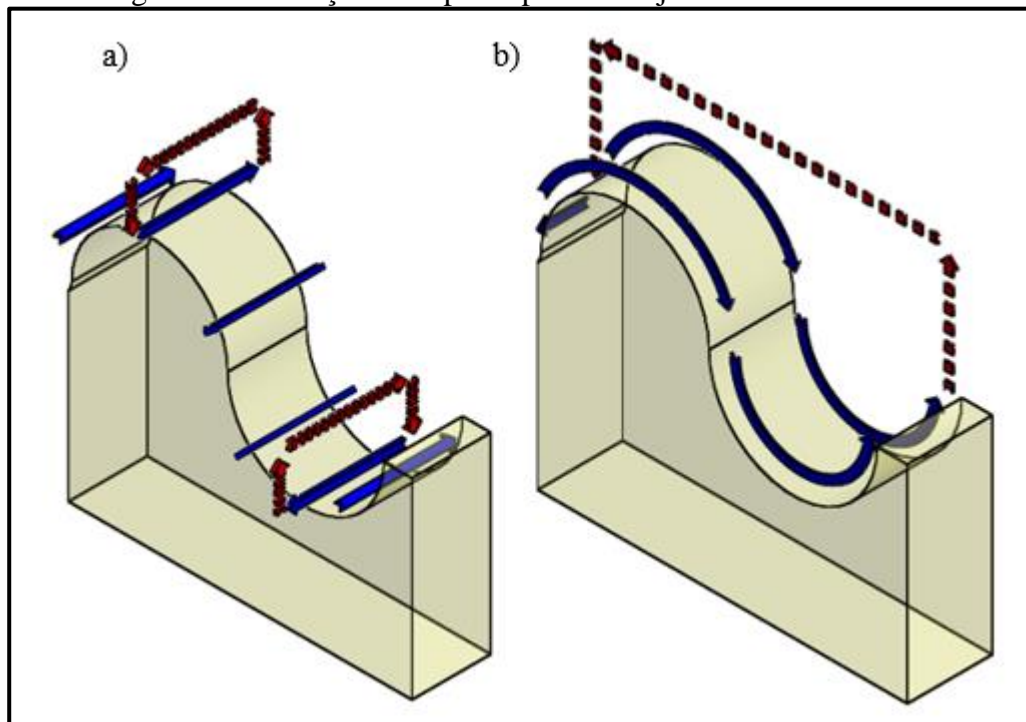
Para os ensaios nos dois corpos de prova com RPM e velocidade de avanço constantes, foi utilizado o diâmetro nominal da ferramenta para aplicação das equações e identificação dos parâmetros de corte.

Nos corpos de prova que tiveram seu RPM e velocidade de avanço ajustados conforme diâmetro efetivo máximo de contato da ferramenta, esperava-se um menor tempo de usinagem, pelo fato de os dados de corte serem mais elevados quando comparados com os parâmetros calculados com o diâmetro nominal da ferramenta. Desta forma foi realizada a medição comparativa do tempo de usinagem entre um caso com parâmetros de corte convencionais e com outro caso com os parâmetros variáveis. Esta redução em tempo de processamento pode trazer reduções de custo significativas para indústria quando pensarmos em produção em escala.

3.3.2 Sentidos de corte

Foi proposto usinar neste experimento quatro corpos de prova, sendo dois deles na condição com RPM constante, contemplando em um deles usinagem longitudinal ao perfil e outro no sentido transversal, em ambos os casos englobando usinagem ascendente e descendente. Os outros dois corpos de prova foram usinados com o RPM variável a cada ponto de contato do diâmetro efetivo máximo (d_e) da ferramenta com a peça, e da mesma forma que citado anteriormente um deles terá usinagem longitudinal ao perfil e o outro transversal. A fixação dos corpos de prova ocorreu através de uma morsa. A Figura 18 ilustra um esboço do corpo de prova utilizado, bem como a trajetória da ferramenta sendo transversal ao perfil em (a) e no sentido longitudinal em (b).

Figura 18 – Esboço do corpo de prova e trajetórias da ferramenta



Fonte: O autor (2018)

3.4 VARIÁVEIS DE SAÍDA DO PROCESSO

Como resultado da junção das variáveis e constantes do processo, foram detalhadas as saídas do processo, destacadas como análise de rugosidade e textura em cada ponto determinado.

3.4.1 Pontos para avaliação de rugosidade e textura

Como variável de saída do experimento proposto, foram avaliados os resultados de rugosidade e textura em pontos do corpo de prova onde entende-se ser possível compreender os efeitos dos diferentes diâmetros efetivos de contato entre ferramenta e peça.

A Figura 19 ilustra os pontos de medição e avaliação de 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. Para aproximação destes pontos, foi utilizado um goniômetro a partir do centro do raio para marcação do ponto exato de medição. Também pode ser verificado na Figura 19 as principais cotas dos corpos de prova, onde para o teste inicial foi utilizado raios de 52 e 48 mm e para réplica utilizado ambos raios de 50 mm.

A análise quantitativa dos corpos de prova foi realizada através do rugosímetro SJ-301, com ponteira de diamante de raio de 5 μm , o qual encontra-se no laboratório de usinagem da UCS. As medições foram realizadas no sentido transversal das peças para cada corpo de prova, baseando-se nas condições da norma ISO 4288:1996 e procedimentos adotados pelo Grupo de Usinagem (GUS) da UCS. Para definição do comprimento de amostragem da medição de rugosidade foi utilizada a norma ISO 4288:1996, cujos valores sugeridos encontram-se na Tabela 2. Objetivando-se um valor de R_a de até 1 μm , foi proposto um comprimento de amostragem (*Cutt-off*) para R_a de 0,8 mm. Para complementar as análises no aspecto qualitativo, quanto a textura, foi utilizado um estereoscópio trinocular de medição universal da marca Entex, modelo TNE-10B. A avaliação de textura foi realizada através da análise de imagens geradas pelo estereoscópio, da forma que os corpos de prova foram posicionados no ângulo proposto por uma mesa de seno com o auxílio de blocos padrão. Em 9 dos 10 pontos estipulados para medição, foram realizadas fotografias com o estereoscópio com ampliação de 15, 30 e 45 vezes. A programação da usinagem das peças, operação da máquina de usinagem, bem como as medições e geração de imagens, foram realizadas por um laboratorista qualificado para tais operações e também com apoio do GUS.

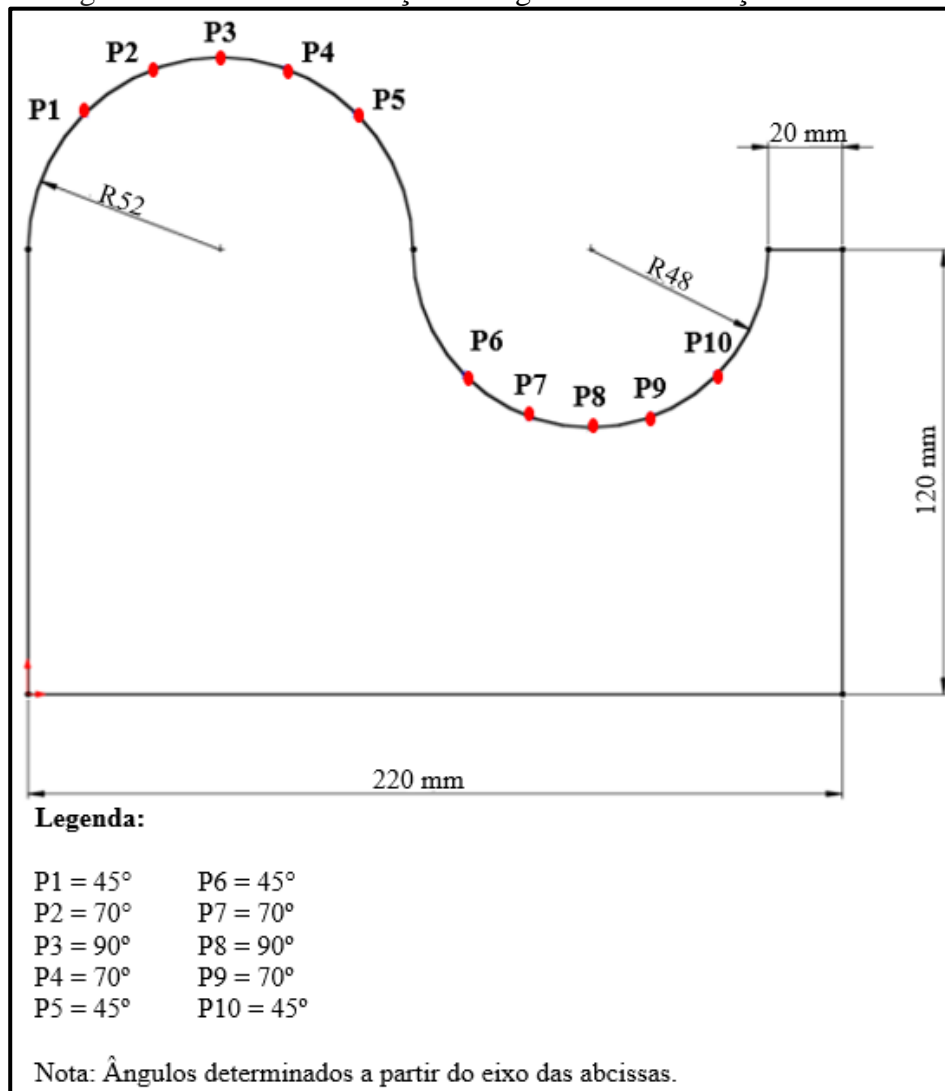
Realizou-se medições para 3 parâmetros: R_a , R_z e $R_{\text{máx}}$, da forma que para cada parâmetro foram realizadas 5 medições em pontos equidistantes no sentido transversal dos corpos de prova. Foi considerado como valor final para avaliação a média dos 5 valores para cada parâmetro de rugosidade.

Tabela 2 – Comprimento 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
2 - 10	10 - 50	2,5	12,5
> 10	> 50	8	40

Fonte: adaptado de ISO 4288:1996

Figura 19 –Pontos de medição de rugosidade e avaliação de textura



Fonte: O autor (2018)

3.5 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

Para identificar de forma mais clara onde estão as diferenças nos resultados, foi utilizado a metodologia da análise de variância (ANOVA). O método ANOVA permite duas saídas para análise, sendo a hipótese nula (H_0) a qual conclui-se que os valores analisados são iguais entre si, e por outro lado, a hipótese alternativa (H_1), onde 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 medias dos pontos analisados é a diferença mínima significativa (DMS). Um dos testes para encontrar a DMS é o teste “t” de *Student* onde realiza-se a comparação múltipla entre todas as médias analisadas de duas a duas, afim 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 significativa. A equação para cálculo da DMS, é definida a seguir, conforme Bertéli (2018):

$$DMS = t \sqrt{\frac{2MQR}{k}} \quad (4)$$

Onde: t dado estatístico tabelado, considerando graus de liberdade e nível de significância;

MQR é a média quadrática;

k é o número de repetições de cada tratamento.

Para o estudo em questão foi utilizado o nível de significância de 95% de confiança, a MQR foi retirada do ANOVA em cada caso e para o valor k, sempre se utilizou 10, em função das 5 medições do teste, somadas as 5 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 teste inicial e réplica.

Na sequência foi realizado o comparativo entre corpos de prova. Ressalta-se que o estudo foi aplicado para o parâmetro de rugosidade Ra, o qual foi medido no sentido transversal de cada corpo de prova. Para a condição dos CP01 e CP02 não foi realizado análise de variância para comparativo em função da limitação da máquina de usinagem, e com isso não se realizou réplica para estes corpos de prova. Este fato será detalhado no capítulo seguinte.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são exibidos e discutidos os resultados obtidos nos ensaios detalhados no capítulo 3. Além do ensaio inicial, realizou-se uma réplica do experimento para a proposta de usinagem transversal afim de ajudar nas discussões dos resultados. As discussões são apresentadas de forma separada para cada estratégia de usinagem adotada.

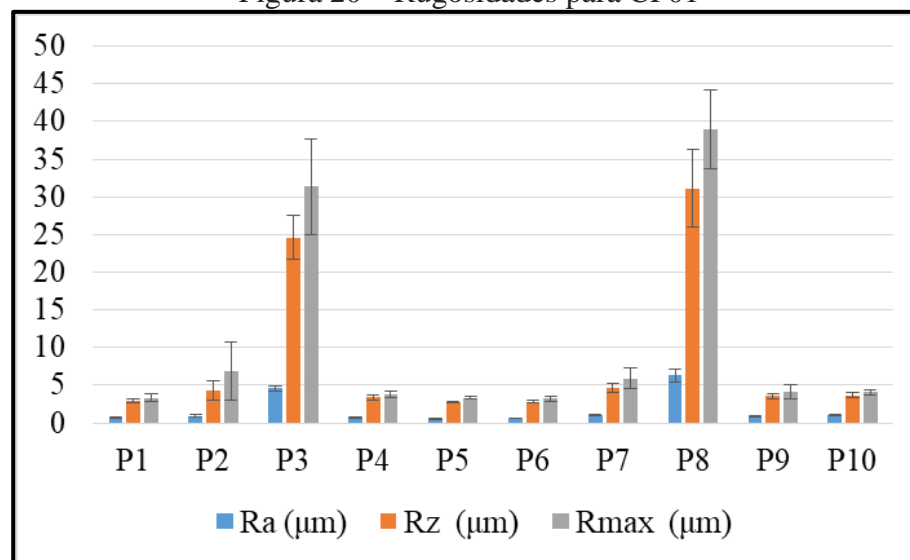
4.1 USINAGEM LONGITUDINAL COM RPM E AVANÇO CONSTANTE (CP01)

Esta condição consistiu em utilizar parâmetros convencionais para dados de corte na usinagem. Conforme dados fixos citados na seção 3.2.4, calculou-se o RPM e avanço para usinagem no sentido do raio/sentido longitudinal. Utilizou-se o RPM fixo de 2387 e velocidade de avanço de 955 mm/mim.

4.1.1 Análise de rugosidade para o CP01

Os valores de rugosidade coletados estão apresentados através do gráfico da Figura 20. Consta no gráfico a média das cinco medições para cada parâmetro para a condição de usinagem do corpo de prova 1.

Figura 20 – Rugosidades para CP01



Fonte: O autor (2018)

Nota-se pelo gráfico da Figura 20 elevados valores de rugosidade para os pontos 3 e 8,

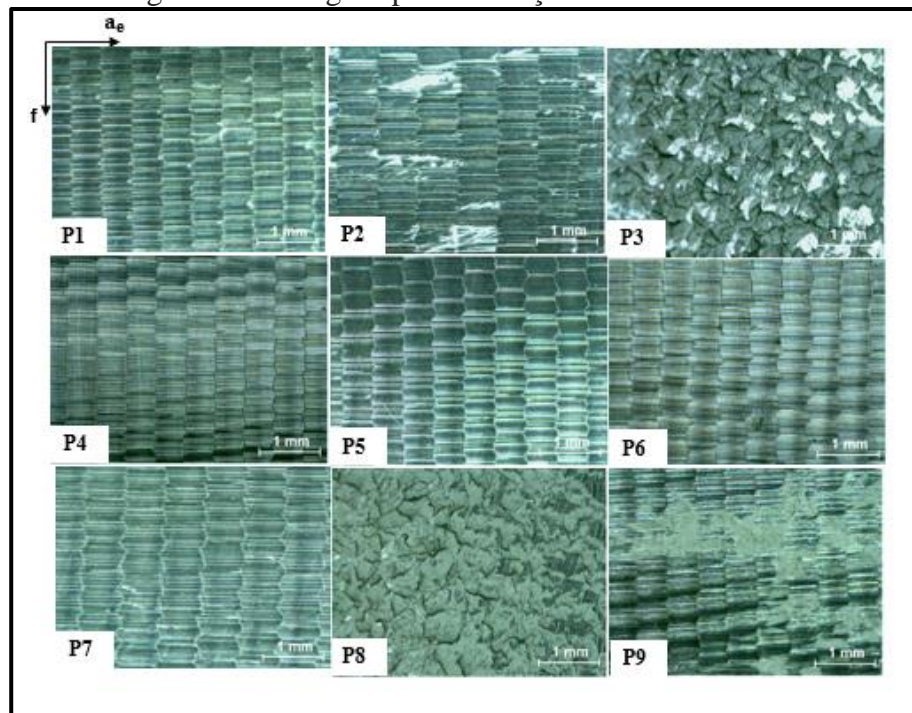
regiões onde a ferramenta atuou perpendicular a peça, utilizando principalmente seu centro para remoção do material. O resultado do parâmetro Ra no P3 não revela o perfil da superfície, porém quando analisa-se o R_{máx}, pode-se perceber um pico de irregularidade na superfície. Pode-se destacar para esta condição de usinagem, menores valores de rugosidade para os P1, P5 e P6, todos referentes a 45° de inclinação. O gráfico permite identificar um maior desvio padrão nos pontos 3 e 8, identificando assim uma grande variação da superfície nesta região.

Conforme resultados obtidos por Souza (2004), os pontos com usinagem que trabalham com região do gume mais afastado do centro da ferramenta apresentam melhores resultados de rugosidades (pontos a 45°) quando comparados com os demais pontos.

4.1.2 Análise de textura para o CP01

As imagens são demonstradas com ampliação de 15 vezes. Em cada ponto, posicionou-se o corpo de prova centralizado no estereoscópio. A Figura 21 mostra o consolidado de imagens geradas do ponto 1 ao ponto 9 para o primeiro corpo de prova.

Figura 21 – Imagens para avaliação de textura – CP01

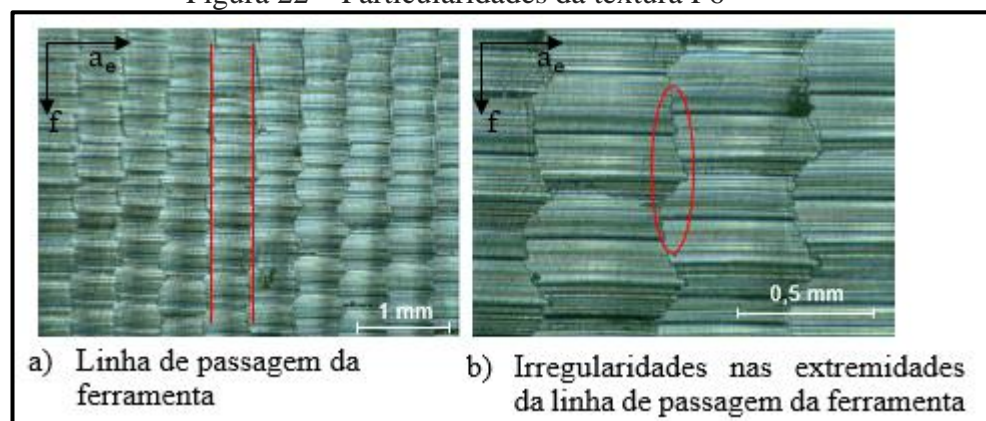


Fonte: O autor (2018)

De acordo com o item 4.1.1, pode-se observar que para os pontos 3 e 8 não ocorre a mecânica adequada do corte e sim o amassamento do material, em função da velocidade de

corte muito baixa no centro da ferramenta. Os pontos 4, 5, 6 e 7, os quais foram usinados com estratégia descendente, apresentam claramente as linhas de passagem da ferramenta, apesar de ser perceptível nas extremidades da linha de passagem da ferramenta irregularidades no caminho do gume. A Figura 22 exemplifica as linhas de passagem da ferramenta para o ponto 6 e também a irregularidade citada na extremidade da linha de passagem da ferramenta. Nos demais pontos, a condição ascendente apresentou irregularidades na superfície, apesar de a direção de passagem do gume estar bem definida.

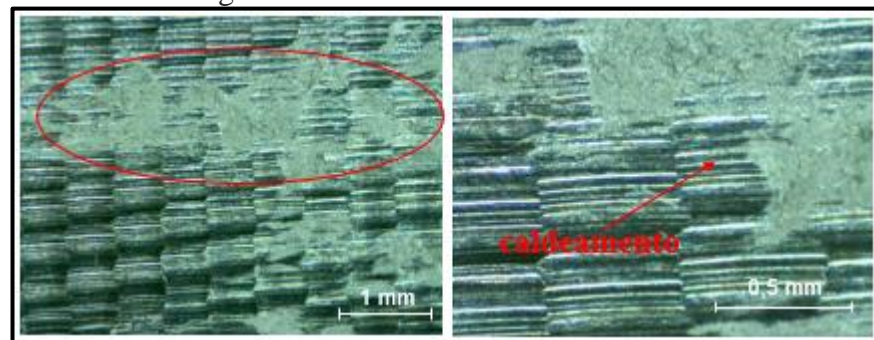
Figura 22 – Particularidades da textura P6



Fonte: O autor (2018)

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 e, desta forma, ocorre redução da resistência mecânica do material na região e, então, plastificação do material no local (ZEILMANN et al., 2011). A condição de deformação e caldeamento também foi identificada no estudo de Nicola (2008) para a estratégia ascendente. A Figura 23 indica o caldeamento na superfície do material.

Figura 23 – Caldeamento no P9 – CP01



Fonte: O autor (2018)

O estudo de Souza (2004) confirma que quando utilizado o centro da ferramenta ocorre o amassamento do material e não o corte propriamente dito em função da velocidade tender a zero no centro da fresa. Este fato pode ser comprovado pelas análises dos pontos 3 e 8, onde a ferramenta passou com seu centro pela peça causando amassamento do material e elevando significativamente os valores de rugosidade.

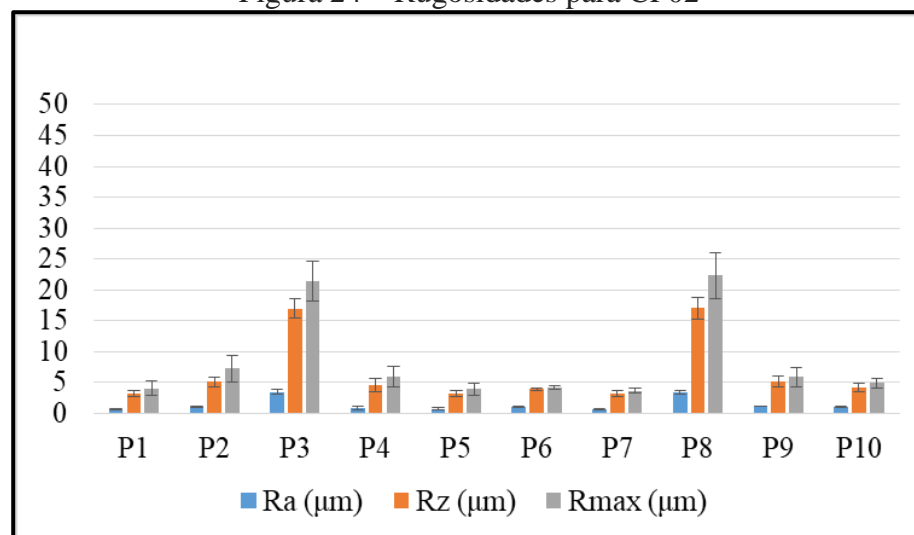
4.2 USINAGEM LONGITUDINAL COM RPM E AVANÇO VARIÁVEL (CP02)

Esta condição consistiu em utilizar parâmetros variáveis para RPM e velocidade de avanço. Conforme dados fixos citados na seção 3.2.4, calculou-se o RPM e velocidade de avanço para usinagem no sentido longitudinal ao raio variando estes parâmetros em função do diâmetro efetivo de corte da ferramenta a cada 1° do corpo de prova.

4.2.1 Análise de rugosidade para o CP02

Os valores de rugosidade coletados estão apresentados através do gráfico da Figura 24.

Figura 24 – Rugosidades para CP02



Fonte: O autor (2018)

Indica-se novamente neste corpo de prova que os parâmetros de rugosidade para os pontos 3 e 8 destoam dos demais pelo fato da utilização do centro da ferramenta para o corte, entretanto, os valores nestes pontos quando comparados com o CP01 tiveram reduções significativas dos parâmetros. O P3 teve 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.

Pode-se destacar que a redução de valores nos pontos 3 e 8 ocorrem em função da ferramenta trabalhar com a rotação e velocidade de avanço máximas nestas regiões pelo fato do diâmetro de contato em relação a peças serem menores neste ponto do corpo de prova. König e Klocke (1997) afirmam que os valores de rugosidade tendem a serem menores em regiões com maiores parâmetros de corte.

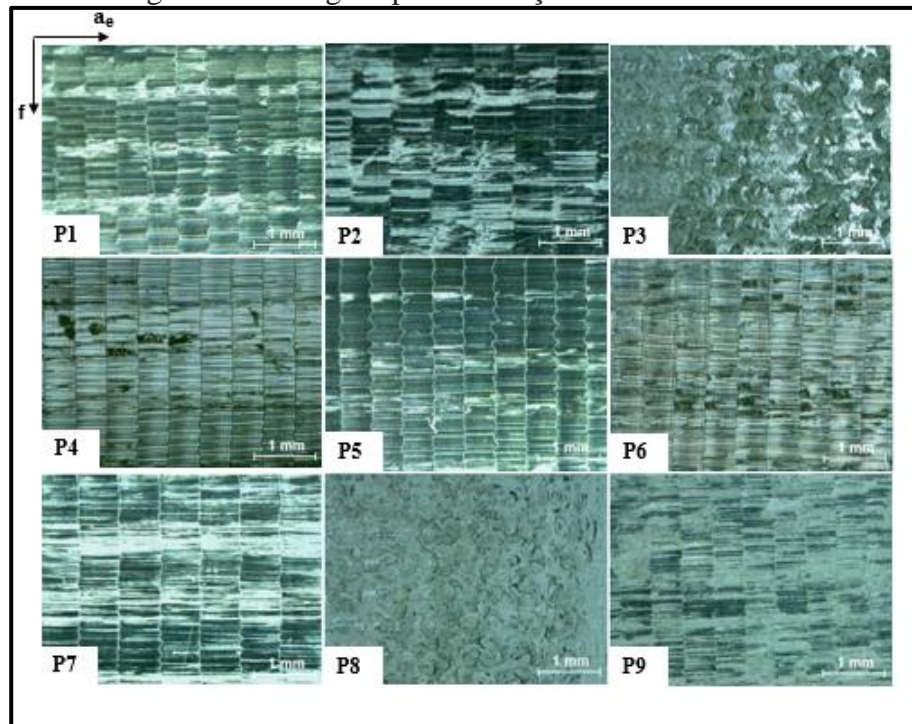
Na usinagem do CP02 foi identificada uma limitação da máquina durante o ensaio, onde aparentemente a máquina parava a cada linha do programa em cima da peça até chegar na rotação desejada. Este fato é plausível de ser uma justificativa para não haver grandes melhorias na condição superficial nos demais pontos. Souza (2018) comenta que na leitura do programa pelo comando numérico, existe um tempo médio de processamento de cada linha do programa para envio dos sinais para os acionamentos 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 em solavancos na máquina durante do processo, provocando irregularidade na movimentação da ferramenta e desta forma qualidade superficial não satisfatória.

Desta forma 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 uma comparação direta em relação aos parâmetros convencionais (CP02 com CP01), uma vez que a mesma foi prejudicada pelos solavancos da máquina, impactando na qualidade superficial e tempo de processamento. Com este cenário, optou-se pela paralisação dos ensaios para o sentido de usinagem longitudinal. O ensaio inicial teve importância relevante para o estudo, visto que permitiu identificar variáveis não previstas no início processo e com isso, permitir que fosse dado sequência para os ensaios com as demais estratégias que não apresentaram limitação.

4.2.2 Análise de textura para o CP02

Através da Figura 25, mostra-se o consolidado de imagens geradas do ponto 1 ao ponto 9 para o segundo corpo de prova, complementando os dados de rugosidade obtidos. Todas as imagens são demonstradas com ampliação de 15 vezes com fotografias realizadas ao centro do corpo de prova a cada ponto.

Figura 25 – Imagens para avaliação de textura – CP02



Fonte: O autor (2018)

Os pontos 3 e 8, 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 nesta região. Os pontos 2 e 9, apresentaram, conforme Figura 22, picos de $R_{m\acute{a}x}$, que pode-se identificar nas imagens de textura de acordo com a Figura 23, onde nota-se possivelmente material aderido ou caldeamento à superfície usinada. O P1, porém, em menor proporção, também apresenta característica de caldeamento ou material aderido.

Pode-se comentar que os pontos 1, 2 e 9 citados, foram usinados com a condição vertical e ascendente onde no estudo de Nicola (2008) também foi identificado a pior condição de trabalho para esta estratégia, encontrando rebarbas e/ou material aderido à superfície usinada. Nicola (2008) também afirma que o contorno das células, ou seja, as demarcações das ondulações da passagem da ferramenta podem justificar a regularidade ou a irregularidade de uma superfície. Com exceção do ponto 3 e 8, os demais pontos permitem a identificação da passagem da ferramenta, porém ainda assim apresentam diferenças de homogeneidade e regularidade no tamanho das células, o que pode complementar a análise sob os valores de rugosidade.

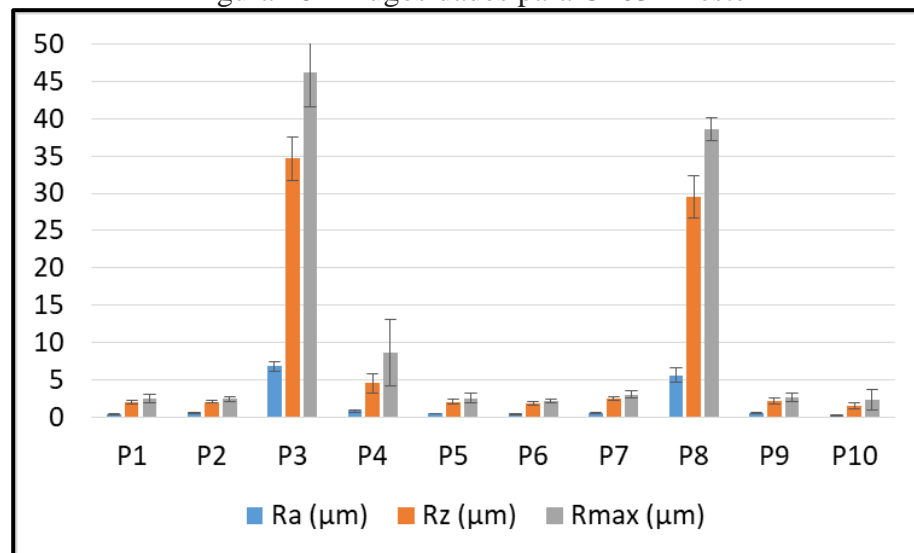
4.3 USINAGEM TRANSVERSAL COM RPM E AVANÇO CONSTANTE (CP03)

Esta condição consistiu em utilizar parâmetros convencionais para dados de corte na usinagem. Conforme dados fixos citados na seção 3.2.4, calculou-se o RPM e avanço para usinagem no sentido transversal ao raio. Utilizou-se o RPM fixo de 2387 e velocidade de avanço de 955 mm/mim. Para o CP03, foi realizado um teste inicial e, na sequência, a réplica do ensaio.

4.3.1 Análise de rugosidade para o CP03

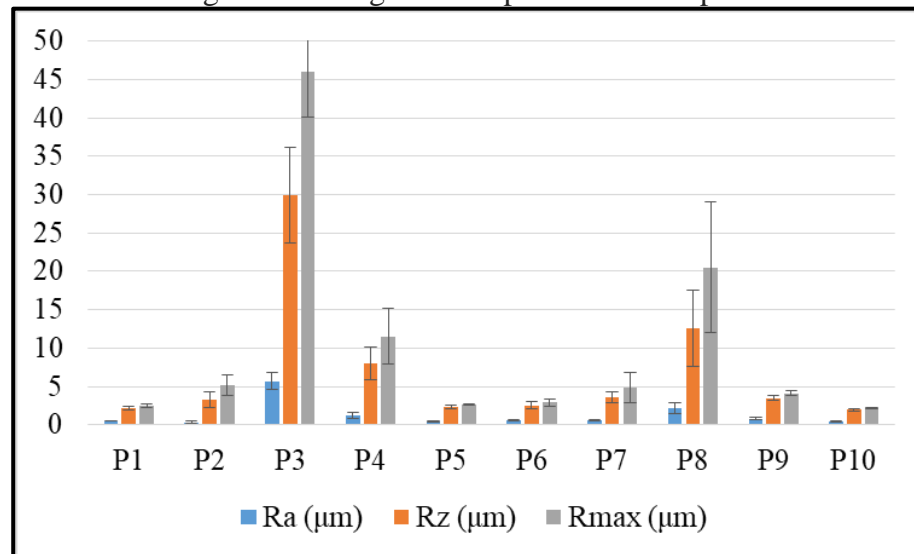
Os valores de rugosidade coletados estão apresentados através do gráfico da Figura 26 para o teste e Figura 27 para a réplica.

Figura 26 – Rugosidades para CP03 - Teste



Fonte: O autor (2018)

Figura 27 – Rugosidades para CP03 - Réplica



Fonte: O autor (2018)

O consolidado de medições do CP03 entre teste e réplica identificou que entre os pontos do CP03 existem diferenças de rugosidades a serem destacadas, conforme análise de variância realizado. Desta forma a ANOVA rejeitou H_0 , sugerindo que uma comparação ponto a ponto fosse realizada.

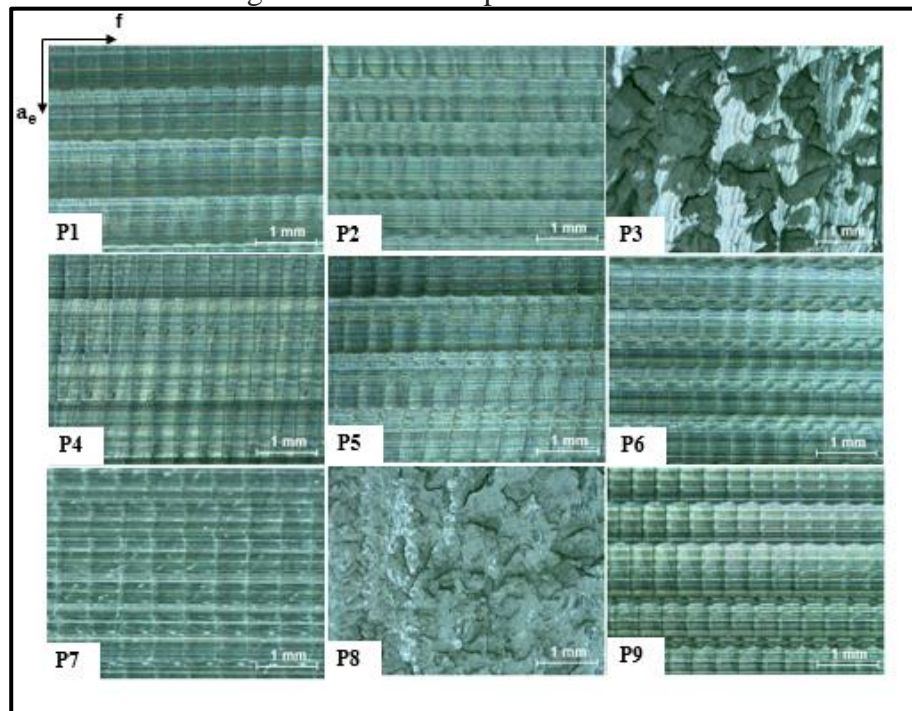
As análises foram efetuadas considerando a média entre os valores do teste e réplica em conjunto. Através do teste *t-student* para identificar diferença mínima significativa entre os pontos para o CP03, pode-se concluir que o P3 e o P8 são os pontos que diferem das demais regiões. O teste DMS destacou também diferença significativa entre o P4 e P10, onde a condição ascendente (P10) teve resultado de Ra de $0,358 \mu\text{m}$ e o P4 com rugosidade Ra de $1,044 \mu\text{m}$. Para os demais pontos, quando comparados entre si, não foi identificado diferença significativa entre os valores de Ra.

Analisando os parâmetros Ra, Rz e Rmáx, para as angulações entre si considerando separadamente o raio côncavo e convexo, por exemplo, P1 com P5, P2 com P4, P6 com P10 e P7 com P9, identifica-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.

4.3.2 Análise de textura para o CP03

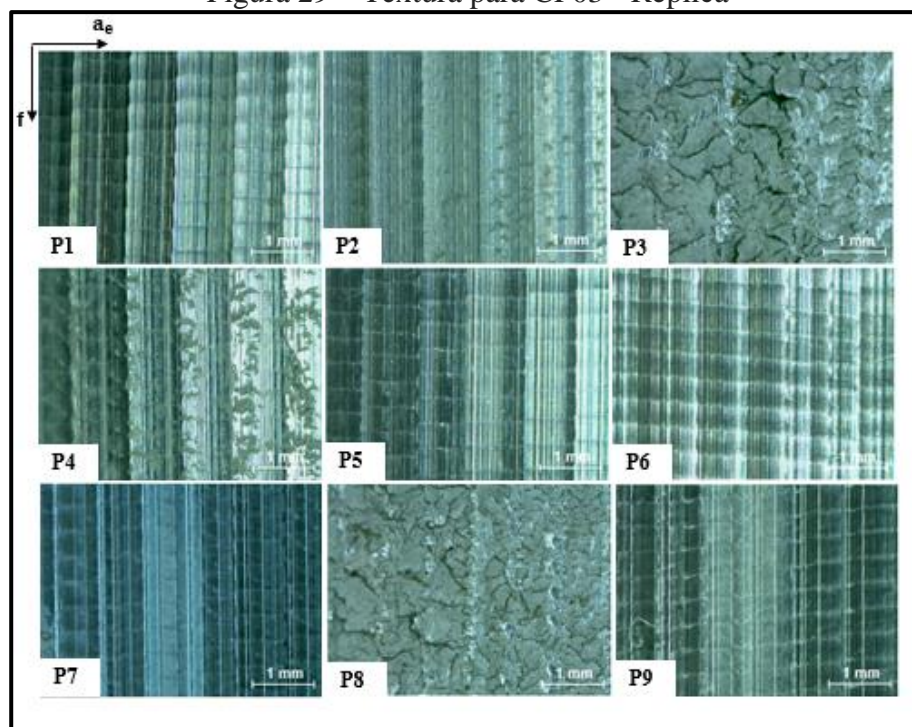
Através da Figura 28 e 29 mostra-se o consolidado de imagens geradas do ponto 1 ao ponto 9 para o terceiro corpo de prova, complementando os dados de rugosidade obtidos.

Figura 28 – Textura para CP03 - Teste



Fonte: O autor (2018)

Figura 29 – Textura para CP03 - Réplica

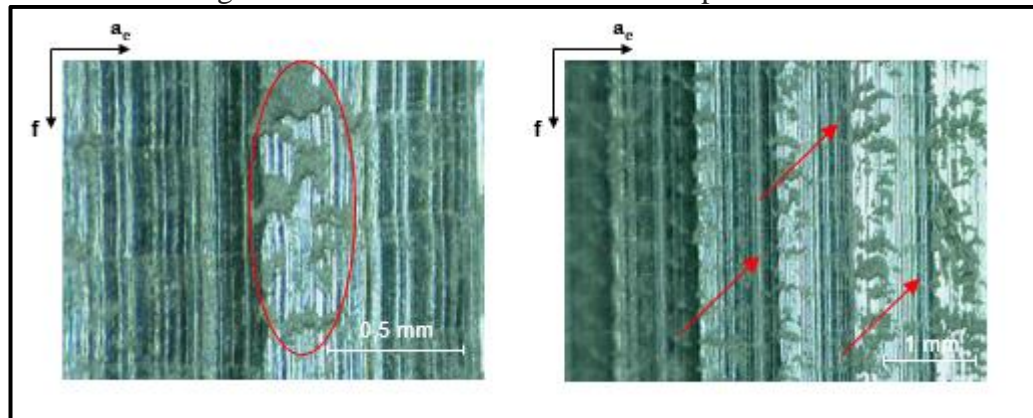


Fonte: O autor (2018)

Pode-se observar pelas imagens geradas comportamento de não tão fácil identificação das linhas de passagem da ferramenta para a estratégia em questão. O P1 pode ser considerado o ponto com maior homogeneidade das linhas de passagem da ferramenta, o qual possui também um dos menores valores de rugosidade atrelado à condição de usinagem do CP03 (Ra

= 0,49 μm de média entre teste e réplica). Os pontos com os maiores picos de rugosidade são identificados pela má formação da textura no material, os quais podem ser identificados pelo P3 e P8 tanto para o teste inicial, quanto para réplica. Uma situação relevante que chama atenção na réplica, é o material aderido à superfície na região do ponto 4, conforme indicado na Figura 30.

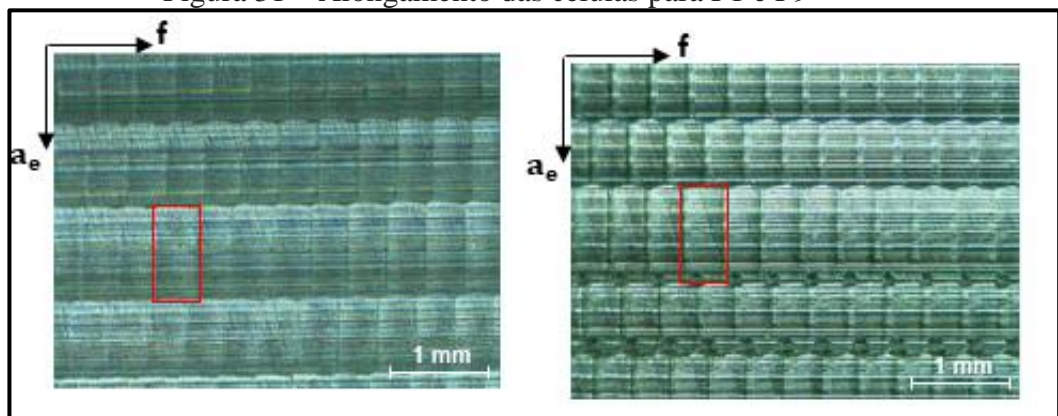
Figura 30 – Material aderido ao P4 - Réplica



Fonte: O autor (2018)

Pode-se destacar também o alongamento das células na direção do incremento lateral nos pontos 1 e 9 do teste inicial, por exemplo. Este comportamento 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 31 ilustra este alongamento para os pontos citados. Em contrapartida, este comportamento não foi identificado por Vacaro (2013). Em seu estudo, ao analisar a estratégia horizontal ascendente, o autor encontrou o resultado inverso e não esperado, possivelmente pela ocorrência de instabilidades dinâmicas na usinagem dos corpos de prova.

Figura 31 – Alongamento das células para P1 e P9



Fonte: O autor (2018)

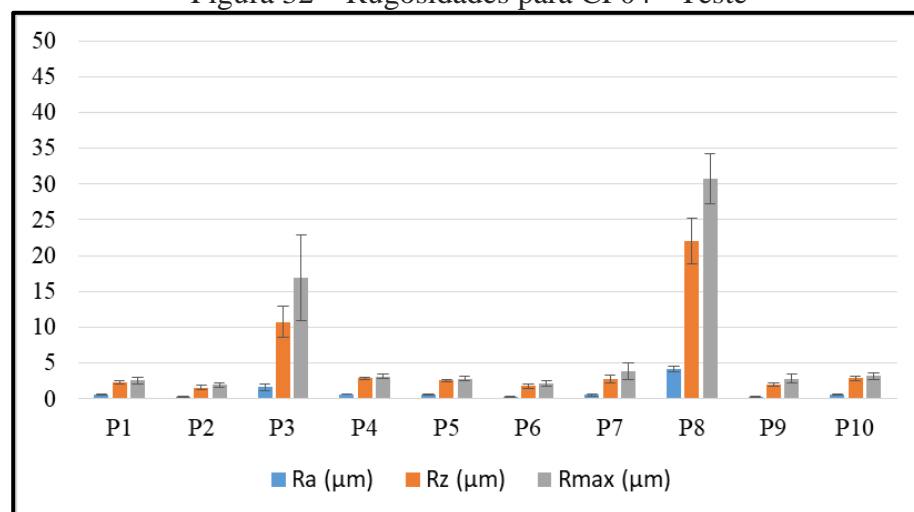
4.4 USINAGEM TRANSVERSAL COM RPM E AVANÇO VARIÁVEIS (CP04)

Esta condição consistiu em utilizar parâmetros variáveis para RPM e velocidade de avanço. Conforme dados fixos citados na seção 3.2.4, calculou-se o RPM e velocidade de avanço para usinagem no sentido transversal ao raio variando estes parâmetros em função do diâmetro efetivo de corte do corpo de prova. De acordo com Erdim, Lazoglu e Ozturk (2005), o gume 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 ferramenta e peça.

4.4.1 Análise de rugosidade para o CP04

Os valores de rugosidade coletados estão apresentados através do gráfico da Figura 32 para o teste e Figura 33 para réplica.

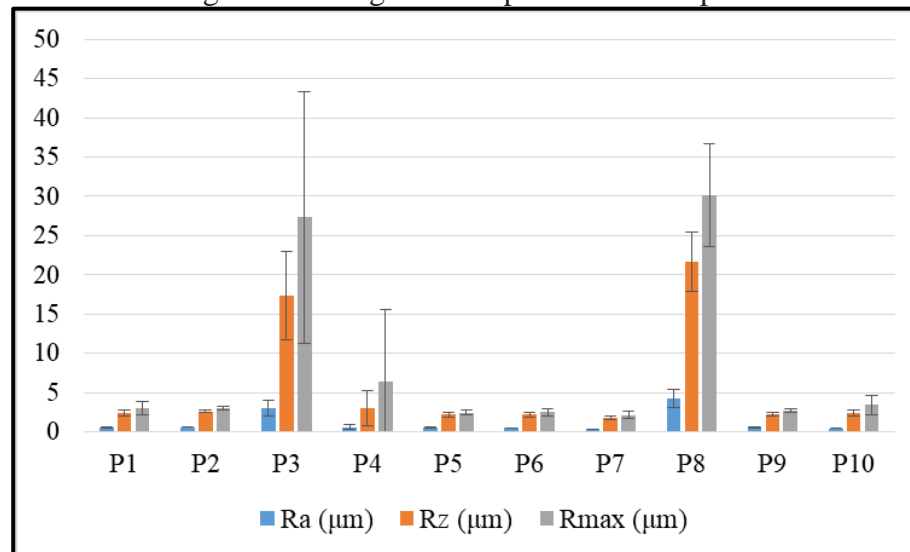
Figura 32 – Rugosidades para CP04 - Teste



Fonte: O autor (2018)

É possível observar resultados de rugosidade muito semelhantes ao CP03, porém cabe ressaltar valores significativamente relevantes como contribuição deste trabalho ao fresamento. Por exemplo, os valores dos pontos 2, 6 e 9 com resultado de Ra de $0,3 \mu\text{m}$, uma vez que os valores comuns para o fresamento são aproximadamente de $1,6 \mu\text{m}$ e valores atingíveis e possíveis na casa de $0,4 \mu\text{m}$ (DIN 4766, 1981).

Figura 33 – Rugosidades para CP04 - Réplica



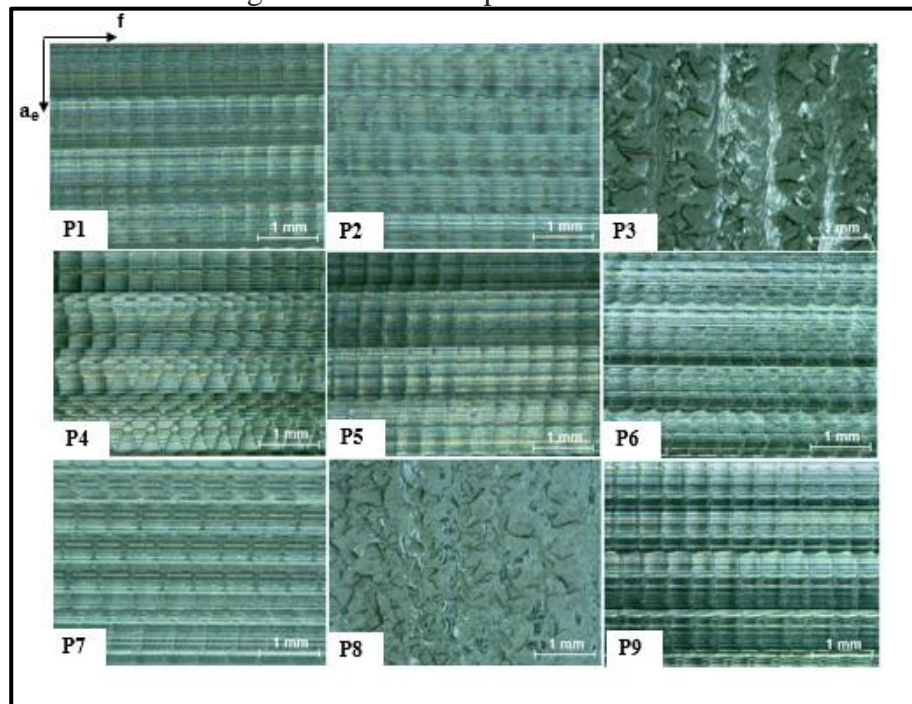
Fonte: O autor (2018)

Para comparativo entre os pontos dentro do CP04, foram consolidados os valores de medição do teste e da réplica afim de verificar através da metodologia da análise de variância se existem diferenças entre os pontos do CP04. A análise teve como saída a rejeição de H_0 , ou seja, confirmando que existem pontos diferentes entre si. Através da verificação 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 diferenças significativas. A diferença entre o P4 e P10 identificada na usinagem do CP03 foi equalizada para condição de usinagem do CP04 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

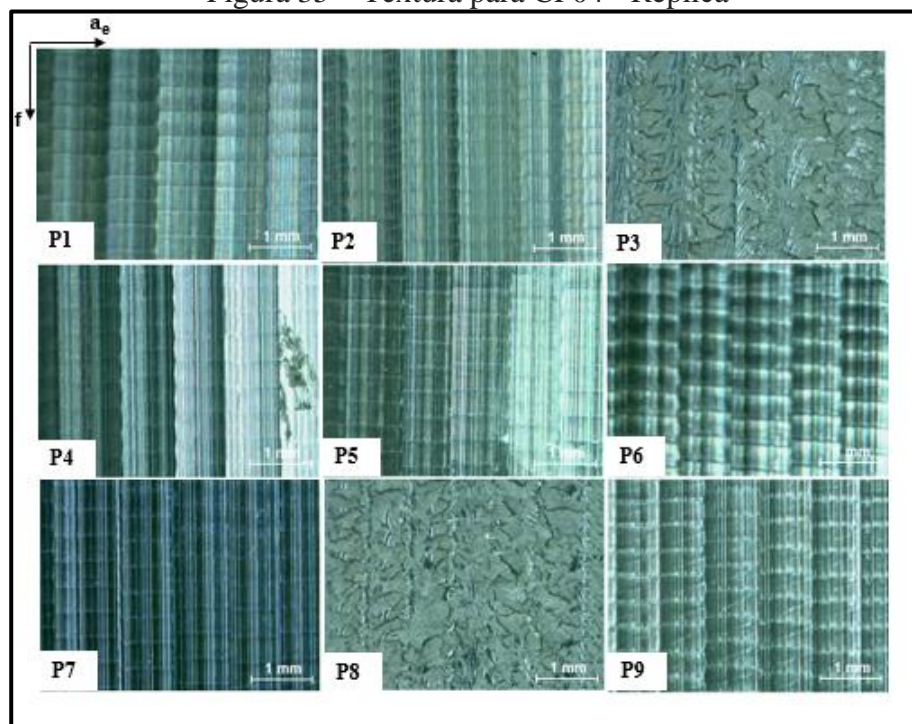
Através da Figura 34 e 35 mostra-se o consolidado de imagens geradas do ponto 1 ao ponto 9 para o quarto corpo de prova, considerando teste e réplica, respectivamente.

Figura 34 – Textura para CP04 - Teste



Fonte: O autor (2018)

Figura 35 – Textura para CP04 - Réplica



Fonte: O autor (2018)

Da mesma forma que para os parâmetros convencionais, as imagens encontradas para o CP04 evidenciam irregularidades na formação da superfície e alongamento das células em alguns pontos. Entre todos os corpos de prova, o CP04 foi o que permitiu, mesmo que de forma

não tão clara, a identificação da passagem da ferramenta no ponto três, mesmo com o amassamento do material ocorrido neste ponto. Para os demais pontos é possível salientar que para o CP04 existe maior homogeneidade de superfície na maioria dos pontos e fácil identificação das linhas de passagem da ferramenta.

Pode-se destacar que há algum tipo de instabilidade de processo, identificado mais claramente no ponto 4, tanto para o teste quanto para a réplica. Nota-se pelas Figuras 34 e 35 que no teste inicial pode ter ocorrido vibração no processo em função da estratégia descendente, somado a utilização da parte mais central do gume de corte da ferramenta. Neste mesmo ponto para réplica, identifica-se material aderido na região. As imagens complementam os resultados de rugosidade neste ponto, onde tem-se neste ponto picos significativos de valores de rugosidade.

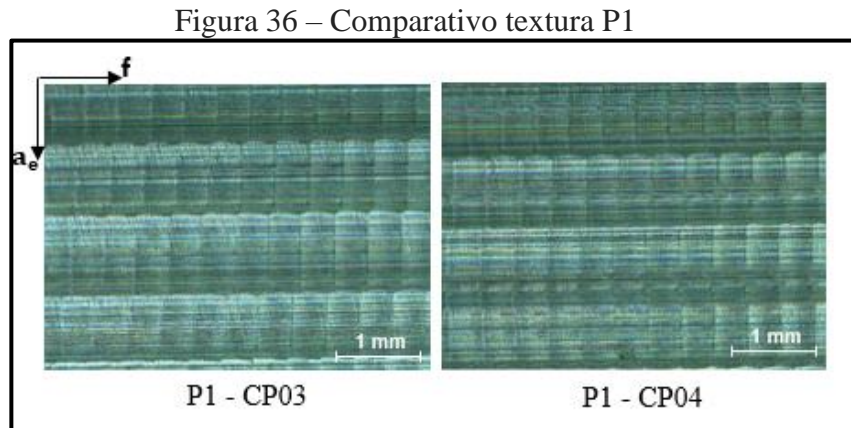
4.5 COMPARATIVO ENTRE CP03 E CP04

A análise de variância ANOVA foi aplicada também em comparativo entre os corpos de prova 03 e 04, porém avaliando ponto a ponto entre eles. 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 em qualidade superficial nestes pontos quando comparado 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 convencionais). Pode-se ressaltar uma redução no R_a , por exemplo no ponto 3, onde em relação ao CP03 chega-se a aproximadamente 173% de ganho em qualidade superficial, justificando-se pelo aumento dos parâmetros de corte na estratégia do CP04. Por mais que neste ponto ocorra fortemente o fenômeno de amassamento do material, é nesta região que a ferramenta está com a maior rotação e velocidade de avanço, justificando assim o ganho em qualidade superficial neste ponto. O único ponto que não teve melhoria na qualidade superficial foi o ponto 10, onde o ANOVA sinalizou a diferença entre pontos. Quando analisa-se as médias do CP03 com o CP04, verifica-se que, para o CP04, o P10 teve aumento no parâmetro de R_a de aproximadamente 43%.

A análise entre CP's pode ser visualizada a partir da ótica onde 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 a réplica não impactaram em alterações significativas de resultado. A Figura 36 mostra a semelhança de homogeneidade entre o CP03 e CP04 para o ponto 1.



Fonte: O autor (2018)

4.6 TEMPO DE PROCESSO

Um aspecto importante no comparativo entre corpos de prova, é o tempo que cada estratégia adotada leva para usinar a peça. A proposta de usinagem do CP04 foi aumentar os parâmetros de corte, conforme a região de contato da ferramenta diminuía ao longo do modelo. König e Klocke (1997) afirmam que o aumento dos parâmetros estão ligados diretamente a não só ganhos em qualidade superficial, mas também em tempo de processo. Pode-se ressaltar que existe ganho em tempo na usinagem do CP04 em relação ao CP03, visto que, de acordo com as equações mostradas na seção 2.1.1.4, conforme ajusta-se o parâmetro de RPM com o diâmetro efetivo de contato, conseqüentemente o aumenta-se o parâmetro da velocidade de avanço [mm/min] e, com isso, a ferramenta percorre o mesmo comprimento de usinagem de uma forma mais rápida, quando comparado aos parâmetros convencionais do CP03. Durante a usinagem da réplica para o CP03 e CP04 foi mensurado o tempo de usinagem desde o ponto inicial do programa de usinagem até completar a usinagem da peça. A Tabela 3 mostra os tempos medidos em cada estratégia.

Tabela 3 – Comparativo de tempos

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

Fonte: O autor (2018)

5 CONCLUSÃO

Através dos ensaios realizados para os quatro corpos de prova, foi possível compreender a influência das estratégias de corte adotadas, juntamente com a variação dos seus parâmetros de avanço e RPM na condição superficial de cada corpo de prova. Os resultados apresentados permitem que seja afirmado que o aumento dos parâmetros de corte tendem a melhorar a qualidade superficial do corpo usinado, o que está de acordo com a bibliografia pesquisada.

Não foi possível chegar a resultados conclusivos para a estratégia de usinagem longitudinal, quando comparado o processo com para parâmetros convencionais (CP01) com parâmetros propostos (CP02) pela limitação da máquina de usinagem, conforme citado no capítulo anterior. Apesar da limitação da máquina para comparativo entre CP01 e CP02, é possível afirmar que em ambos corpos de prova o P3 e o P8 destoam dos demais em função do amassamento do material quando a ferramenta atua principalmente com seu centro. Mesmo com o amassamento do material, no P3 é possível concluir que houve melhora nos níveis de rugosidade pelo aumento dos parâmetros de corte, onde por exemplo, o parâmetro Ra teve uma redução de 33% no CP02 em relação ao CP01. Pode-se considerar que para parâmetros usuais, no caso do CP01, melhores resultados são identificados quando a fresa trabalha mais próximo de seu diâmetro nominal (pontos a 45°). Para os corpos de prova com usinagem transversal, sendo para parâmetros convencionais (CP03) e parâmetros propostos (CP04) foi possível concluir também que em ambos os casos, quando analisados individualmente, possuem o P3 e P8 que diferem dos demais pontos em função do amassamento do material nesta região de contato da ferramenta peça por conta da velocidade no centro da fresa tender a zero, tornando assim a região mais crítica para operação. No CP03, o P4 mostra uma diferença significativa em relação ao P10, o que leva-se 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 convencionais. As imagens geradas em cada ponto possibilitaram complementar os dados de rugosidade e entendimento dos resultados.

A análise comparativa entre o corpo de prova 3 e 4 para cada ponto analisado, permite afirmar que é vantajoso realizar os cálculos para o diâmetro de contato efetivo entre ferramenta e peça para parâmetros de usinagem. Dos dez pontos analisados, observou-se melhoria da qualidade superficial em cinco pontos, em outros quatro a qualidade se manteve igual e em apenas um ponto, teve uma 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 o P4 e P10 identificada na usinagem com parâmetros convencionais,

deixando apenas em evidência as diferenças significativas nos pontos três e oito.

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 ganho em tempo de aproximadamente 29%, quando comparado a parâmetros convencionais da indústria para a condição de usinagem na direção transversal.

6 PROPOSTA 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) realização dos ensaios no sentido longitudinal dos corpos de prova 01 e 02 em um centro de usinagem com maior capacidade de processamento para comprovar o ganho na qualidade superficial para este sentido de usinagem;
- b) estudar e aplicar modelos matemáticos para a condição proposta neste estudo afim de confrontar os resultados obtidos;
- c) 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;
- d) realizar o experimento com ferramenta de metal duro para confronto de resultados;
- e) realizar estudos para entendimento da vibração e atuação das forças de usinagem em pontos que não apresentaram melhora significativa na qualidade superficial entre os corpos de prova; e
- f) replicar os ensaios considerando o diâmetro efetivo mínimo de contato entre ferramenta e peça e confrontar com os resultados obtidos neste experimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAPTISTA, R.; SIMÕES, J.f Antune. Three and five axes milling of sculptured surfaces. **Journal Of Materials Processing Technology**. p. 398-403,2000.
- BATISTA, Marcelo Ferreira. **Estudo da rugosidade de superfícies planas usinadas por fresas de topo esférico**. 2006. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- BERTÉLI, Michele Otobelli. **Testes de comparação de médias**. Caxias do Sul: Notas de Aula, 2018. 18 slides, color.
- BET, Luciano. **Estudo da medição da textura de superfícies com sondas mecânicas e com sondas ópticas tipo seguidor**. 1999. 243 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.
- CARVALHO, Agnes Cordeiro de. O uso do microscópio e estereoscópio trinoculares no trabalho pedagógico destinado ao autoconhecimento: contribuições de professores de biologia e alunos do ensino médio. **O Professor Pde e Os Desafios da Escola Pública Paranaense**. v.1 - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- CHAO, Sun; ALTINTAS, Yusuf. Chatter free tool orientations in 5-axis ball-end milling. **International Journal Of Machine Tools & Manufacture**. p. 89-97. abr. 2016.
- DARÉ, Giovanni. **Proposta de um modelo de referência para o desenvolvimento integrado de componentes de plásticos injetados**. 2001. 219 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
- DEUS, Priscila Roel de. **Análise do Processo de Fresamento de MDF em centro de usinagem CNC**. 2015. 143 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2015.
- DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG. **DIN 4766**: Teil 2, Herstellverfahren-, der Rauheit von Oberflächen., Berlin,1981.
- DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG. **DIN 8580**: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung. Germany, 2003.
- DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: M M, 1999. 242 p.
- ERDIM, H.; LAZOGLU, I.; OZTURK, B. Feedrate scheduling strategies for free-form surfaces. **International Journal Of Machine Tools & Manufacture**. Istanbul, p. 747-757. set. 2005.
- FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Carlos: Edgard Blücher Ltda, 1969. 751 p.

FINKLER, Maira. **Desenvolvimento de Compósitos com Base em Rejeito de Tecidos de Algodão e Acrílico em Matriz de Polietileno de Alta Densidade**. 2005. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2005.

GRZENDA, M.; BUSTILLO, A. The evolutionary development of roughness prediction models. **Applied Soft Computing**, v. 13, p. 2913–2922, 2013.

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

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 4288: Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Rules and procedures for the assessment of surface texture**. Geneva, 1996.

JUNG, Tae-sung; YANG, Min-yang; LEE, Kang-jae. A new approach to analysing machined surfaces by ball-end milling, part I: Formulation of characteristicclines of cut remainder. **Advanced Manufacturing Technology**. Mar. 2004.

KÖNIG, Wilfried; KLOCKE, Fritz. **Fertigungsverfahren - Drehen, Bohren, Fräsen**. Aachen, Alemanha: Springer Verlag, 1997. 565 p.

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

MUNDO DO PLÁSTICO. **Polimento em moldes de injeção de termoplásticos: você sabe fazer?** Disponível em: <<https://mundodoplastico.plasticobrasil.com.br/dezembro-polimento-de-moldes-como-fazer/>>. Acesso em: 03 dez. 2018.

NICOLA, Gerson Luiz. **Análise de superfícies fresadas por diferentes estratégias em aço AISI H13 endurecido**. 2008. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciências dos Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2008.

PIVETTA, C. S. **Uma contribuição ao estudo do fresamento de aço endurecido com fresa de topo esférico**. 2005, 110 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

RIBEIRO, José Luis Duarte; CATEN, Carla Schwengber Ten. **Projeto de Experimentos**. Porto Alegre: Os Autores, 2011. 142 p. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UFRGS.

SEBRAE. **Qual é a participação dos setores da economia no PIB?** Disponível em: <<http://datasebrae.com.br/pib/>>. Acesso em: 03 dez. 2018.

SECCO, Daniel de Carvalho. **Fresamento de aços para moldes e matrizes em condições criogênicas**. 2015. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Materiais e Processos de Fabricação, Faculdade de Engenharia - Unesp - Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2015.

SOUZA, Adriano Fagali de. **Contribuições ao fresamento de geometrias complexas aplicando a tecnologia de usinagem com altas velocidades**. 2004. 171 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

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

STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de Corte II: Brocas, Alargadores, Ferramentas de Roscar, Fresar, Brochar, Rebolos, Abrasivos**. Florianópolis: Daufsc, 1995. 314 p.

TABENKIN, Alex. **Surface finish: a machinist's tool. A design necessity**. Mar. 1999. Disponível em: <<https://www.mmsonline.com/articles/surface-finish-a-machinist39s-tool-a-design-necessity>>. Acesso em: 01 mai. 2018.

TOH, C.k.. Surface topography analysis in high speed finish milling inclined hardened steel. **Precision Engineering**. Birmingham, p. 386-398. jan. 2004.

TÖNSHOFF, H.k.; CAMACHO, J. Hernández. Die manufacturing by 5- and 3- axes milling: Influence of surface shape on cutting conditions. **Journal Of Mechanical Working Technology**. Amsterdam, p. 105-119.1989.

URBANSKI, J.P., KOSHY, P., DEWES, R.C., e ASPINWALL, D.K., High speed machining of moulds and dies for net shape manufacture. **Materials And Design**, Birmingham, v. 21, p.395-402, 2000.

USINAGEM BRASIL. Indústria de Caxias do Sul crescerá 10% este ano. 2011. Disponível em: <<http://www.usinagem-brasil.com.br/4602-industria-de-caxias-do-sul-crescera-10-este-ano/>>. Acesso em: 17 mar. 2018.

VACARO, Tiago. **Otimização do fresamento de topo esférico de planos inclinados aplicando o método de algoritmos genéticos**. 2013. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2013.

VAKONDIOS, Dimitrios et al. Influence of milling strategy on the surface roughness in ball end milling of the aluminum alloy Al7075-T6. **Measurement**. p. 1480-1488. mar. 2012.

WALTER TOOLS. Disponível em: <<https://www.walter-tools.com/pt.>> Acesso em: 29 maio 2018.

ZEILMANN, Rodrigo Panosso. **GEODEF**. Caxias do Sul: Notas de Aula, 2018. 59 slides, color.

ZEILMANN, Rodrigo Panosso et al. Influência da ferramenta sobre a integridade superficial no processo de furação. **ABCM – Associação brasileira de engenharia e ciências mecânicas**. abr. 2011.

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

APÊNDICE A –RUGOSIDADES PARA O ENSAIO INICIAL E RÉPLICA

Da Tabela 4 a 21, são apresentados os valores de rugosidade medidos para o ensaio inicial e réplica considerando 5 medições para ponto abrangendo os parâmetros Ra, R_{máx} e Rz.

Tabela 4 – Medições Ra CP01

Pontos	CP01 - Ra					Soma	Média	Desvio Padrão
	1	2	3	4	5			
P1	0,61	0,63	0,58	0,71	0,77	3,30	0,66	0,08
P2	0,71	1,19	1,1	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	0,6	0,5	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	5,3	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: O Autor (2018)

Tabela 5 – Medições R_{máx} CP01

Pontos	CP01 - R _{máx}					Soma	Média	Desvio Padrão
	1	2	3	4	5			
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	29,6	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	5,6	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: O Autor (2018)

Tabela 6 – Medições Rz CP01

Pontos	CP01 - Rz					Soma	Média	Desvio Padrão
	1	2	3	4	5			
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	29,03	24,27	25,25	123,08	24,62	2,93

P4	3,03	3,26	3,9	3,28	3,33	16,80	3,36	0,32
P5	2,7	2,66	2,9	2,85	2,65	13,76	2,75	0,12
P6	2,79	3,06	2,6	2,79	2,65	13,89	2,78	0,18
P7	3,77	4,97	5,07	5,12	4,4	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	3,9	3,28	3,4	3,9	17,70	3,54	0,33
P10	3,73	3,83	4,08	3,19	3,67	18,50	3,70	0,33

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 7 – Medições Ra CP02

CP02 - Ra								
Pontos	1	2	3	4	5	Soma	Média	Desvio padrão
P1	0,6	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	3,6	3,52	2,77	3,52	3,77	17,18	3,44	0,39
P4	0,56	0,55	0,8	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	1,2	1,13	0,82	0,95	5,25	1,05	0,16

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 8 – Medições Rmáx CP02

CP02 - Rmáx								
Pontos	1	2	3	4	5	Soma	Média	Desvio padrão
P1	5,65	4,7	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	24,5	18,49	107,37	21,47	3,23
P4	4,06	3,95	7,42	7,28	6,9	29,61	5,92	1,76
P5	4,75	3,12	5,11	3,74	2,84	19,56	3,91	0,99
P6	4,6	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: O Autor (2018)

Tabela 9 – Medições Rz CP02

CP02 - Rz								
Pontos	1	2	3	4	5	Soma	Média	Desvio padrão

P1	3,46	3,85	2,91	2,6	3,01	15,83	3,17	0,49
P2	5,17	6,2	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	2,6	15,75	3,15	0,51
P6	3,95	4,09	3,9	3,6	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: O Autor (2018)

Tabela 10 – Medições Ra CP03

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	0,6	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	5,95	28,06	5,61	0,96
P9	0,43	0,58	0,59	0,5	0,5	2,60	0,52	0,07
P10	0,32	0,21	0,22	0,23	0,42	1,40	0,28	0,09

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 11 – Medições Rmáx CP03

CP03 - Rmáx								
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	2,8	2,42	2,73	12,20	2,44	0,35
P3	45	45,21	52,85	48,32	39,93	231,31	46,26	4,75
P4	13,76	6,96	4,71	13	4,69	43,12	8,62	4,45
P5	2,47	2,7	3,61	1,86	2,26	12,90	2,58	0,65
P6	2,21	2,21	2,4	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	1,7	1,43	1,68	2,09	11,62	2,32	1,36

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 12 – Medições Rz CP03

CP03 - Rz								
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: O Autor (2018)

Tabela 13 – Medições Ra CP04

CP04 - Ra								
Pontos	1	2	3	4	5	Soma	Média	Desvio padrão
P1	0,46	0,64	0,56	0,62	0,7	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	0,3	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: O Autor (2018)

Tabela 14 – Medições Rmáx CP04

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	2,3	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	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	26,99	30,02	29,38	36,39	153,7	30,75	3,48
P9	3	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: O Autor (2018)

Tabela 15 – Medições Rz CP04

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	110,5	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: O Autor (2018)

Tabela 16 – Medições Ra CP03 - Réplica

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	0,2	0,44	0,25	1,63	0,33	0,13
P3	6,83	5,16	4,22	5,6	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	0,5	0,52	0,6	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	0,8	0,68	0,65	0,58	0,58	3,29	0,66	0,09
P8	1,78	1,66	1,7	2,5	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: O Autor (2018)

Tabela 17 – Medições Rmáx CP03 - Réplica

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	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	3,8	3,53	24,55	4,91	1,96
P8	17,38	15,78	10,64	30,88	27,86	102,5	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: O Autor (2018)

Tabela 18 – Medições Rz CP03 - Réplica

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: O Autor (2018)

Tabela 19 – Medições Ra CP04 - Réplica

CP04 - Ra								
Pontos	1	2	3	4	5	Soma	Média	Desvio padrão
P1	0,63	0,37	0,65	0,44	0,6	2,69	0,54	0,13
P2	0,58	0,6	0,63	0,63	0,55	2,99	0,60	0,03
P3	3,33	1,34	3,21	3,1	3,9	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	0,4	0,65	0,53	0,55	2,54	0,51	0,10
P6	0,41	0,5	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	3,2	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	0,4	0,46	2,26	0,45	0,06

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 20 – Medições Rmáx CP04 - Réplica

CP04 - Rmáx								
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	3,1	2,85	14,77	2,95	0,23
P3	22,59	8,92	23,85	28,3	52,9	136,56	27,31	16,03
P4	1,86	1,8	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	35,3	27,58	28,93	37,53	150,47	30,09	6,53
		1						
P9	2,82	2,42	2,99	2,67	2,66	13,56	2,71	0,21
P10	3,19	5,63	2,97	2,6	2,68	17,07	3,41	1,26

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 21 – Medições Rz CP04 - Réplica

CP04 - Rz								
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: O Autor (2018)

APÊNDICE B – ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Nas Tabelas 22 e 23 são apresentadas as análises de variância (ANOVA) para cada corpo de prova, considerando as medições do teste e da réplica.

Tabela 22 – ANOVA 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 H₀		
Total	402,23	99				

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 23 – ANOVA 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 H₀		
Total	155,98	99				

Fonte: O Autor (2018)

Como em ambos os casos rejeitou-se H₀, as Tabelas 24 e 25 demonstram o comparativo da diferença mínima significativa (DMS) para o CP03 e CP04 para identificar as divergências entre pontos dentro de cada corpo de prova.

Tabela 24 – 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: O Autor (2018)

Tabela 25 – 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: O Autor (2018)

Nas tabelas a seguir são apresentadas as análises de variância (ANOVA) para cada ponto em confronto entre corpos de prova (CP03 com CP04), considerando as medições do teste e da réplica.

Tabela 26 – 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 H₀		
Total	0,21	19				

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 27 – 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 H₀		
Total	0,42	19				

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 28 – 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 H₀		
Total	97,83	19				

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 29 – 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 H₀		
Total	2,43712	19				

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 30 – 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 H₀		
Total	0,17	19				

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 31 – 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 H₀		
Total	0,27	19				

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 32 – 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 H₀
Total	0,50	19		

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 33 – 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 H₀		
Total	41,30	19				

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 34 – 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 H₀		
Total	0,75	19				

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 35 – 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 H₀		
Total	0,30	19				

Fonte: O Autor (2018)

APÊNDICE C – PARÂMETROS DE CORTE PROPOSTOS PARA CP02 E CP04


Tabela 36 – Parâmetros propostos CP02 e CP04

Ponto	Inclinação	Característica	Diâmetro efetivo máximo de contato	RPM	v_f	v_c
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: O Autor (2018)

ANEXO A – CERTIFICADO DA MATÉRIA PRIMA

Figura 37 – Certificado de qualidade

DIFERRO		DIFERRO AÇOS ESPECIAIS LTDA - CERTIFICADO DE QUALIDADE				
Caxias do Sul - RS RUA COMEND PIETRO ZANELLA, 1245 FONE: 3224 7800 FAX: 54 3224 - 7952 email: recebimento.csa@diferro.com.br		JOINVILLE - SC RUA OTTOKAR DOERFFEL, 1112 GALPAO CI-49 FONE: 47 2101-1700 FAX: 47 3438-0504 email: recebimento.joi@diferro.com.br		CACHOEIRINHA - RS RUA MANOEL JOSE 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						
% 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 Assst 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 approved in accordance with the standard of the especificatrion required.						

Fonte: Diferro Aços Especiais LTDA (2017)