

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

TIAGO CARDOZO PARISOTTO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO DO PLANO DE CORTE DA
FERRAMENTA SOBRE A QUALIDADE SUPERFICIAL**

**CAXIAS DO SUL
2020**

TIAGO CARDOZO PARISOTTO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO DO PLANO DE CORTE DA
FERRAMENTA SOBRE A QUALIDADE SUPERFICIAL**

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
2020**

TIAGO CARDOZO PARISOTTO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO DO PLANO DE CORTE DA
FERRAMENTA SOBRE A QUALIDADE SUPERFICIAL**

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:

Banca examinadora

Prof. Orientador Dr. Engº. Rodrigo Panosso Zeilmann
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Avaliador Dr. Engº. Marcos Alexandre Luciano
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Avaliador Dr. Engº. Alexandre Fassini Michels
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Dedico este trabalho aos meus pais Lucindo Parisotto e Maria Cardozo Parisotto, pelo incentivo e apoio durante toda a minha vida. E também à minha esposa Karen Dorneles Parisotto pelo apoio e compreensão.

AGRADECIMENTO

Primeiramente à Deus por estar sempre comigo me abençoar e conduzir a cada passo, sem ele nada seria possível.

Ao meu pai, Lucindo Parisotto, por todo incentivo e apoio em todos os momentos da minha graduação.

À minha mãe, Maria Cardozo Parisotto, por sua oração e por todo o seu carinho e afeto durante todos os momentos dessa jornada.

À minha esposa, Karen Dorneles Parisotto, minha melhor amiga e eterna companheira, pelo amor, incentivo, compreensão e paciência.

Às minhas irmãs, Luciana e Marina Cardozo Parisotto por toda amizade e parceria.

À Universidade de Caxias do Sul, pela disponibilização dos laboratórios para execução dos ensaios e análises.

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

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

À empresa Redan Industria de Matriz LTDA, pelo conhecimento adquirido na prática, pela disponibilização das ferramentas, do material e da máquina utilizada.

À todos que de alguma maneira ajudaram na realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

A tecnologia dos centros de usinagem de 5 eixos torna possível aumentar a acessibilidade em peças complexas, reduzir o balanço da ferramenta, elevar parâmetros de corte e utilizar o melhor contato possível do gume cortante da ferramenta com a superfície usinada. O objetivo deste experimento foi caracterizar a influência de diferentes inclinações do plano de corte da ferramenta sobre a qualidade superficial no fresamento de topo esférico. As inclinações utilizadas foram de 5° até 40° com intervalos de 5°, e as velocidades de corte foram 150 m/min no corpo de prova 1 e 250 m/min no corpo de prova 2. Para realizar a análise da qualidade da superfície foram realizadas 5 medições da rugosidade (R_a , R_y e R_z) para cada uma das áreas usinadas dos corpos de prova tanto no sentido longitudinal (sentido do avanço da ferramenta), como no sentido transversal. Para analisar os dados de forma qualitativa, foram geradas imagens da textura para cada inclinação com aumento de 41 e 165 vezes. Ao comparar os dados de rugosidade conclui-se que os melhores resultados foram encontrados nas inclinações de 10°, 15° e 20°. Obteve-se um ganho em tempo de aproximadamente 35% no processo de usinagem ao aumentar a velocidade de corte.

Palavras Chave: Inclinação do plano de corte. Fresamento de topo esférico. Rugosidade. Textura da superfície.

ABSTRACT

The technology of the 5-axis machining centers makes it possible to increase accessibility in complex parts, reduce tool overhang, increase cutting parameters and use the best possible contact between the tool cutting edge and the machined surface. The objective of this experiment was to characterize the influence of different tool cutting plane inclinations on the surface quality in ball end milling. The inclinations used were from 5 ° to 40 ° with 5 ° intervals, and the cutting speeds were 150 m/min in the sample 1 and 250 m/min in the sample 2. In order to carry out the analysis of the surface quality, 5 roughness measurements were made (Ra, Ry and Rz) for each of the machined areas of the samples both in the longitudinal direction (direction of the tool advance) and in the transversal direction. To qualitatively analyze the data, images of the texture were generated for each inclination with an increase of 41 and 165 times. When comparing the roughness data, it is concluded that the best results were found in the 10 °, 15 ° and 20 ° inclinations. By increasing the cutting speed, a gain in time of approximately 35% in the machining process was identified.

Keywords: Inclination of the cutting plane. Ball end milling. Roughness. Surface texture.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclos de Fresamento	12
Figura 2 – Fresamento com fresa de topo esférico.....	13
Figura 3 – Mecânica de corte	14
Figura 4 – Sentidos de corte	15
Figura 5 – Estratégias principais	16
Figura 6 – Estratégias de corte no fresamento de topo esférico com planos inclinados	16
Figura 7 – Inclinação do plano de corte	19
Figura 8 – Ângulos de inclinação.....	20
Figura 9 – Variação da região de contato.....	20
Figura 10 – Variação da temperatura de usinagem pela velocidade de corte.....	21
Figura 11 – Características do processo HSC	22
Figura 12 – Parâmetros de rugosidade (a) Ra, (b) Rz e (c) Ry.....	24
Figura 13 – Exemplos de texturas geradas	26
Figura 14 – Fluxograma do processo experimental	28
Figura 15 – Corpos de prova (CP1 e CP2)	29
Figura 16 – Contato do gume para cada inclinação	31
Figura 17 – Exemplos de texturas geradas	36
Figura 18 – Ferramentas de topo esférico utilizadas	32
Figura 19 – Produção dos corpos de prova.....	35
Figura 20 – Desgaste nas ferramentas	38
Figura 21 – Evolução do desgaste	38
Figura 22 – Análise da rugosidade Ra longitudinal.....	39
Figura 23 – Análise da rugosidade Ra transversal	39
Figura 24 – Análise da rugosidade Ry e Rz para CP1.....	40

Figura 25 – Análise da rugosidade Ry e Rz para CP2.....	41
Figura 26 – Análise da textura 5° a 20° para CP1	42
Figura 27 – Análise da textura 25° a 40° para CP1	43
Figura 28 – Análise da textura 5° a 20° para CP2.....	44
Figura 29 – Análise da textura 25° a 40° para CP2.....	45

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 – Dados técnicos Hermle C400	30
Tabela 2 – Diâmetros efetivos	32
Tabela 3 – Comprimento de amostragem e avaliação de rugosidade.....	33
Tabela 4 – Composição química do aço AISI H13	34
Tabela 5 – Dados de corte utilizados.....	36
Tabela 6 – Comparação da duração nos processos.....	37
Tabela 7 – Relatório das ferramentas	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CNC	Controle numérico computadorizado
CP1	Corpo de prova 1
CP2	Corpo de prova 2
et al	E outros
H13	Classe de aço para elevadas temperaturas
HRC	Dureza Rockwell C
HSC	Usinagem em Alta Velocidade de Corte
LTDA	Limitada
m	Metro
mm	Milímetro
min	Minuto
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PIB	Produto Interno Bruto
rpm	Rotações por minuto
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio à Micro e Pequenas Empresas
UCS	Universidade de Caxias do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

Ra	Rugosidade média aritmética (μm)
Rz	Rugosidade média (μm)
Rmáx	Rugosidade máxima (μm)
%	Por cento
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 dente da ferramenta
a_e	Incremento lateral (mm)
a_p	Profundidade de corte (mm)
d_e	Diâmetro efetivo máximo (mm)
R_y	Rugosidade entre cinco intervalos de medição (μm)
le	Comprimento da amostragem (mm)
yi	Posição da linha média no perfil de rugosidade
lm	Intervalo de medição (mm)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	JUSTIFICATIVA	8
1.2	AMBIENTE DE TRABALHO	9
1.3	OBJETIVOS	10
1.3.1	Objetivo geral	10
1.3.2	Objetivos específicos	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1	FRESAMENTO.....	11
2.1.1	Fresamento com fresa de topo esférico	12
2.1.2	Mecânica de corte	13
2.1.3	Estratégias de corte	14
2.1.4	Grandezas de corte	17
2.1.5	Influências da inclinação do plano de corte	18
2.1.6	Ângulos de inclinação (Tilt e Lead)	19
2.1.7	Fresamento a altas velocidades (HSC)	21
2.2	INTEGRIDADE SUPERFICIAL	23
2.2.1	Rugosidade	23
2.2.2	Textura	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1	PROCESSO EXPERIMENTAL.....	28
3.1.1	Corpos de prova	29
3.2	EQUIPAMENTOS E MATERIAIS	30
3.2.1	Centro de usinagem	30
3.2.2	Ferramenta de corte	31
3.2.3	Medição de rugosidade	32
3.2.4	Avaliação da textura	33
3.2.5	Material	33
3.3	PARÂMETROS DE ENTRADA DO PROCESSO	34
3.4	VARIÁVEIS DE SAÍDA DO PROCESSO	34

4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	35
4.1	USINAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	35
4.2	TEMPO DOS PROCESSOS	36
4.3	ANÁLISE DO DESGASTE DAS FERRAMENTAS.....	37
4.4	MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE.....	39
4.5	ANÁLISE DA TEXTURA	42
5	CONCLUSÃO	46
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	48
	REFERÊNCIAS.....	49

1 INTRODUÇÃO

Em constante evolução ao longo dos anos, os processos de fabricação tem seu início quando o homem identificou a necessidade de transformar a matéria-prima encontrada no meio ambiente para utilizá-la em seu dia-a-dia, suprimindo as suas necessidades básicas, facilitando suas tarefas diárias e obtendo qualidade de vida. Os objetos em nosso meio possuem inúmeras geometrias e dimensões, grandes variações em sua qualidade superficial e são compostos por materiais distintos. No Brasil, a indústria, no primeiro trimestre de 2019, representou 20,3% do PIB e em Caxias do Sul, a indústria representou 30,6% do PIB (SEBRAE, 2019).

A usinagem, entende-se o processo mecânico que, mediante a remoção do cavaco por determinada ferramenta, visa conferir a uma peça, a forma, as dimensões, ou qualidade superficial especificada, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens (ABNT NBR 6175:2015).

O fresamento é um dos processos de usinagem mais utilizados na indústria devido à sua capacidade de remover material fornecendo uma boa qualidade de superfície. Tal processo é utilizado em uma variedade de indústrias de manufatura, incluindo indústria aeroespacial, de energia e setores automotivos. A qualidade é um fator importante na produção de alojamentos, rasgos, perfis, moldes e matrizes de precisão. Nos dias de hoje, essas indústrias aumentaram sua atenção à precisão dimensional e rugosidade de superfície, a qualidade superficial exerce grande influência nas propriedades mecânicas como comportamento de fadiga, desgaste, corrosão, lubrificação e condutividade elétrica. Portanto, a medição e a caracterização da qualidade da superfície podem ser considerados para prever o desempenho da usinagem (REDDY et al, 2005).

A elevada precisão e qualidade em superfícies complexas encontradas em moldes e matrizes, se torna um desafio para as empresas na realização de processos de usinagem. Normalmente, a manufatura destes ferramentais demanda longo tempo com grandes dificuldades em garantir a precisão do molde e a qualidade requerida. Isto acontece porque a rugosidade de algumas peças do molde, após o processo de usinagem, não é satisfatória para ser diretamente utilizado na produção (BOULJEBENE et al, 2004). Dessa forma, é necessário envolver etapas de polimento manual, visando obter a qualidade da superfície projetada para o ferramental começar a produzir. Consequentemente, esse processo apresenta um grande acréscimo no custo final do molde, aumentando também, o seu tempo de fabricação.

Para reduzir o tempo de polimento manual, melhorar a qualidade das superfícies e

reduzir o tempo de fabricação, utiliza-se a tecnologia de usinagem em alta velocidade de corte, também conhecida como *High Speed Cutting* (HSC). Esse processo possui eixo-árvore de alta rotação que pode trabalhar acima de 40000 rpm, podendo alcançar até 90000 rpm, e sua estrutura permite altas taxas de aceleração e precisão.

Conforme a complexidade das formas a serem usinadas, existem regiões cuja acessibilidade é dificultada pela geometria, o que pode causar limitações e dificuldades em manter a qualidade superficial desejada. Dentro desse contexto desenvolveu-se a concepção tecnológica de centros de usinagem em 5 eixos, a qual oferece 5 graus de liberdade de movimento entre ferramenta e peça. Com isso, a acessibilidade torna-se muito elevada e proporciona a usinagem de peças completas com apenas uma fixação. A usinagem de faces com inclinação negativa e rebaxos, e a execução de detalhes em orientações diversas, o que reduz tempos e custos de preparação da máquina (SOUZA, 2011).

Unindo o uso do fresamento HSC com o fresamento em 5 eixos, o resultado obtido pode gerar um ganho em precisão e um ganho na qualidade da superfície, além da diminuição do tempo de usinagem dos processos. Em busca desse ganho deve-se observar diversos fatores que possuem grande influência sobre os resultados da usinagem. Esses fatores são: a máquina de usinagem, o comando numérico, a ferramenta de corte, os sistemas de fixação, as estratégias e os parâmetros de corte (SOUZA, 2004).

Este trabalho tem por finalidade estudar parâmetros e estratégias, em especial a influência da inclinação do plano de corte que, segundo Yao (2017), possui um efeito importante na caracterização da superfície. O uso correto deste parâmetro pode garantir um ganho relevante na qualidade da superfície usinada, e com isso, contribuir com o setor de moldes e matrizes, almejando ampliar o conhecimento sobre este processo de fabricação.

1.1 JUSTIFICATIVA

Estabelecer parâmetros e estratégias de usinagem tem sido um desafio enfrentado pelas indústrias de manufatura por quase um século. As indústrias buscam melhorias nesse sentido a cada dia, pois o constante avanço das tecnologias de usinagem, das máquinas, criação de novos materiais e de ferramentas cada vez mais específicas torna o mercado muito competitivo. Esses quesitos no universo da usinagem e da manufatura são objetos de muito estudo, de muita atenção e também de grandes investimentos. A obtenção de melhores processos e parâmetros de usinagem, desempenham um papel fundamental no mercado

competitivo (REDDY et al, 2005). A inclinação do plano de corte da ferramenta em uma máquina CNC (controle numérico computadorizado) 5 eixos, proporciona muitos benefícios para usinagem de peças complexas. Possibilitando acessibilidade com ferramentas fixadas com um balanço muito menor, reduzindo vibrações, proporcionando trabalhar com maiores velocidades de corte e até a produção de peças com apenas uma fixação.

Uma das expectativas para produção de moldes e matrizes, é gerar superfícies precisas e de qualidade superficial elevada que aliadas à redução dos tempos de fabricação, proporcione um alívio para o setor de operação de polimento, reduzindo retrabalhos (NICOLA, 2008). Uma integridade superficial satisfatória para determinada operação, possui efeitos importantes na resistência a fadiga da peça, na sua resistência a corrosão, estabilidade e também na confiabilidade dos componentes (YAO et al, 2017).

Para isso, o estudo da qualidade superficial produzida em diversas inclinações do plano de corte da ferramenta mostra-se parte fundamental. O uso de uma melhor inclinação possível proporciona o contato ideal entre o diâmetro efetivo da ferramenta e a superfície a ser usinada. Desta forma, estima-se que, por mais que a peça usinada seja complexa, os dados de corte combinados com uma inclinação do plano de corte ideal, podem ter ganhos representativos na qualidade da superfície e do tempo de confecção da mesma.

1.2 AMBIENTE DE TRABALHO

O presente trabalho será desenvolvido em ambiente acadêmico e ambiente empresarial. Sendo parte na Universidade de Caxias do sul, que 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 uma máquina de medição tridimensional e instrumentos de medição em geral. Este ambiente será utilizado para medição dos corpos de prova.

O ambiente empresarial será a empresa Redan Indústria de Matrizes, localizada na cidade de Caxias do Sul, com atividades desde o ano 2000. Sua principal atividade é a produção de moldes e matrizes para diversos setores da indústria a usinagem de componentes complexos e a produção de ferramentas de corte e estampo. A empresa conta com centros de usinagem CNC 5 eixos de elevada tecnologia, um deles é o modelo C400 da fabricante alemã Hermle, que será utilizado para a realização dos processos de usinagem nos corpos de prova deste trabalho.

1.3 OBJETIVOS

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

1.3.1 Objetivo geral

Caracterizar a influência de diferentes inclinações do plano de corte da ferramenta sobre a qualidade superficial no fresamento de topo esférico.

1.3.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, tem-se:

- a) Comparar os parâmetros de rugosidade R_a , R_y e R_z em diferentes posições dos corpos de prova usinados com inclinações do plano de corte diferentes.
- b) Identificar a influência do diametro efetivo de corte da ferramenta na qualidade superficial da peça.
- c) Utilizar imagens de cada área usinada em diversos pontos dos corpos de prova, com duas ampliações diferentes para complementar resultados de rugosidade.
- d) Identificar variação no tempo de processo para cada operação.
- e) Analisar desgaste da ferramenta em cada um dos processos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O presente capítulo apresenta os conceitos para dar embasamento aos objetivos deste trabalho de conclusão de curso. Retrata a teoria que envolve o fresamento, suas características, vantagens, aplicações, a qualidade da superfície fresada e a utilização de fresamento em cinco eixos. Assim como, a conceituação de termos pertinentes a caracterização de superfícies, analisando a rugosidade e a textura.

2.1 FRESAMENTO

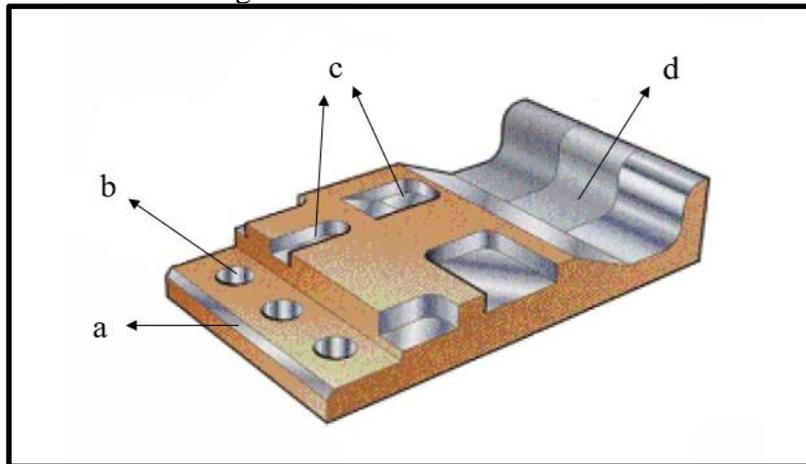
O fresamento se caracteriza por ser uma operação, onde a ferramenta cortante é denominada de fresa e é provida de gumes cortantes dispostos simetricamente em torno de um eixo, onde um movimento de corte é proporcionado pela rotação em torno deste eixo. Já o movimento de avanço geralmente é feito pela peça em usinagem, que está fixada na mesa da máquina a qual obriga a peça a passar sobre a ferramenta em rotação, que lhe confere as formas e dimensões desejadas (DINIZ et al, 2001).

Na operação de fresamento as ferramentas podem apresentar um número elevado de gumes de corte z , resultando em uma grande vantagem em relação aos demais processos de usinagem. Desta forma, torna-se possível unir o alto nível de produtividade do processo à capacidade de produzir superfícies com a qualidade superficial desejada, elevando as taxas de avanço da mesa f mesmo com o uso de um pequeno avanço por gume f_z .

De acordo com ABRÃO et al. (2011), a operação de fresamento é reconhecida pela versatilidade na produção de geometrias diversas, além de garantir elevadas taxas de remoção de material. A possibilidade da utilização de vários formatos de fresas combinados com movimento de diversos eixos da máquina, torna possível a execução de peças com diversas formas em seus ciclos.

A Figura 1 mostra uma peça com diversos processos de fresamento, na letra (a), mostra um chanfro. Na letra (b) indicada na figura, os furos podem ser usinados através de um processo de interpolação. Na letra (c), nos mostra alguns rebaixos e rasgos que podem ser fresados. Na letra (d) é indicado um processo de cópia utilizando uma ferramenta esférica e possibilitando o movimento da máquina copiar com precisão a superfície complexa, neste caso, em uma máquina 5 eixos pode-se inclinar o plano de corte da ferramenta, que permite um menor ressalto da ferramenta diminuindo a vibração.

Figura 1 – Ciclos de fresamento



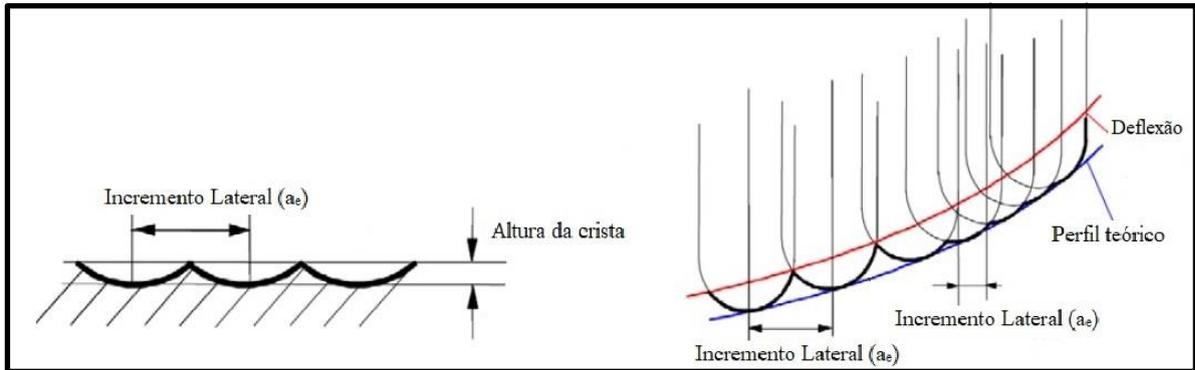
Fonte: adaptado de Sandvik (2000)

2.1.1 Fresamento com fresa de topo esférico

A fresa de topo esférico (*ball-nose*), permite que o movimento da mesma sobre a superfície usinada tangencie a forma da peça a ser usinada, executando assim, operação de cópia. Nas operações de usinagem de moldes e matrizes, o acabamento geralmente é realizado por uma fresa de topo esférico, onde ocorrem características peculiares entre a ferramenta de corte e a peça. Variando o ponto de contato e seu diâmetro efetivo de corte assegurando maior adequação à flexibilidade no contorno de superfície complexas (SOUZA, 2004).

Esta flexibilidade ocorre em virtude da usinagem ser realizada por meio de um único ponto da ferramenta, gerando uma usinagem final por diversas linhas. Com isso, a qualidade da superfície usinada está relacionada diretamente com o intervalo entre estas linhas, conforme pode ser observado na Figura 2. Esse intervalo entre as linhas é conhecido como incremento lateral (a_e), e tem um papel fundamental na qualidade superficial da peça, pois através desse parâmetro, pode-se reduzir ou aumentar a altura da crista gerada na superfície que esta diretamente ligada a qualidade da superfície usinada. O parâmetro a_e pode ser determinado pelo programador na geração do programa CNC e varia de acordo com o diâmetro efetivo da ferramenta a ser utilizada, quanto maior esse diâmetro, pode-se utilizar um maior incremento lateral mantendo a mesma altura de crista. Deve-se observar a deflexão da fresa que é gerada pelo esforço de corte da ferramenta, com o aumento do incremento lateral e da profundidade de corte também aumenta-se a deflexão. Uma superfície deve ser acabada com a maior ferramenta possível para a determinada geometria da peça e ferramentas de menor diâmetro são utilizadas para detalhes específicos (ENSELMANN, 1999).

Figura 2 – Fresamento com fresa de topo esférico



Fonte: adaptado de Sandvik (2000)

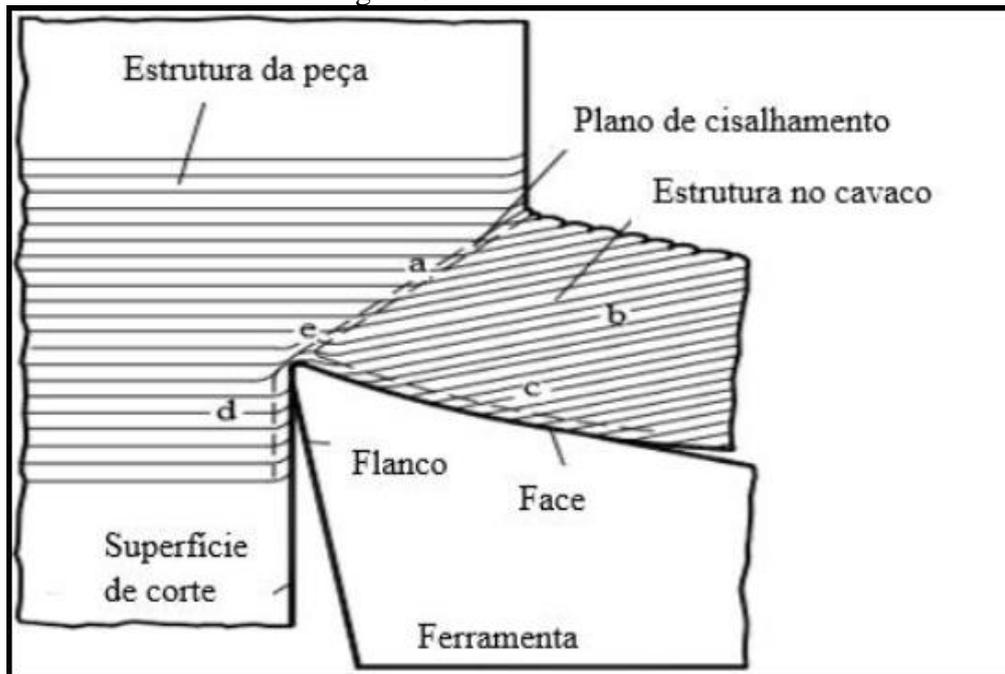
No fresamento em três eixos, várias partes do gume da fresa estão em contato com a peça, variando conforme a inclinação do contorno da superfície a ser usinada. No centro da fresa a velocidade de corte é nula, gerando elevadas cargas e vibrações sobre o gume, resultando num péssimo acabamento da peça (KÖNIG; KLOCKE, 1997).

2.1.2 Mecânica de corte

Mostra-se na Figura 3, a ferramenta se deslocando pela superfície da peça causando uma força sobre a mesma e resultando em uma deformação plástica em quatro áreas. A letra (a) indicada na Figura 3, pode ser considerada como a condição estrutural da peça, a qual é submetida ao cisalhamento e assim, gerando a configuração dos esforços e do cavaco. Já a letra (b) indicada na figura, é o ponto aproximado onde o cavaco é modelado através dos parâmetros de corte e o tipo de material da peça. Na usinagem de aços endurecidos pode ocorrer uma deformação plástica na direção de cisalhamento que leva a separação do material (KÖNIG; KLOCKE, 1997).

Entretanto, se o material possui maior limite de deslocamento a separação só ocorre instantaneamente na posição do gume, como observa-se em (e). A superfície de corte na estrutura da peça (d) e a superfície do cavaco (c), sofrem esforços de tração, pressão na ferramenta e altas temperaturas, gerando deformações nessas regiões. Pode-se interferir nesses fenômenos de forma intencional, através de alterações na geometria da ferramenta ou nos parâmetros de corte da ferramenta. A intenção ao realizar essas alterações é controlar a formação do cavaco em busca do processo de usinagem desejado, com maior eficiência e segurança no corte e também obtendo ganhos na vida útil das ferramentas de corte.

Figura 3 - Mecânica de corte



Fonte: adaptado de Konig e Klocke (1997)

2.1.3 Estratégias de corte

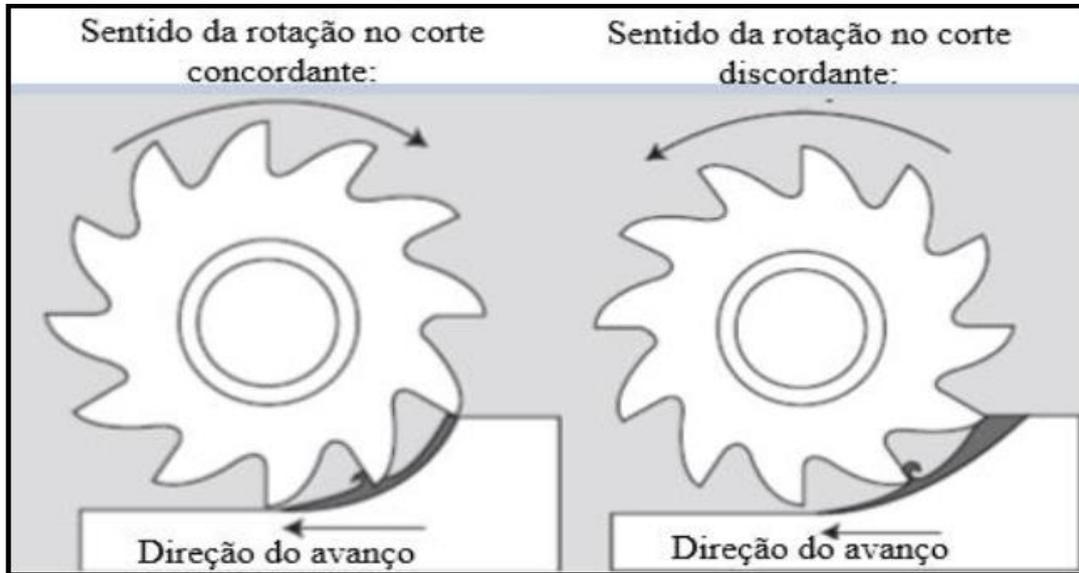
O princípio usado em toda máquina-ferramenta para obter a superfície desejada é providenciar um movimento relativo apropriado entre a peça e a ferramenta, escolhida adequadamente (ABRÃO et al, 2011). A combinação dos movimentos de corte e avanço da ferramenta definem o sentido de corte, que pode ser concordante ou discordante (Figura 4). O fresamento concordante é aquele onde a espessura de corte começa em um valor máximo e decresce até zero com o sentido do movimento de avanço sendo o mesmo do movimento rotatório da fresa. O fresamento discordante é aquele onde a espessura de corte cresce de zero até um valor máximo com o sentido do movimento de avanço sendo contrário ao movimento rotatório da fresa (DINIZ et al, 2001).

Uma das vantagens do fresamento concordante é o melhor acabamento em relação ao fresamento discordante. A ferramenta que trabalha no sentido discordante possui uma vida inferior em relação a ferramenta que trabalha no sentido concordante, pois, apenas 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, aumentando consideravelmente o desgaste por abrasão (STEEMER, 1995).

No fresamento concordante esses defeitos são sanados, já que a componente vertical da força sempre tem o mesmo sentido, tornando o corte mais suave e empurrando a peça em

direção á mesa (DINIZ et al, 2001).

Figura 4 – Sentidos de corte



Fonte: adaptado de Machado (2019)

As estratégias de corte evoluíram muito nos últimos anos, se tornando estratégias de forma livre. Pode-se classificá-las em três estratégias principais, conhecidas como usinagem *Offset*, *Raster* bidirecional ou *Raster* unidirecional, cada uma delas com função e características diferentes.

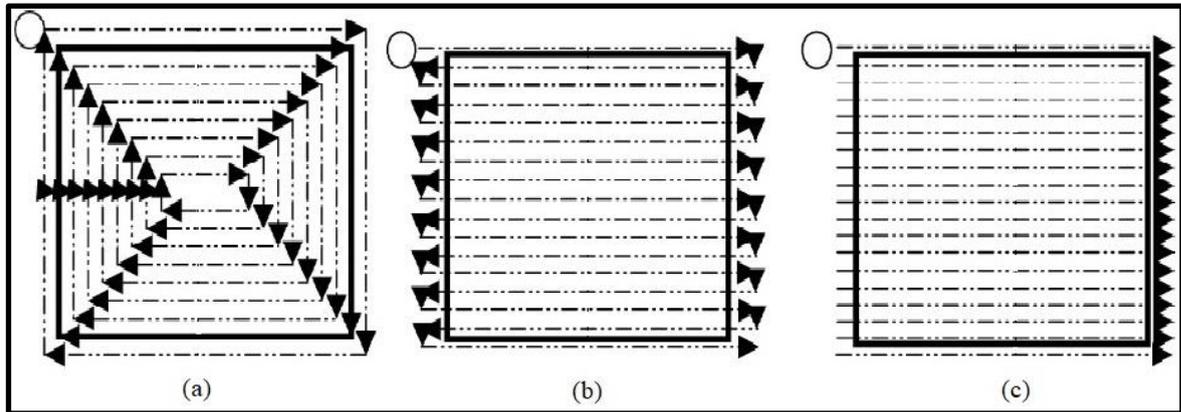
Na estratégia *Offset* mostrada na Figura 5(a), a ferramenta de corte retorna sempre ao mesmo ponto em cada ciclo, então realiza o incremento para o próximo ciclo. E, continuamente gerando novos ciclos em direção ao centro da peça, até que ao final da estratégia, toda a superfície da peça esteja usinada, podendo utilizar ambos os sentidos concordante ou discordante.

A estratégia *raster* bidirecional é bastante utilizada em processos de acabamento, onde a ferramenta de corte move-se através do plano X-Y, copiando a superfície a ser usinada. Ao chegar no final de um segmento da superfície, ocorre o incremento e então a ferramenta retorna até o outro extremo da superfície, repetindo esses movimentos até o final da superfície, conforme a Figura 5(b). Essa estratégia utiliza os dois sentidos de corte concordante e discordante, permitindo com que a ferramenta sempre realize o incremento sem deixar o contato com a peça.

Por fim, a estratégia *Raster* unidirecional onde a ferramenta de corte se move em linhas paralelas acompanhando a superfície a ser usinada, e ao final de cada linha, a ferramenta recua, perdendo o contato com peça, retorna para a nova linha e então volta a ter contato com a peça,

podendo assim utilizar apenas um sentido de corte, ou concordante ou discordante conforme Figura 5(c) (TOH, 2004).

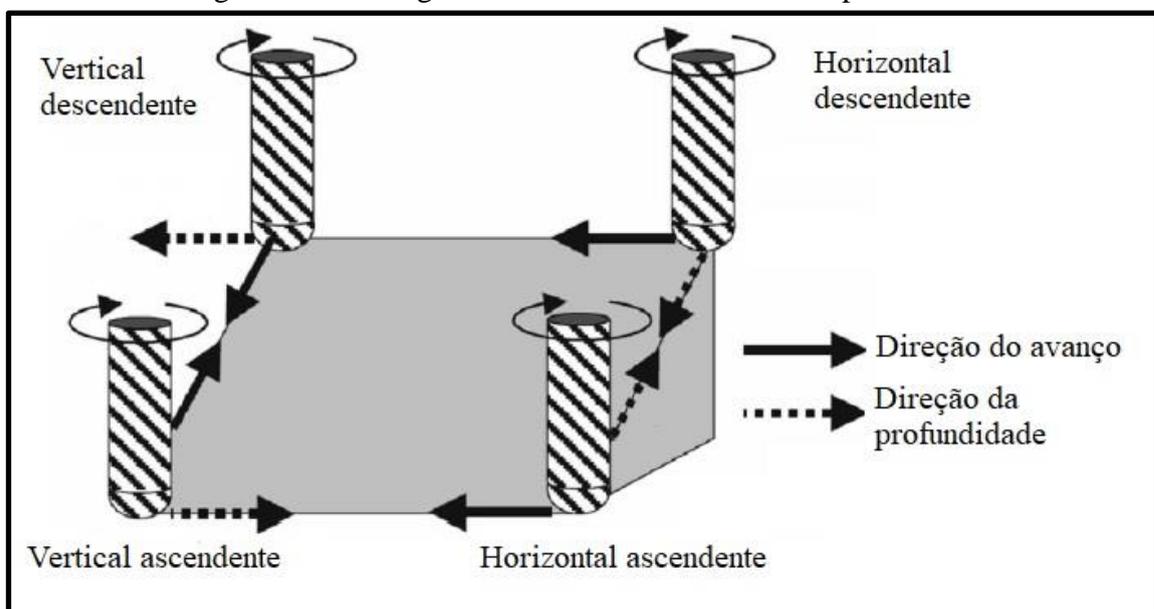
Figura 5 – Estratégias principais



Fonte: adaptado de Toh (2004)

As estratégias de corte comumente encontradas na literatura, são definidas pela direção e pelo sentido de corte, podendo a direção ser horizontal ou vertical, e o sentido ser ascendente ou descendente. Assim, pode-se configurar quatro estratégias distintas: vertical ascendente; vertical descendente; horizontal ascendente; e horizontal descendente. A Figura 6 representa esquematicamente as quatro estratégias, em corte concordante e todas sendo estratégias raster unidirecional.

Figura 6 – Estratégias de corte no fresamento de topo esférico



Fonte: adaptado de Vacaro (2013)

2.1.4 Grandezas de corte

Conforme Stemmer (1995), as grandezas e fatores determinantes no processo de fresamento que possuem influência direta no resultado e no tipo de superfície gerada são:

- a) Velocidade de corte (v_c) [m/min],
- b) Velocidade de avanço (v_f) [mm/min],
- c) Profundidade de corte (a_p) [mm],
- d) Incremento lateral (a_e) [mm],
- e) Avanço por gume (f_z) [mm]
- f) Diâmetro da fresa (d) [mm]

A velocidade de corte v_c é consequência do deslocamento da ferramenta sobre a peça, considerado no tempo. A v_c é efetivamente a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça (DINIZ et al, 2001). É calculada pela equação (1):

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

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].

A velocidade de avanço v_f define o avanço da ferramenta em relação à peça em unidade de distância por tempo em função do avanço por gume f_z e o número de gumes da ferramenta. É calculada a partir da equação (2):

$$v_f = n \cdot f_z \cdot z \quad (2)$$

onde: v_f é a velocidade de avanço [mm/min];

n é a rotação da ferramenta [rpm];

f_z é o avanço por gume [mm]; e

z é o número de gumes.

Quando se trabalha com ferramentas com mais de um gume, o avanço por dente f_z é o avanço de cada dente da direção do avanço da ferramenta, correspondendo à distância linear

percorrida pela ferramenta enquanto um gume está em processo de corte (KÖNIG; KLOCKE, 1997). O valor de f_z pode ser calculado conforme a equação (3):

$$f_z = \frac{f}{z} \quad (3)$$

A profundidade de corte a_p é a distância medida perpendicularmente ao plano de trabalho, correspondendo à distância que a ferramenta penetra na superfície do material.

O incremento lateral a_e é a distância lateral que a ferramenta penetra na peça, medida no plano de trabalho e perpendicular à direção do avanço.

Segundo KÖNIG e KLOCKE (1997), as variáveis de processo citadas anteriormente, possuem influência sobre a rugosidade da peça. E além disso, a mecânica de corte e as deformações causadas pelo desgaste da ferramenta, a estrutura e a resistência do material da peça, tem influência sobre a qualidade da superfície e sobre a formação da textura. Outro aspecto de grande influência em relação a qualidade superficial da peça, é a vibração que pode ser ocasionada pela rigidez de todo o sistema que envolve a usinagem.

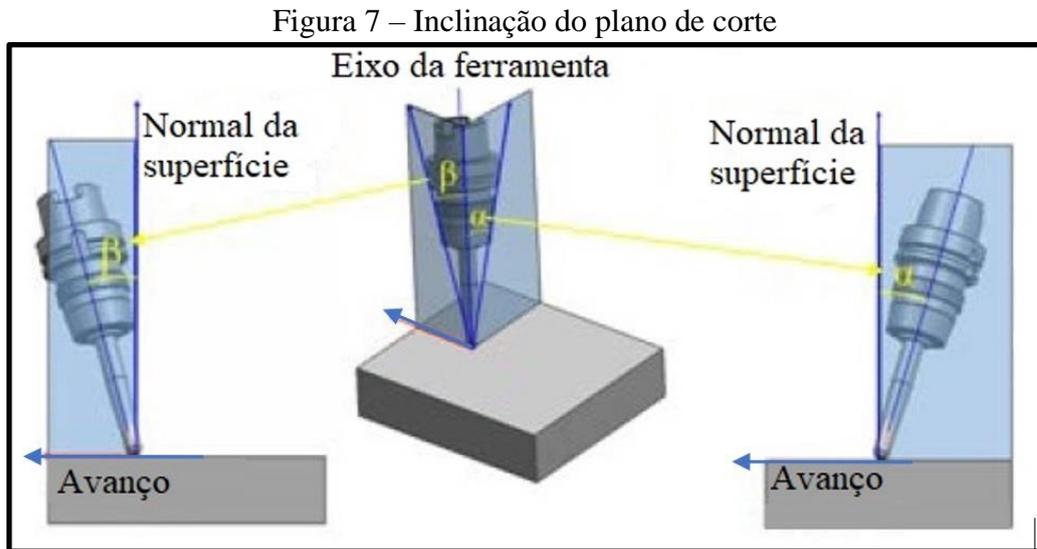
2.1.5 Influências da inclinação do plano de corte

Impulsionado pelo desenvolvimento tecnológico, a aplicação da tecnologia de usinagem por 5 eixos para a fabricação de moldes, tem se tornado um importante diferencial no segmento (HONG et al, 2011). O centro de usinagem cinco eixos permite uma grande acessibilidade da ferramenta em determinados ângulos e em faces complexas da peça, onde uma máquina 3 eixos não consegue acessar. Permite a usinagem de peças com apenas uma fixação, redução no tempo de preparação da máquina e custo do processo. Além da possibilidade da utilização de ferramentas mais curtas, proporcionando maior rigidez do processo e, conseqüentemente, melhor qualidade superficial da face usinada (SOUZA, 2011).

A inclinação do plano de corte da ferramenta em relação ao eixo perpendicular à superfície da peça determina a efetividade do corte com ferramenta de topo esférico. Deve-se analisar o diâmetro efetivo de corte da ferramenta, ao utilizar sua periferia maior será a velocidade de corte. Quando o centro da ferramenta esférica está em contato no corte são máximas as cargas e a vibração sobre o gume. Esse fator é gerado devido a alta força passiva e a pequena área de saída do cavaco na ponta da ferramenta. (SCHULZ, 1996).

Para evitar o contato da peça com o centro da ferramenta esférica, pode-se utilizar a

inclinação do plano de corte com dois ângulos constantes do seu eixo em relação ao vetor normal local da superfície a ser usinada. Esses dois ângulos podem ser definidos pelo programador, o ângulo de avanço (*Tilt*), na direção do avanço e o ângulo de ataque (*Lead*), transversal a essa direção. A Figura 7 nos ilustra as inclinações que podem ser programadas (SOUZA, 2006).



Fonte: adaptado de Souza (2006)

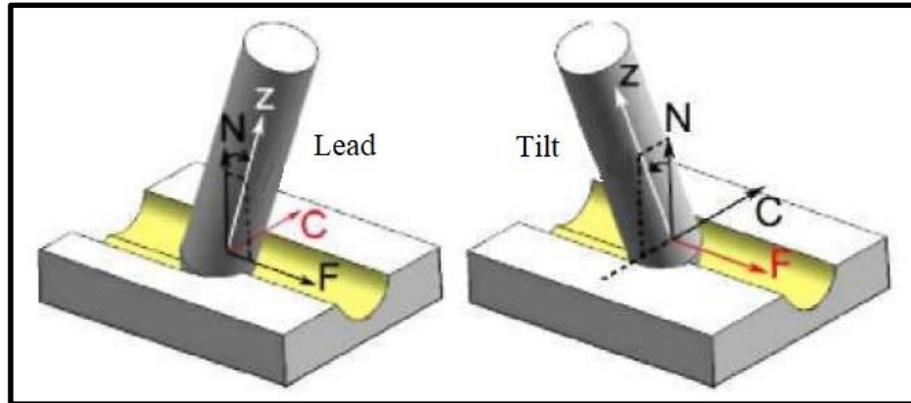
A utilização desses ângulos possibilita eficiência comprovada em relação a usinagem de superfícies complexas com o uso de uma máquina três eixos. Quanto menores forem os ângulos maior o risco da interferência do centro da fresa no corte, mas em contrapartida, quanto maior os ângulos maiores cristas são geradas, resultando na necessidade de passes adicionais e também em uma maior deflexão da ferramenta (GRAY et al, 2001). A busca pela otimização das inclinações *Tilt* e *Lead* pode resultar em um corte com cargas mecânicas constantes na ferramenta, reduzindo vibrações e melhorando a qualidade da superfície usinada. Pode-se inclusive, realizar um aumento na velocidade de corte diminuindo os tempos de usinagem (TOH, 2004).

2.1.6 Ângulos de inclinação (*Tilt* e *Lead*)

Conforme (OZTURK et al, 2009) os ângulos *Tilt* e *Lead* aumentam a capacidade de um centro de usinagem 5 eixos, permitindo a geração de superfícies complexas e otimizando a acessibilidade em diversos processos de usinagem. Essa inclinação afeta diretamente a qualidade superficial, o esforço mecânico exercido sobre a ferramenta, a temperatura de corte

e também tem efeito sobre a vida útil da ferramenta. A Figura 8 mostra ilustrações dos ângulos.

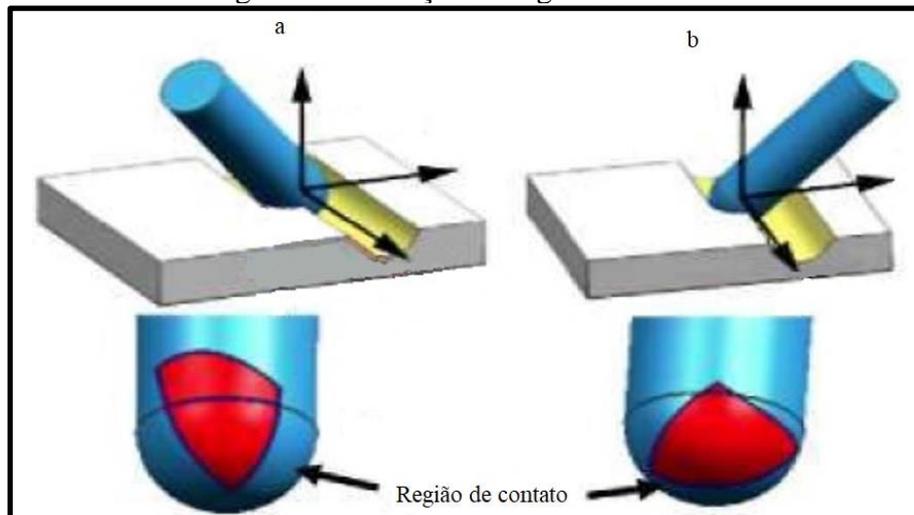
Figura 8 – Ângulos de inclinação



Fonte: adaptado de Ozturk (2009).

Os ângulos de inclinação elevados resultam em maiores solicitações mecânicas e térmicas. O corte, nesses casos, tem de ser feito por uma parte menor do gume, o que compromete a vida útil da fresa. Além disso, as inclinações elevadas podem ocasionar aumento na rugosidade da superfície usinada, pois a ferramenta sofre elevada deflexão devido a maiores forças de corte (CHEN et al, 2014). Com o uso de ângulos de inclinação pequenos, um maior gradiente de velocidades de corte existe ao longo do gume. A velocidade é máxima na periferia do gume, já no centro da ferramenta a velocidade é baixa, de modo que a deformação e o atrito se sobrepõem ao corte (TOH, 2004). A área de contato entre a peça e a ferramenta está diretamente conectada aos esforços mecânicos gerado no corte. A Figura 9 indica a área de contato que varia conforme a inclinação utilizada.

Figura 9 – Variação da região de contato



Fonte: adaptado de Ozturk (2009).

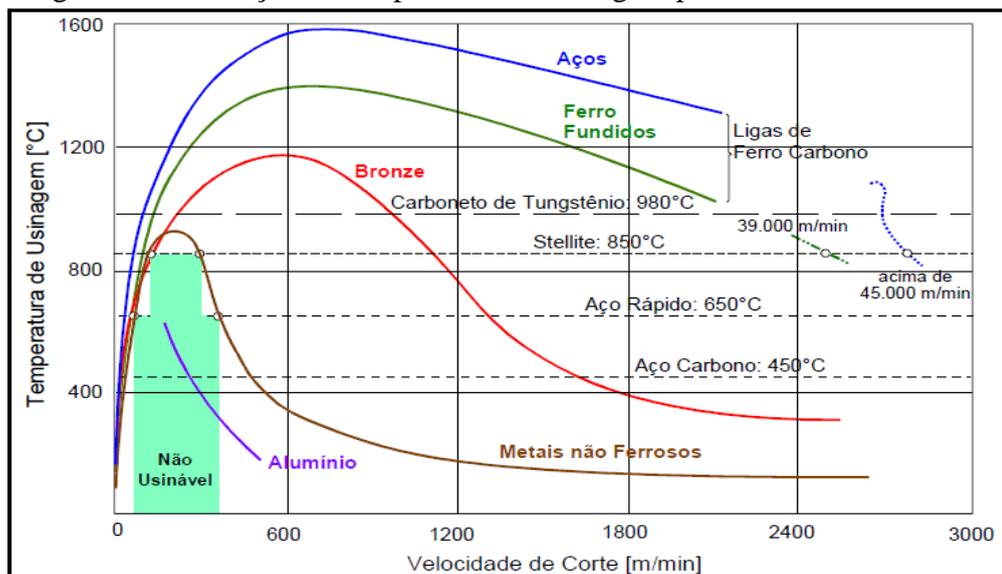
Alguns estudos ao redor do mundo foram conduzidos sobre a influência e os efeitos da inclinação do plano de corte da ferramenta. De acordo com (TOH, 2006) a força de corte aumenta ao utilizar um ângulo Lead negativo, e ao utilizar um ângulo Lead positivo foi alcançada a mínima rugosidade de superfície. No estudo de (CHEN et al, 2014), é desenvolvida uma investigação sobre os efeitos produzidos na superfície ao usinar com os 5 eixos simultâneos, utilizando variadas orientações diferentes do plano de corte. Segundo (DAYMIN et al, 2011), o melhor acabamento é gerado com uma inclinação do plano de corte de 25 graus, e o esforço de corte diminui consideravelmente conforme o aumento da inclinação do plano de corte.

De acordo com (YAO et al, 2017), a orientação do plano de corte da ferramenta tem uma enorme influência na qualidade da superfície usinada, o esforço de corte e a morfologia da superfície. A maior rugosidade e textura gerada são obtidas dentro de uma faixa entre 30 e 60 graus de inclinação conforme seus experimentos.

2.1.7 Fresamento a altas velocidades (HSC)

O processo de usinagem com altas velocidades de corte (HSC – *High Speed Cutting*) com patente registrada em 1931, surgiu a partir do trabalho desenvolvido por Salomon, que mais tarde foi vendida à empresa alemã Friedrich Krupp AG. A patente foi baseada em curvas de velocidade de corte em função da temperatura, conforme mostra a Figura 10. (OLIVEIRA, 2003).

Figura 10 – Variação da temperatura de usinagem pela velocidade de corte.

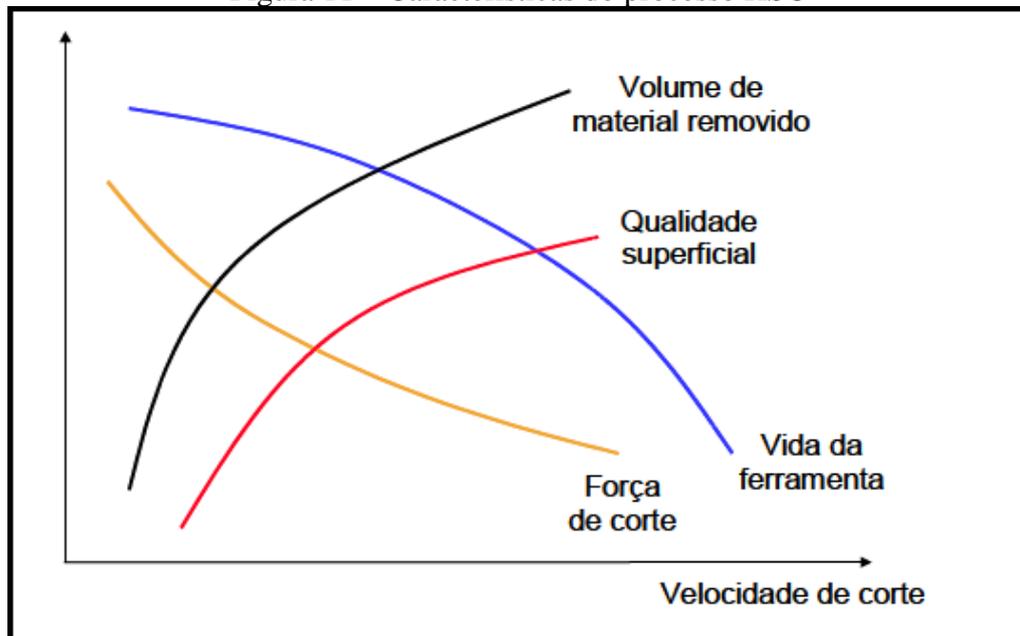


Fonte: adaptado de Schulz (1996)

Segundo (OLIVEIRA, 2003), com o aumento das velocidades de corte é possível perceber a ocorrência da redução das forças de usinagem, melhoria na qualidade superficial da peça, maior taxa de remoção de cavacos, e por fim a vida das ferramentas de corte. Segundo (SCHULZ, 1996), as principais características do processo de usinagem em alta velocidade de corte que podem ser analisadas pela Figura 11.

Além disso, segundo (SINHOFF et al, 1999), do ponto de vista físico não podem ser esperadas mudanças drásticas no processo de corte. O material usinado em condições extremamente severas sofre alterações em suas propriedades plásticas. Entre essas alterações ocorre uma considerável redução da resistência à formação do cavaco. Conforme o autor, o uso do eixo-árvore de alta rotação torna possível a diminuição nas forças de corte, devido a redução do avanço por gume em função das altas rotações.

Figura 11 – Características do processo HSC



Fonte: adaptado de Schulz (1996)

O processo HSC pode fornecer uma superfície usinada com qualidade elevada, através da redução da força de corte e um aumento de volume de material removido, demonstrado na Figura 11. O ponto negativo do processo se torna o desgaste da ferramenta que aumenta muito reduzindo o tempo de uso da ferramenta. Conforme o estudo de CHEVRIER (2003), os mecanismos de desgaste das ferramentas de corte são alterados com o uso de HSC.

As principais áreas de aplicação de HSC são na usinagem de cavidades e insertos em geral (moldes de injeção e matrizes para forjamento), componentes de paredes finas, indústria óptica e de alta precisão, peças de automóveis, entre outros. (OLIVEIRA, 2006).

2.2 INTEGRIDADE SUPERFICIAL

O termo integridade superficial é utilizado para descrever a qualidade de uma superfície. A condição final de uma superfície usinada é resultado de um processo que envolve deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e até reações químicas, esses fatores contribuem para a geração da superfície. A integridade superficial engloba todas essas alterações sofridas pela superfície e também outras características abaixo dela (ABRÃO et al, 2011).

O processo de fabricação, em especial o de usinagem, é determinante na integridade superficial que se deseja alcançar. As condições de formação do cavaco tem grande influência no grau de deformação plástica do material sob a ação da ferramenta de corte. Estas tensões residuais, afetam a resistência a fadiga das peças usinadas e em casos extremos podem chegar até a tensão de ruptura do material. (STEMMER, 1995)

As superfícies dos componentes mecânicos devem ser adequadas ao tipo de função que exercem. Por este motivo, que o estudo da integridade superficial tem enorme importância à medida que crescem as exigências do projeto (LACERDA, 2013). Para mensurar e avaliar a integridade das superfícies deve-se analisar principalmente, a rugosidade e a textura das superfícies geradas.

2.2.1 Rugosidade

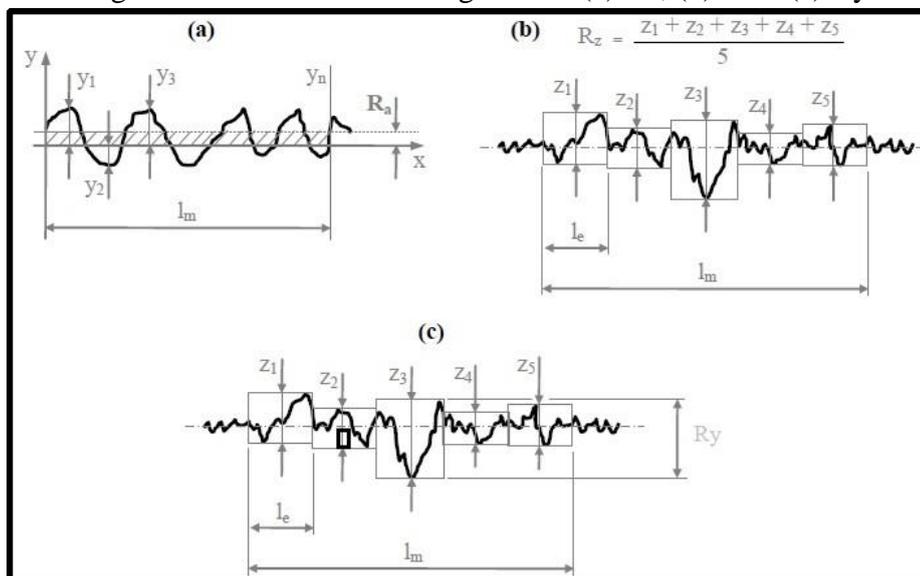
A rugosidade de uma superfície pode ser definida como um conjunto de irregularidades finas ou erros micro geométricos, gerados por diversos aspectos no processo de usinagem. Esta rugosidade está diretamente ligada ao tipo da ferramenta e a afiação a ser utilizada. É caracterizada por alguns aspectos como: o gume postiço da ferramenta, o desgaste da ferramenta, as marcas de avanço da ferramenta sobre a superfície, o uso de ferramentas adequadas e afiadas com precisão para cada tipo de material a ser usinado (ABRÃO et al., 2011).

A medição da rugosidade é realizada através de dois sistemas básicos: o sistema da linha média (M) e o sistema da envolvente (E). A ABNT tem como padrão o sistema da linha média, onde esta linha constitui-se paralela a direção do perfil sempre no comprimento amostrado. Esta linha é exatamente posicionada no centro, de tal maneira que a soma das áreas superiores, entre a linha média e o perfil seja exatamente igual a soma das áreas inferiores, no comprimento amostrado. (OLIVEIRA, 2006).

Dentre os parâmetros da rugosidade exemplificados na Figura 12, destacam-se:

- Ra: é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_i) dos pontos do perfil de rugosidade em relação á linha média, dentro do percurso de medição (l_m);
- Rz: Corresponde a média aritmética dos cinco valores de rugosidade parcial. Rugosidade parcial é a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, existentes no comprimento de amostragem.
- Ry, Corresponde à distancia vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação (l_m), independentemente dos valores de rugosidade parcial (Z_i).

Figura 12 – Parâmetros de rugosidade (a) Ra, (b) Rz e (c) Ry



Fonte: adaptado de Vacaro (2013)

O parâmetro rugosidade média Ra é o mais utilizado para descrever a rugosidade de uma superfície usinada, mas deve-se escolher o parâmetro mais adequado para cada aplicação. Deve-se ter o cuidado para a direção em que se realiza a medição da rugosidade, pois, em superfícies fresadas que são caracterizadas por sulcos ordenados, há a dependência na qual é efetuada a medição a diferença entre as rugosidades longitudinal e transversal pode ser significativa. Em processos convencionais de fresamento, os valores de avanço são geralmente inferiores aos de profundidade radial de corte, com isso a rugosidade tende a ser maior na direção da profundidade radial (CHEN et al, 2014).

Conforme (BATISTA et al, 2015), a rugosidade é uma característica importante na

usinagem de moldes e matrizes. Essa característica permite produzir peças com a qualidade próxima a qualidade funcional requerida pelo molde, evitando assim, possíveis processos subsequentes.

Para quantificar a rugosidade utiliza-se um instrumento chamado rugosímetro, o princípio básico de funcionamento dos rugosímetros com apalpamento contínuo, é utilizar um apalpador para percorrer a superfície segundo uma trajetória linear e com velocidade constante. A topografia da seção apalpada faz com que o apalpador tenha um movimento vertical que é transformado em sinal elétrico por um transdutor. Esse sinal é amplificado, filtrado e armazenado na forma de pares de pontos. Estes pontos são processados e podem ser expostos graficamente na forma de um perfil de rugosidade, de ondulação ou uma combinação de ambos, gerando assim uma representação bidimensional de uma seção da superfície avaliada (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 apalpador, marcação da superfície analisada devido a força do apalpador no deslocamento (BET, 1999). Com o uso de um rugosímetro é possível mapear, estudar e quantificar uma ampla faixa de superfícies, com isso ganha-se um grande número de parâmetros de rugosidade como saída do sistema de medição (NICOLA, 2008).

2.2.2 Textura

O conceito do textura, pode ser definido como conjunto de características observadas a olho nu na superfície, conforme DIN 4761 (1987 apud BET 1999). A textura da superfície é vista como a combinação de certos desvios repetitivos ou até aleatórios da superfície real em relação à superfície geométrica, a qual compõe a superfície topográfica tridimensional (SONG e VORBURGUER, 1992). Essa combinação de desvios geram a textura que pode ser caracterizada pela direção e pelo número de picos e vales presentes nela, a textura pode assegurar o conhecimento e o controle de todos os aspectos geométricos da superfície.

Ao analisar a textura deve-se, usualmente, analisar três conceitos: a forma; a ondulação; e a 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. A Figura 13 mostra a ordem destes fatores em relação a sua classificação e alguns exemplos de surgimento para cada um dos fatores.

Figura 13 – Exemplos de texturas geradas

Desvios de forma (Seção de perfil apresentada Aumentada)	Exemplos para cada desvio de forma	Exemplos para o surgimento do desvio	
1ª Ordem: Desvio de forma 	Desnívelamento ovalado	Defeito nas guias da máquina, deformações por flexão, 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 ou peça	
3ª Ordem: 	R u g o s i d a d e	Ranhuras	Forma do gume da fresa, avanço ou profundidade de corte.
4ª Ordem: 		Estrias Escamas Picos	Processo de formação de cavaco (arrancado, cisalhado, gume postiço), deformação do material por jato de areia.
5ª Ordem: impossível representação gráfica simplificada		Estrutura do material	Processo de cristalização, modificação da superfície por ação química (decapagem), processo de corrosão.
6ª Ordem: impossível representação gráfica 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)

As ondulações são os componentes de textura mais largamente espaçados e são provenientes de deflexões e vibrações da máquina e da ferramenta. O desvio de forma indicam a direção predominante das ranhuras deixadas pela ferramenta sobre a superfície da peça. Cada processo de fabricação produz marcas características sobre a superfície trabalhada. O processo de fresamento geralmente produz um padrão de sulcos regular e repetitivo, com uma direção preferencial claramente observável, e sulcos bem definidos (BET, 1999).

No fresamento de topo esférico de planos inclinados, a estratégia de corte também tem influência sobre a textura da superfície. A variação da estratégia implica em mudança nas condições do contato dos gumes com a superfície, ocasionando em variações na textura resultante.

De acordo com CHEN et al, (2014) a textura da superfície é diretamente afetada com a inclinação do plano de corte da ferramenta, dependendo da inclinação utilizada uma área

diferente do gume da ferramenta entra em contato com a peça. Quando o centro da ferramenta entra em contato com a peça, a velocidade de corte no centro é quase nula, sem saída do cavaco a textura é seriamente prejudicada. Além disso, outras grandes influências para a textura são:

- a) As grandezas de corte V_c , V_f , F_z , A_e e A_p
- b) A saída do cavaco conforme cada inclinação
- c) A deflexão da ferramenta conforme cada inclinação
- d) O diâmetro efetivo de corte conforme cada inclinação
- e) A estratégia de corte utilizada

Os resultados obtidos pelo autor, exemplificam como as avaliações da textura da superfície constituem um importante suporte à análise de usinagem das superfícies. A avaliação qualitativa dos aspectos referentes à textura, juntamente com os resultados quantitativos da rugosidade, possibilitam uma grande compreensão da geração da qualidade superficial. Deste modo são fornecidos subsídios para a implementação de melhorias nos processos de usinagem, através da identificação e da correção de problemas.

A obtenção de imagens através de equipamentos microscópicos fornece suporte qualitativo para entendimento da textura obtida após a usinagem. A microscopia ótica nos permite caracterizar a textura de uma superfície, permitindo através de imagens sua avaliação qualitativa de modo macrográfico e micrográfico. O contraste da imagem é resultado da diferença da reflectividade da luz nas diversas regiões de superfície, uma vez que o sistema é constituído basicamente pela fonte de iluminação e do sistema de lentes. Para observar a superfície usinada, precisa-se cuidadosamente preparar a superfície de maneira a revelar os detalhes de sua topografia. (NICOLA, 2008).

Com as imagens obtidas pela microscopia ótica é possível a determinação qualitativa do formato do grão, tamanho do grão, área de fronteira do grão por unidade de volume, espaços de metais e carâmicas. Ainda é possível a obtenção de informações quantitativas como a determinação de frações do volume de segunda fase, tamanho e áreas de interferência por unidade de volume (OLIVEIRA, 2006).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

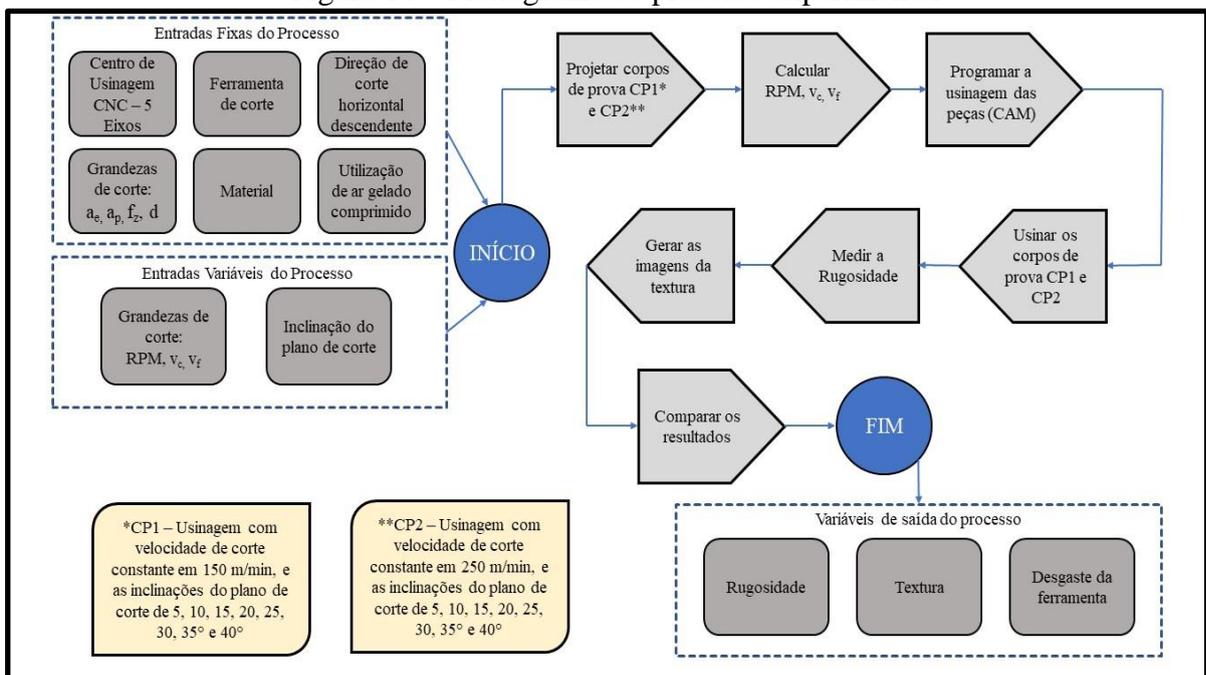
Neste capítulo são abordados os métodos de aplicação prática de testes, ensaios e medições. Assim como, os equipamentos, os materiais e parâmetros que foram utilizados para o desenvolvimento da proposta do trabalho, entre eles, o material dos corpos de prova, o centro de usinagem e a ferramenta de corte. Por fim, são apresentados os parâmetros de entrada do processo, as estratégias propostas e as variáveis de saída do processo.

3.1 PROCESSO EXPERIMENTAL

Com o intuito de simular uma condição real de fabricação da indústria de moldes e matrizes, definiu-se um corpo de prova com superfícies planas que são usinadas com o uso de uma ferramenta de topo esférico. Para o desenvolvimento do experimento proposto buscou-se o uso de alguns parâmetros com entradas fixas, entre eles, incremento, profundidade de corte e avanço por gume. A variação foi fornecida por meio de dois parâmetros, a velocidade de corte e a inclinação do plano de corte.

Para que seja melhor compreendido as etapas do processamento do experimento, a Figura 14 mostra um fluxograma experimental do processo, com as etapas da operação, entradas fixas e variáveis do processo de usinagem.

Figura 14 – Fluxograma do processo experimental



Fonte: o autor (2020)

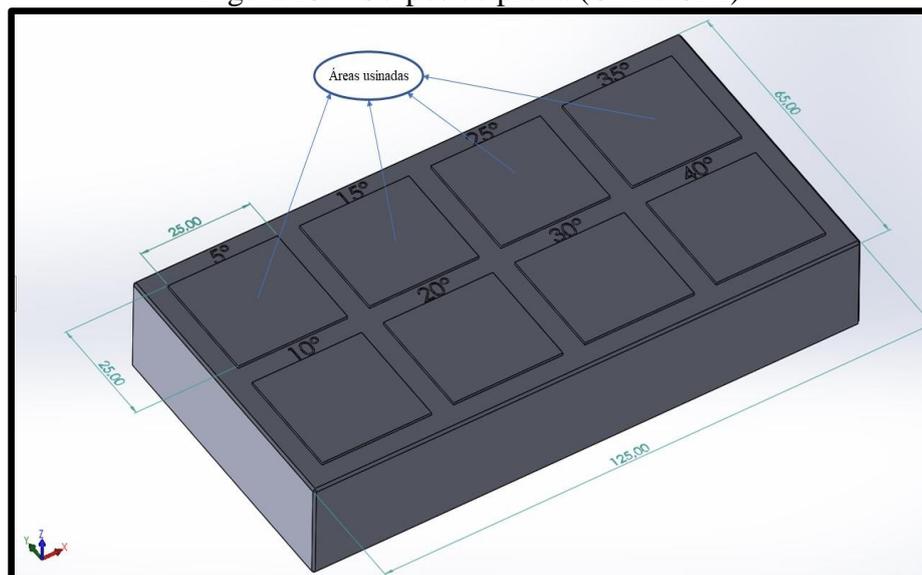
As variáveis definidas como parte do processo foram detalhadas a partir das especificações do projeto para servir como base no desenvolvimento dos ensaios. Além dos objetivos propostos e dos estudos da literatura, buscou-se contribuições às conclusões nos experimentos de (CHEN et al, 2014) e de (YAO et al, 2017). Sendo que, além de variar as inclinações do plano de corte, conforme os utilizados pelos autores citados anteriormente, o experimento em questão utiliza a variação da velocidade de corte para as análises da qualidade superficial gerada.

3.1.1 Corpos de prova

Para a realização das análises foram usinados dois corpos de prova de aço AISI H13, temperado e revenido com dureza aproximada de 48 - 50 HRC, cada corpo de prova contam com 8 áreas usinadas de 25 x 25 mm. Os dois corpos de prova CP1 e CP2 possuem as mesmas dimensões.

As áreas foram usinadas com inclinações do plano de corte diferentes. Conforme mostrado na Figura 15, as inclinações serão de 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35° e 40°, a velocidade de corte no CP1 será de 150 m/min, enquanto no CP2 a velocidade de corte será de 250m/min. Sendo que a velocidade de 150 m/min é a velocidade determinada pelo fabricante da ferramenta para este material e a de 250 m/min é para analisar os resultados tanto da qualidade superficial quanto do desgaste ao elevar a velocidade de corte. Esse aumento na velocidade de corte busca aumentar a produtividade, podendo elevar o desgaste do gume.

Figura 15 – Corpos de prova (CP1 e CP2)



Fonte: o autor (2020).

3.2 EQUIPAMENTOS E MATERIAIS

3.2.1 Centro de usinagem

As operações de fresamento foram realizadas em um centro de usinagem da fabricante Hermle modelo C400, mostrado na Figura 16, entre suas principais características estão a opção de usinagem simultânea em 5 eixos com rotação máxima 18000 rpm e potência de 20.000 Watts, com demais dados técnicos na Tabela 1 abaixo. A máquina está localizada na empresa Redan Indústria de Matrizes LTDA de Caxias do Sul.

Tabela 1 – Dados técnicos Hermle C400

Hermle C 400	
Curso dos eixos (X,Ye Z)	850 – 700 – 500 mm
Capacidade Máxima	600 kg
Aceleração linear	6 m/s ²
Comando	Heidenhain iTNC 530
Dimensões da mesa	Ø650 x 540 mm
Curso do eixo A	+91° / -139°
Capacidade do magazine	36 ferramentas

Fonte: catálogo Hermle (2016)

Figura 16 – Centro de usinagem Hermle C400



Fonte: o autor (2020).

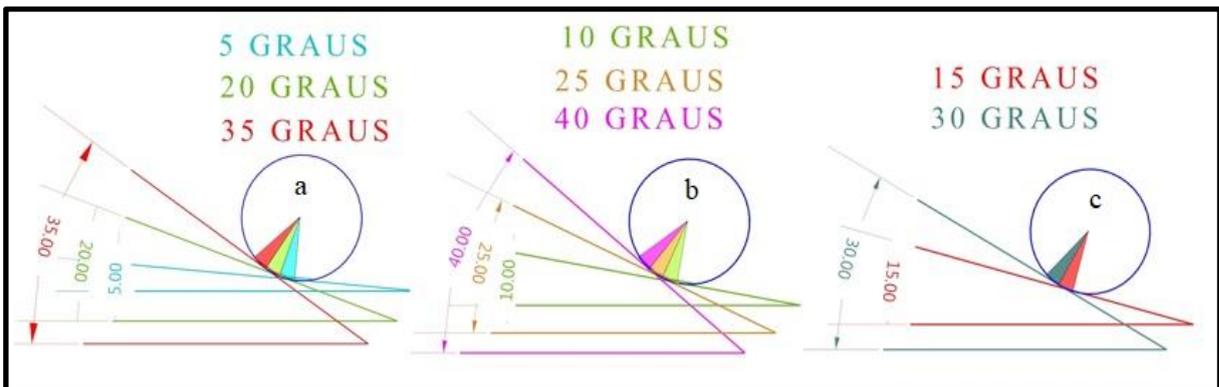
3.2.2 Ferramenta de corte

Baseado no referencial teórico discutido no capítulo 2, as fresas de topo esférico são usualmente aplicadas para busca de qualidade superficial elevada requerida na indústria de moldes e matrizes. Este fator foi determinante para a escolha da ferramenta de corte a ser utilizada.

Optou-se por uma ferramenta de metal duro inteiriço de topo esférico com diâmetro de 6mm da fabricante Mitsubishi Materials. Modelo MP2MBR0300, dois gumes de corte, comprimento total da fresa 80mm. Revestimento MS+ (Al, Ti, Cr) multicamadas, cobertura indicada para diversos materiais, desde aços carbono a aços liga e endurecidos de até 55 HRC.

Para evitar variações na qualidade da superfície geradas pelo desgaste, foram avaliadas as regiões de contato em cada inclinação. Com o objetivo de cada área ser usinada com uma região de contato nova da ferramenta, a Figura 17 nos ilustra o contato dos gumes da ferramenta com a superfície do corpo de prova, em cada uma das inclinações utilizadas.

Figura 17 – Contato do gume para cada inclinação



Fonte: o Autor (2020)

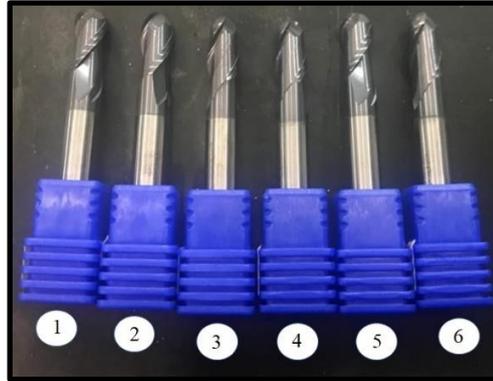
Na letra (a) da Figura 17 é indicado que uma ferramenta será utilizada para usinar nas inclinações de 5°, 20° e 35°. Em (b) outra ferramenta usinará nas inclinações de 10°, 25° e 40°. E por fim, a terceira ferramenta em (c) indica que será utilizada para usinar nas inclinações de 15° e 30°.

Deste modo, o contato do gume para cada inclinação será sempre um contato novo afim de evitar alguma possível variação na qualidade da superfície entre as inclinações por meio de uma região de contato desgastada no processo anterior.

Por este motivo, foram utilizadas no total 6 ferramentas esféricas mostradas na Figura 18 e numeradas de 1 à 6, ferramentas de 1 a 3 foram usadas na usinagem do CPI e as

ferramentas de 4 a 6 no CP2.

Figura 18 – Ferramentas de topo esférico utilizadas



Fonte: o autor (2020)

Para identificar o contato do gume com a peça em relação ao diâmetro efetivo da peça a Tabela 2 nos mostra os diâmetros efetivos de corte da ferramenta para cada inclinação.

Tabela 2 – Diâmetros efetivos

Inclinação (em graus)	5	10	15	20	25	30	35	40
Diâmetro efetivo (em mm)	2,04	2,54	3,05	3,44	3,82	4,26	4,58	4,93

Fonte: o autor (2020)

As ferramentas foram fixadas em um cone HSK-A63 com porta-pinça do modelo PowRgrip da fabricante Rego-Fix, que fornece um excelente amortecimento de vibração, de alta excentricidade. O balanço será de 4 L/D gerando um comprimento de 24 mm para fora do cone de fixação que fornece uma boa fixação e reduz a vibração, e em cada uma das ferramentas utilizadas será avaliado o batimento por meio de um relógio apalpador, para evitar variações causadas por algum gume fora de centro.

Após a realização da usinagens de ambos os corpos de prova, foram avaliados o desgaste das 6 ferramentas utilizadas, comparando as regiões de contato e analisando a variação de desgaste gerados pela velocidade de corte em 150 e 250 m/min.

3.2.3 Medição de rugosidade

A análise quantitativa dos corpos de prova será realizada através do rugosímetro SJ-

301, com ponteira de diamante de raio de 5 μm , o qual se encontra no laboratório do bloco D da UCS. As medições são realizadas no sentido transversal e longitudinal de cada corpo de prova, 5 pontos serão mensurados para cada tipo de rugosidade Ra, Rz e Rmax, baseando-se nas condições da norma ISO 4288:1996 mostradas na Tabela 3.

Tabela 3 – Comprimento de amostragem e avaliação de rugosidade

Rugosidade (μm)		Comprimento de amostragem (<i>Cutt-off</i>) (mm)	Comprimento de avaliação (mm)
Ra	Rz		
< 0,02	< 0,1	0,08	0,40
0,02 - 0,1	0,1 - 0,5	0,25	1,25
0,1 - 2	0,5 - 10	0,80	4,00
2 - 10	10 - 50	2,50	12,50
> 10	> 50	8,00	40,00

Fonte: adaptado de ISO 4288:1996

As medições de rugosidade foram realizadas 5 vezes no sentido longitudinal (mesmo sentido da ferramenta) e 5 vezes no sentido transversal, para cada área usinada dos corpos de prova CP1 e CP2, totalizando em 80 avaliações de rugosidade para cada corpo de prova.

3.2.4 Avaliação da textura

Para realizar a análise qualitativa, quanto a textura, foi utilizado um estereoscópio trinocular de medição universal da marca ENTEX, modelo TBE-10B. A avaliação da textura se dará por meio das imagens geradas pelo estereoscópio.

3.2.5 Material

Para os ensaios propostos o material utilizado foi o aço AISI H13, temperado e revenido com dureza aproximada de 48 - 50 HRC, a opção por este aço foi devido a sua grande utilização na indústria de moldes e matrizes. Por ser um material de alta resistência à quente, pela sua resistência à corrosão e por ter características que permitem um bom polimento. Os materiais utilizados foram fornecidos pela empresa Diferro Aços Especiais LTDA, a composição química dos aços utilizados são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Composição química do aço AISI H13

Análise [%]	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	Al	N	V
	0,40	0,34	0,92	0,01	0,001	0,08	5,28	0,10	1,23	0,02	0,08	0,83

Fonte: adaptado de Diferro Aços Especiais Ltda. (2020)

3.3 PARÂMETROS DE ENTRADA DO PROCESSO

Na busca de eliminar possíveis variações nos resultados de rugosidade e de textura, alguns parâmetros de corte são mantidos constantes no processo. Os parâmetros adotados seguem o que é utilizado para acabamento na empresa onde fora efetuado os testes e seguem também, as recomendações do fabricante da ferramenta. Sentido de corte concordante, a direção de corte aplicada foi horizontal descendente, o incremento lateral a_e de 0,1 mm, profundidade de corte a_p de 0,1 mm e avanço por gume f_z de 0,1 mm estes parâmetros são constantes em ambos corpos de prova. Estes parâmetros estão diretamente ligados a qualidade da superfície, pois definem o esforço de corte, a altura da crista e afetam dados importantes tais como a vibração e a formação de cavaco.

Os parâmetros de corte que foram variados ao longo do processo foram a velocidade de corte v_c de 150 m/min no CP1 e de 250 m/min no CP2, a velocidade de avanço v_f calculada conforme o diâmetro efetivo da ferramenta e a velocidade de corte. Conforme citado no capítulo 3.1.1, as inclinações do plano de corte variaram de 5° até 40° uma para cada área usinada dos corpos de prova.

3.4 VARIÁVEIS DE SAÍDA DO PROCESSO

As variáveis de saída do experimento proposto que foram avaliadas para analisar o comportamento da superfície usinada ao longo do processo são: o desgaste das ferramentas utilizadas, a rugosidade e a textura em alguns pontos de cada área usinada do corpo de prova. Utilizando estes dados tornou-se possível analisar e comparar os resultados gerados pela variação da inclinação do plano de corte para cada operação. Sendo que em cada inclinação do plano de corte ocorre um contato diferente do gume da ferramenta com a superfície usinada, foram obtidos dados de rugosidade nos sentidos transversal e longitudinal, e dados de textura com ampliações de 41 e de 165 vezes.

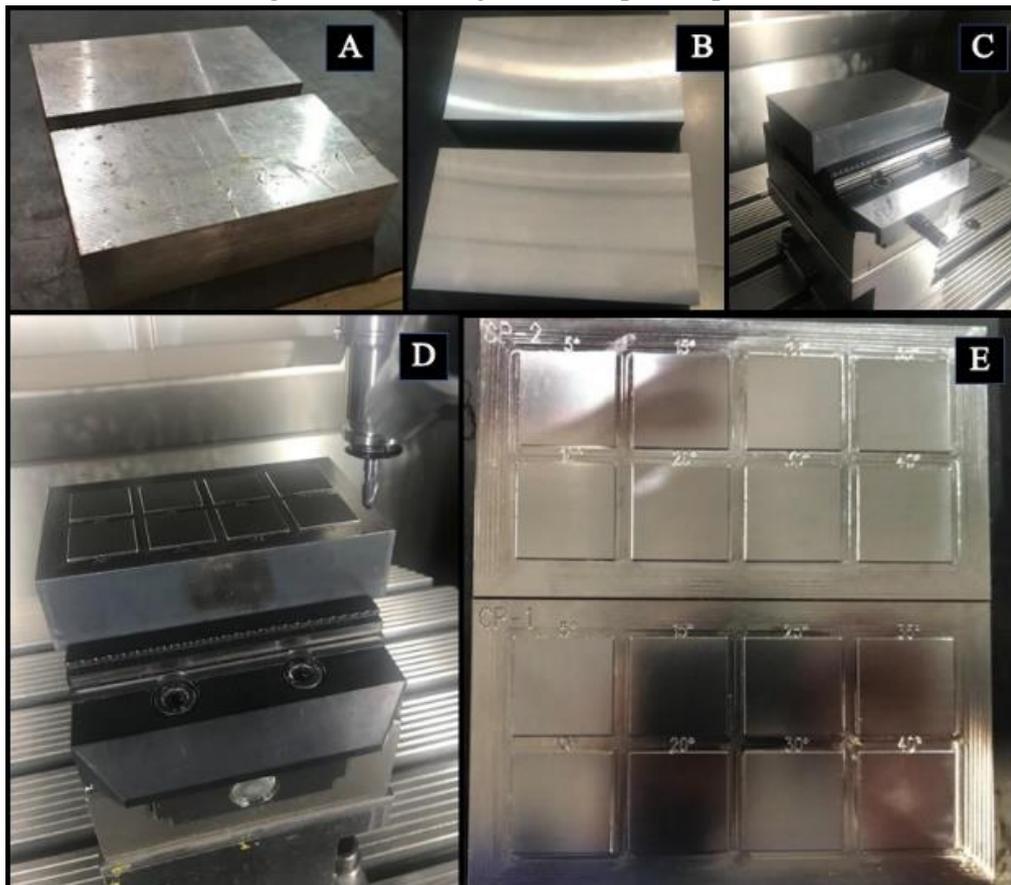
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados da aplicação da metodologia proposta, inicialmente são apresentados e discutidos os resultados da usinagem dos corpos de prova e da avaliação do desgaste das fresas utilizadas. Posteriormente, são exibidos os dados das análises de rugosidade e de textura para cada inclinação utilizada, com as respectivas discussões em cada uma delas. Por fim, é apresentada uma comparação entre os corpos de prova CP1 e CP2 usinados com velocidades de corte diferentes.

4.1 USINAGEM DOS CORPOS DE PROVA

O processo de usinagem dos corpos de prova foram realizados utilizando velocidade de corte de 150m/min no CP1, e 250m/min no CP2. Na Figura 19, mostra-se o processo de fabricação dos corpos de prova CP1 e CP2 passo a passo, desde seu bloco em bruto até a conclusão dos testes.

Figura 19 – Produção dos corpos de prova



Fonte: o autor (2020).

A letra (A) indica os dois corpos de prova do modo que foram comprados do fabricante, aço H13 com 217 HB. Na letra (B) da figura 19 mostra os corpos de prova após o tratamento térmico de têmpera e revenimento com dureza aproximada de 50 HRC, esquadrejados e retificados. Em (C) tem-se o corpo de prova fixado na máquina para o processo de usinagem, em (D) indica o início da usinagem das áreas analisadas com a fresa de topo esférico posicionada. E por fim, em (E) mostra-se os dois corpos de prova prontos para as análises ao fim dos processos de usinagem.

Para identificar as áreas usinadas foram gravadas em cima de cada área, a inclinação do plano de corte utilizado de 5° até 40°, e também foram gravadas identificações para cada corpo de prova, CP1 e CP2 usinados com velocidade de corte diferentes. A tabela 4 nos mostra todos os parâmetros utilizados no processo.

Tabela 5 – Dados de corte utilizados

Corpo de prova	V_c (m/min)	V_f (mm/min)	A_p (mm)	A_e (mm)	F_z (mm)	D (mm)
CP1	150	1592	0,1	0,1	0,1	6
CP2	250	2653	0,1	0,1	0,1	6

Fonte: o autor (2020)

4.2 TEMPO DOS PROCESSOS

Para cada inclinação usinada, foram mensurados os tempos de duração dos processos, um aspecto muito importante no comparativo dos corpos de prova. A proposta para CP2 foi elevar em 100 m/min a velocidade de corte utilizada no CP1, sendo que os parâmetros estão ligados não só em ganhos de qualidade superficial, mas também em ganhos de tempo de processo (KÖNIG; KLOCKE, 1997).

De acordo com as equações exibidas na seção 2.1.4 o aumento da velocidade de corte está diretamente relacionado com a rotação da fresa, e ao aumentar a rotação, conseqüentemente, a um aumento na velocidade de avanço (mm/min). O avanço está associado ao comprimento percorrido pela ferramenta em determinado tempo, aumentando este parâmetro a usinagem acontece de forma mais rápida.

Os tempos foram medidos desde o ponto inicial do programa de usinagem, após as coordenadas de aproximação, até o final de cada área usinada. Neste caso, deve-se observar que todas as áreas usinadas possuem a mesma dimensão (25mm x 25 mm), a variação do tempo foi gerada apenas pela velocidade de corte. As diferentes inclinações do plano de corte não geraram

variação no tempo do processo, a Tabela 6 nos mostra a duração de cada processo.

Tabela 6 – Comparação da duração dos processos

Corpo de prova	V _c (m/min)	Tempo para uma área (min.)	Tempo para 8 áreas (min.)
CP1	150	05:40	45:33
CP2	250	03:42	29:60
		Ganho percentual de tempo	35%

Fonte: o autor (2020)

4.3 ANÁLISE DO DESGASTE DAS FERRAMENTAS

Conforme mostrado na seção 3.2.2 a região de contato do gume da ferramenta varia conforme a inclinação do plano de corte utilizado. Através dos experimentos gerados no CAD pode-se identificar que a cada 15° a região de contato da fresa não tem interferência de desgaste com a região utilizada em 15° para mais ou para menos. Sendo assim, a região do gume afetada pelo desgaste em uma inclinação de 5°, não tem interferência quando a mesma ferramenta é utilizada com uma inclinação de 20°.

Para realizar a usinagem dos dois corpos de prova e garantir que todas as inclinações testadas fossem usinadas por uma região nova do gume, utilizou-se 6 fresas de topo esférico todas com 6 mm de diâmetro. A Tabela 7 nos mostra qual ferramenta foi utilizada para cada inclinação e qual foi o batimento mensurado. Identificar estes parâmetros é importante para a analisar qual região do gume da ferramenta esteve em contato com a superfície usinada, e a variação de batimento constatada foi de no máximo 5 µm. O batimento acima de 10 µm pode ocasionar eventuais vibrações acarretando em um corte não-estável.

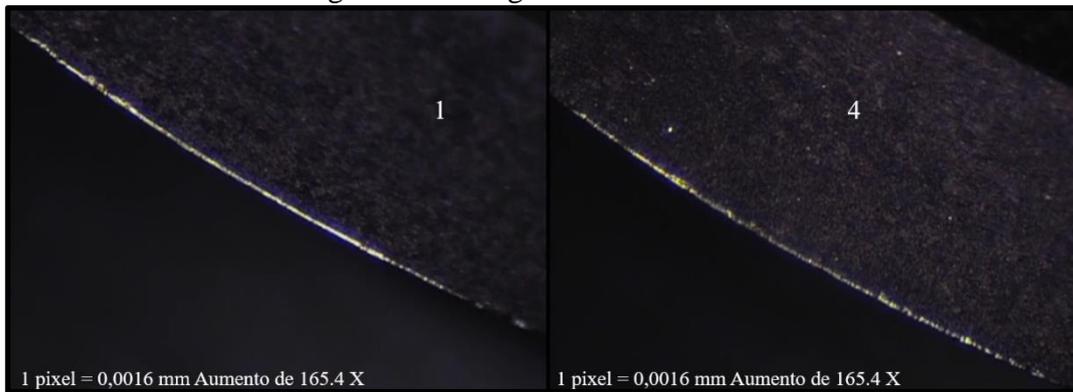
Tabela 7 – Relatório das ferramentas

Ferramenta	Corpo de prova	Inclinações utilizadas	Batimento
1	1	5°, 20° e 35°	5 µm
2	1	10°, 25° e 40°	3 µm
3	1	15° e 30°	7 µm
4	2	5°, 20° e 35°	5 µm
5	2	10°, 25° e 40°	2 µm
6	2	15° e 30°	5 µm

Fonte: o autor (2020)

A análise do desgaste foi efetivada por meio de imagens dos gumes das ferramentas, o desgaste encontrado foi pequeno o que dificultou a análise e a visualização de diferenças entre as ferramentas. Na Figura 20 mostra-se a ferramenta 1 e a 4, os desgastes mensurados foram de aproximadamente 10 μm em ambas ferramentas.

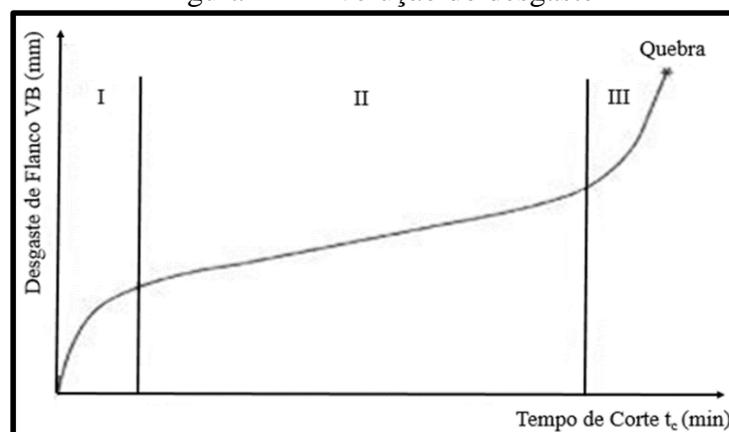
Figura 20 – Desgaste nas ferramentas



Fonte: o autor (2020)

As duas ferramentas na Figura 20 usinaram nas mesmas inclinações do plano de corte, mas a ferramenta 1 com V_c de 150m/min e na ferramenta 2, 250m/min. Nota-se que o desgaste foi praticamente o mesmo (dentro da faixa de 10 μm), mantendo-se de forma similar para as condições testadas. De acordo com a Figura 21 o gráfico nos mostra o comportamento da curva desgaste x tempo na evolução do desgaste, o estágio I apresenta o ajuste do gume, onde ocorre um desgaste elevado. Ao entrar no estágio II a ferramenta apresenta uma taxa de desgaste constante ao longo do tempo. Com isso, nota-se que a velocidade de corte produz grande alterações no desgaste, causando praticamente o mesmo desgaste nos dois corpos de prova, sendo que as ferramentas no CP2 tiveram um tempo 35% menor.

Figura 21 – Evolução do desgaste

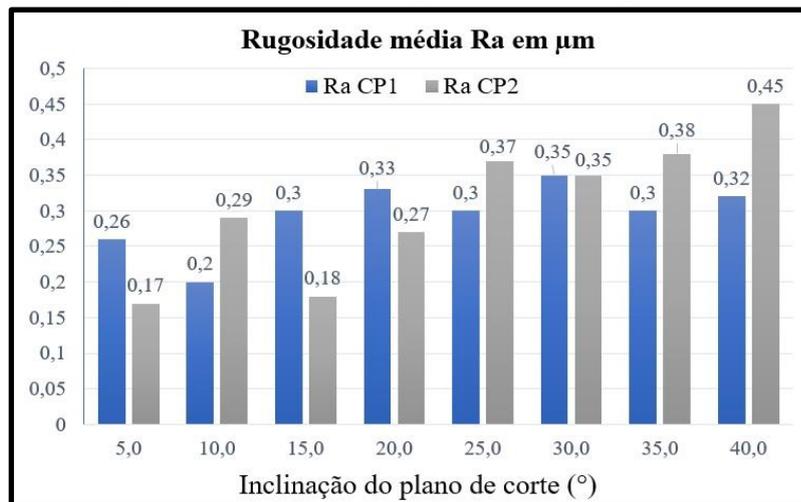


Fonte: adaptado de abrão (2011)

4.4 MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE

Todos os dados de rugosidade exibidos nessa seção foram mensurados em cada uma das 8 áreas usinadas dos dois corpos de prova (CP1 e CP2), cada área possui uma inclinação do plano de corte diferente. Para cada uma das áreas foram realizadas 5 medições no sentido longitudinal (sentido de corte da ferramenta) e também 5 medições no sentido transversal. A Figura 22 ilustra os dados da rugosidade média (Ra), uma média foi obtida através das 5 medições no sentido longitudinal.

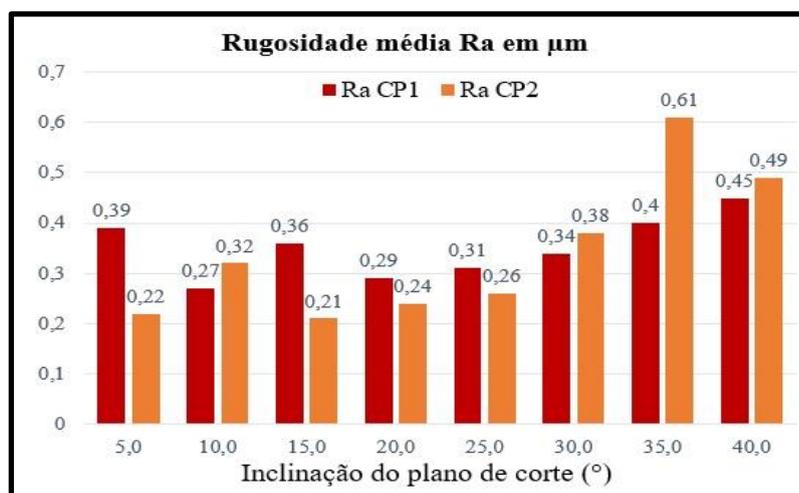
Figura 22 – Análise da rugosidade Ra longitudinal



Fonte: o autor (2020)

A Figura 23 ilustra os dados da rugosidade média (Ra), uma média foi obtida através das 5 medições no sentido transversal.

Figura 23 – Análise da rugosidade Ra transversal



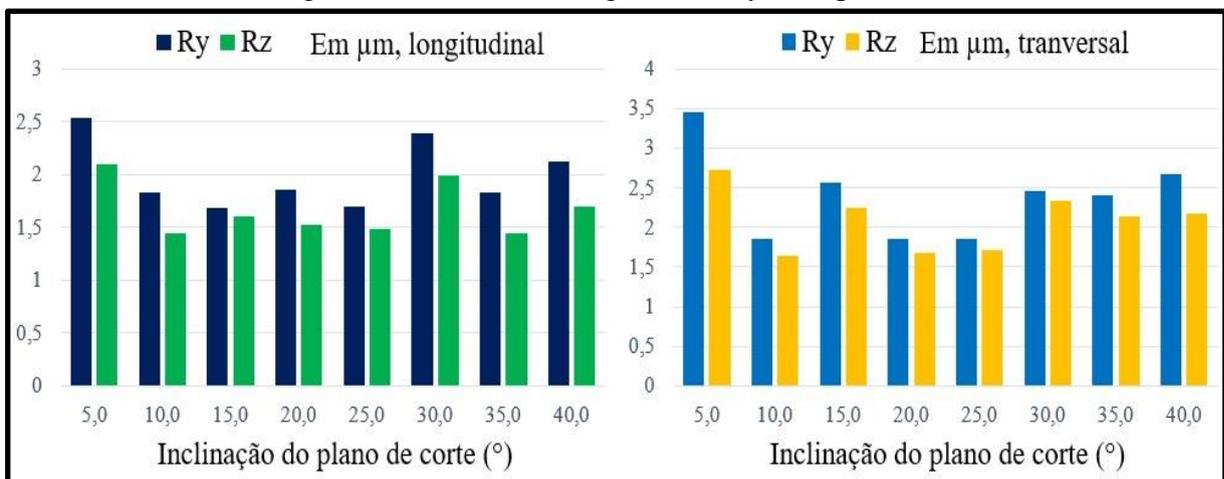
Fonte: o autor (2020)

Ao analisar o gráfico da Figura 22 pode-se observar que os menores valores de Ra para CP1 se encontram na inclinação de 10° e para CP2 se encontram em 5° e 10°. Com o aumento da velocidade de corte nas usinagens do CP2, pode-se observar uma diferença expressiva nos valores de Ra. Na inclinação de 5° o registro no CP1 foi de 9,00 μm mais elevado que o CP2, na inclinação de 15° a diferença foi ainda maior 12,00 μm. Conforme o aumento da inclinação a rugosidade também aumentou principalmente a partir dos 20°, sendo que nas inclinações de 35° e 40° foram registrados os piores valores de rugosidade tanto no CP1 quanto no CP2. A inclinação de 10° no CP1 teve valores próximos as menores rugosidades registradas no CP2.

Na figura 23 os menores registros de rugosidade também ficaram registrados no CP2, na inclinação de 5° o registro no CP2 foi 0,17 μm menor, e na inclinação de 10°, 0,15 μm menor. Comprovando que nos dois sentidos as medições de Ra foram melhores com maior velocidade de corte. Nas inclinações maiores os registros de rugosidade foram maiores chegando até a 40,00 μm maior ao analisar os dois extremos. Nota-se a partir dos 30° de inclinação os registros foram menores no CP1 do que no CP2.

Para entender melhor o que acontece conforme a variação da inclinação do plano de corte, foram realizadas medições de rugosidade Ry e Rz, como complemento aos valores de Ra. A Figura 24 ilustra os valores de Ry e Rz formados pela média de 5 medições efetivadas nas áreas usinadas do CP1 nos sentidos longitudinal e transversal.

Figura 24 – Análise da rugosidade Ry e Rz para CP1



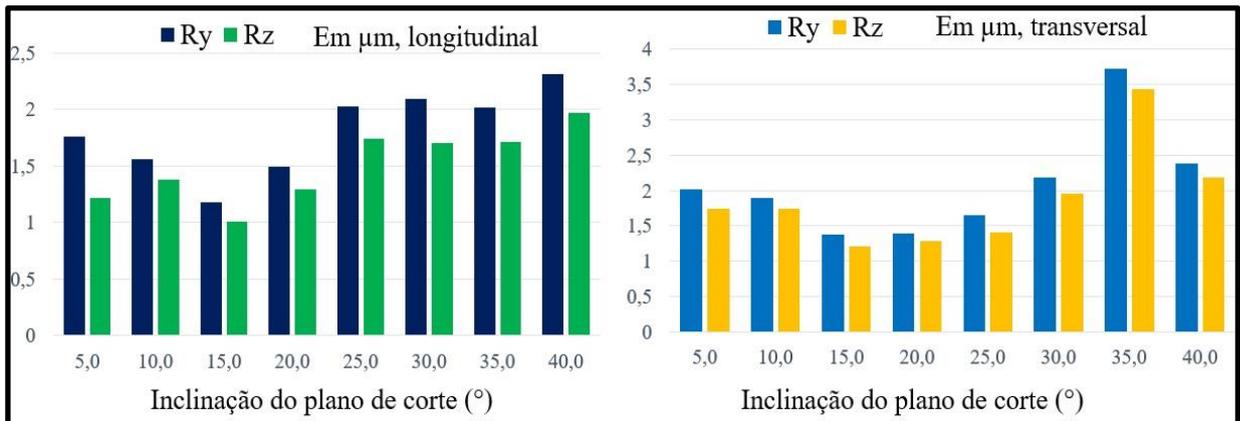
Fonte: o autor (2020)

Os parâmetros medidos de Ry e Rz complementam com alguns detalhes que não pode-se observar apenas com os dados de Ra, mostra-se no gráfico que os valores mais elevados se encontram na inclinação de 5°. Mas que continuam, como no Ra, os valores menores de rugosidade na inclinação de 10°, as inclinações de 15°, 20° e 25° também obtiveram valores

menores de rugosidade. E um aumento nos valores a partir da inclinação de 30° até 40°.

A Figura 25 ilustra os valores de Ry e Rz formados pela média de 5 medições efetivadas nas áreas usinadas do CP2 nos sentidos longitudinal e transversal.

Figura 25 – Análise da rugosidade Ry e Rz para CP2



Fonte: o autor (2020)

Ao analisar os gráficos da Figura 25 pode-se observar que diferente dos valores de Ra, os menores valores de Ry e Rz, se encontram nas inclinações de 15° e 20°. A partir dos 25° os valores de rugosidade começam a subir rapidamente, encontrando os maiores valores registrados nas inclinações de 35° e 40°.

Comparando os dados das Figuras 24 e 25 os menores valores de Ra são encontrados em 10° e 15°, ou seja a inclinação com a melhor qualidade de superfície está em 15°. Nos dois corpos de prova os valores de rugosidade aumentaram muito com inclinações maiores que 20°, e mantiveram valores aproximados nas inclinações mais baixas.

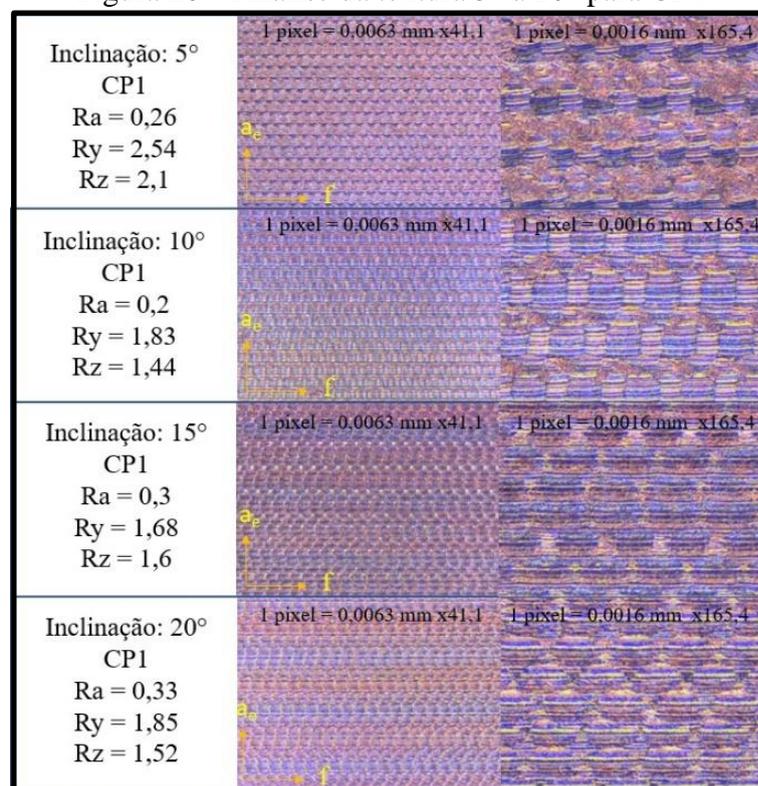
Pode-se notar que os valores de Ry e Rz ficaram elevados na inclinação de 5°, mesmo tendo o valor de Ra abaixo dos outros. Neste caso, pode-se afirmar que na inclinação de 5° o centro da ferramenta acabou atuando no corte prejudicando a qualidade da superfície, através desta atuação o esforço e a vibração no corte aumenta, gerando picos mais profundos e vales e mais elevados na superfície.

O estudo de (YAO et al, 2017) confirma que as inclinações do plano de corte exercem influência sobre a qualidade superficial, e que os menores valores de rugosidade mensurados foram registrados na inclinação 30° sendo que em seu experimento, as inclinações utilizadas foram de 0°, 30° e 60°.

4.5 ANÁLISE DA TEXTURA

Nesta seção são apresentados as imagens referente as texturas das áreas usinadas dos corpos de prova, obtendo assim uma avaliação qualitativa da superfície em combinação com os dados quantitativos de rugosidade já obtidos na seção anterior. Para isso, realizou-se imagens com 2 aproximações diferentes de cada uma das 8 áreas usinadas. A Figura 26 mostra as imagens de textura das inclinações de 5° até 20° do CP1.

Figura 26 – Análise da textura 5° à 20° para CP1



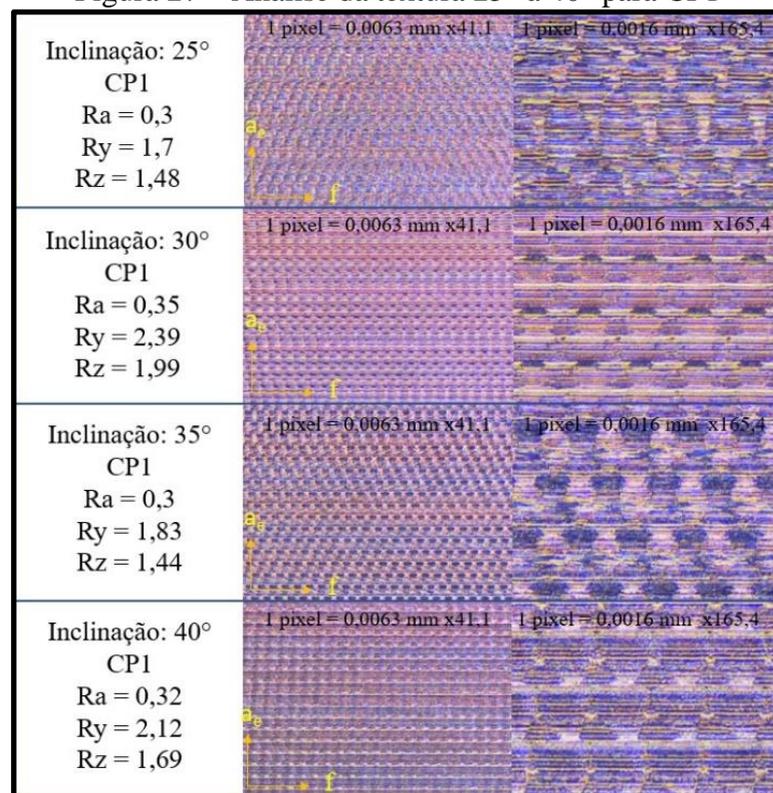
Fonte: o autor (2020)

As imagens mostram as linhas longitudinais que identificam a passagem da ferramenta, é possível notar de modo geral nas imagens a forma das células e as marcas resultantes do avanço f_z e do incremento lateral a_e . A textura gerada por uma ferramenta de ponta esférica em um plano inclinado resulta em uma topografia com marcas geradas simplesmente pela passagem do gume, formadas pelo movimento combinado de translação e rotação da ferramenta em relação a peça (NICOLA, 2008).

Ao comparar as imagens da textura pode-se identificar um comportamento similar entre cada uma das inclinações, a forma das células se mantém com poucas alterações. Na inclinação de 10°, onde obteve-se os menores valores de rugosidade, a textura se manteve com

marcas de forma uniformes permitindo a identificação das marcas de avanço e incremento lateral. As inclinações de 15° e 20° mantiveram um comportamento parecido com a inclinação de 10° mesmo com registros de rugosidade levemente maiores. Na inclinação de 5° as marcas de forma estão mais deformadas e os valores de Ry e Rz estão elevados efeitos que foram causados pelo contato do centro do gume da fresa com a peça gerando uma leve vibração e deformação na superfície. Nota-se que na inclinação de 5° a diferença entre os valores de Ry e Rz é de 0,44 μm , essa diferença mais elevada que nas outras inclinações é causada principalmente pela vibração. A Figura 27 mostra as imagens de textura das inclinações de 25° até 40° do CP1.

Figura 27 – Análise da textura 25° à 40° para CP1

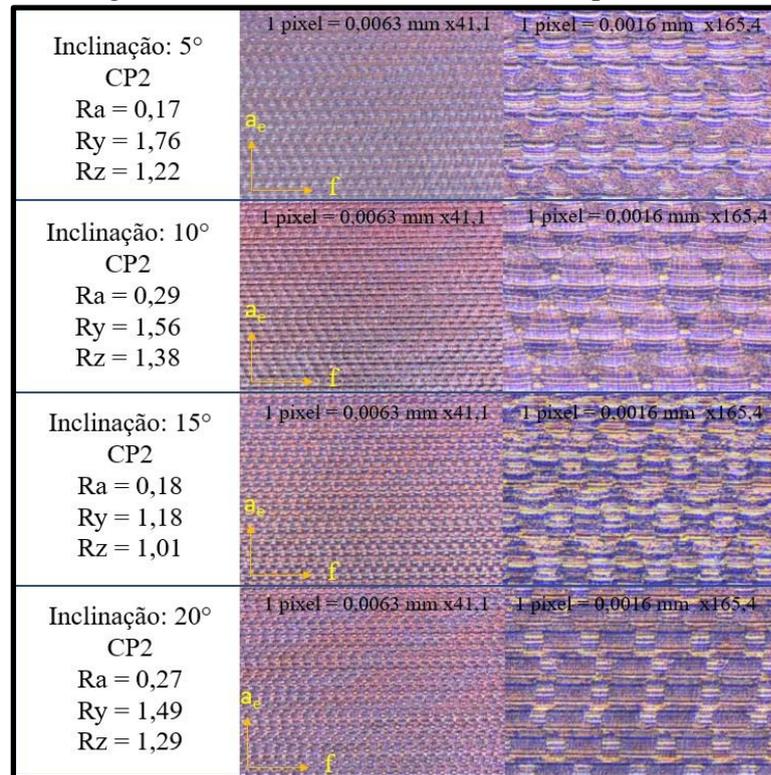


Fonte: o autor (2020)

As inclinações de 30° e 40° tiveram marcas de vales profundos em meio a forma e também picos elevados com pouca variação entre as inclinações, juntamente com valores mais elevados de rugosidade. As inclinações de 25° e 35° tiveram valores de rugosidade aproximados no sentido longitudinal, mas no sentido transversal as rugosidade Ra, Ry e Rz foram maiores na inclinação de 35°, conforme os gráficos das Figuras 22 e 24. Essa diferença entre elas explica a variação apresentada nas imagens de textura, juntamente com as marcas de vibração onde a diferença entre os valores de Ry e Rz é de 0,22 μm na inclinação de 25° e de 0,39 μm em 35°.

A Figura 28 exibe as imagens da textura das áreas usinadas do CP2 nas inclinações de 5° até 20°, comparando com os valores mensurados de rugosidade no sentido longitudinal.

Figura 28 – Análise da textura 5° à 20° para CP2



Fonte: o autor (2020)

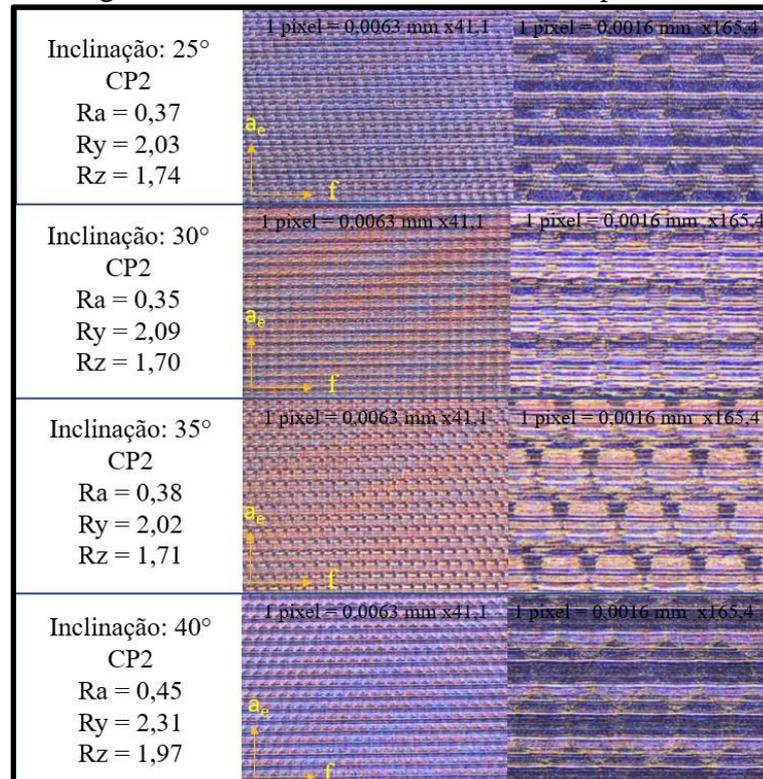
Ao analisar as imagens da textura no CP2, primeiramente pode-se notar a diferença em relação a forma quando comparamos com as imagens geradas no CP1. A forma das células no CP2 estão mais alongadas e achatadas, efeito causado pelo aumento da velocidade de avanço.

As inclinações de 5° e de 15° possuem os menores valores de rugosidade e também sua textura é bem semelhante. A principal diferença entre essas duas inclinações são as rugosidades Ry e Rz, como no CP1 esse aumento foi causado pelo contato do centro da ferramenta com a peça, causando mais esforço e vibração. Na inclinação de 5° obteve-se a maior diferença entre os valores de Ry e Rz sendo de 0,54 μm , este efeito foi causado pela elevada vibração nesta inclinação e o contato do centro da ferramenta com a peça prejudicando o corte. A inclinação de 15° foi a melhor rugosidade no geral analisando os dois corpos de prova, pode-se analisar que a sua textura possui formas arredondadas mantendo um padrão muito parecido ao longo de seu comprimento sem marcas de vibração ou de vales profundos. Os valores de Ry e Rz foram os menores registrados tanto no sentido longitudinal quanto no

sentido transversal. As inclinações de 10° e 20° obtiveram dados fora do padrão de forma e dados maiores de rugosidade.

A Figura 29 mostra as imagens da textura das áreas usinadas do CP2 nas inclinações de 25° até 40°, comparando com os valores mensurados de rugosidade no sentido longitudinal.

Figura 29 – Análise da textura 25° à 40° para CP2



Fonte: o autor (2020)

As imagens de textura das inclinações 25°, 30° e 35° possuem dados bem semelhantes, com uma forma bem parecida, os valores de rugosidade também ficaram bem próximos. Existem marcas na textura de alguns vales mais profundos elevando os valores de rugosidade, mantendo-os num valor bem acima das inclinações menores. A inclinação de 40° obteve valores elevados de rugosidade, na imagem da textura pode-se visualizar uma mudança de forma e também vales mais profundos complementando os valores da rugosidade.

Esses resultados qualitativos estão de acordo com as conclusões do estudo de (OZTURK et al, 2009), comprovando assim que, nas usinagens de acabamento deve-se evitar o contato do centro da ferramenta esférica com a peça. Para reduzir a vibração, o esforço e a deformação do material causado pela velocidade de corte nula.

5 CONCLUSÃO

As análises efetuadas, os parâmetros utilizados e o tratamento dos dados obtidos neste trabalho permitem afirmar que a inclinação do plano de corte da ferramenta possui grande influência sobre a qualidade da superfície usinada. Dentro das condições testadas e mantendo os parâmetros a_e , a_p e f_z fixados em 0,1mm.

O modo como o gume cortante da ferramenta de corte entra em contato com o material a ser usinado, produz a variação de seu diâmetro efetivo tornando a usinagem diferente para cada inclinação por mais que entre elas sejam mantidos os mesmos parâmetros de corte. Em relação ao diâmetro efetivo pode-se concluir que para evitar o contato do gume com o centro da ferramenta esférica, deve-se utilizar um diâmetro efetivo maior que 45% do total da ferramenta.

A rugosidade e a textura tiveram consideráveis variações, mas os dados de desgaste da ferramenta de corte e tempo entre cada estratégia de inclinação diferente se mantiveram sem variações ao longo dos testes. A variação em relação ao tempo foi gerada através da velocidade de corte e do avanço da mesa, parâmetros que foram aumentados nos testes do CP2.

Ao relacionar os dados de tempo entre os dois corpos de prova usinados CP1 e CP2, usinados com velocidade de corte diferentes (150 m/min e 250 m/min respectivamente), conclui-se que o tempo de processo no CP2 foi 35% menor em relação ao tempo de processo do CP1. Conforme foi estudado na literatura a velocidade de corte obteve grande influência sobre os dados de tempo e ganho de produção. Todavia, não foi possível alcançar resultados conclusivos em relação ao desgaste das ferramentas utilizadas, sendo que a cada 15° de inclinação a ferramenta atuava com uma faixa do gume diferente. O gume da ferramenta sofreu apenas uma leve adesão de contato com o material, sendo que cada faixa do gume atuou de 3:42 minutos no CP2 e 5:40 no CP1, o tempo em contato com a peça não causou no gume da ferramenta dados significativos de desgaste.

Na análise das superfícies geradas as 8 áreas usinadas em cada corpo de prova, tiveram variações na qualidade de sua superfície. Os dados quantitativos obtidos pela medição da rugosidade no CP1, auxiliam a concluir que o menor valor de R_a (0,2 μm) foi registrado na inclinação de 10°, nas outras inclinações testadas os valores de R_a se mantiveram praticamente sem alteração. Os valores de R_y e R_z tiveram seus menores valores nas inclinações de 10°, 15°, 20° e 25° com valores muito próximos entre elas, nas demais inclinações os valores aumentaram cerca de 30%. Ao complementar os valores de rugosidade com as imagens qualitativas da textura das áreas, pode-se notar padrões similares de textura para as inclinações de 10°, 15°,

20° e 25°, na inclinação de 5° a textura teve um padrão diferente, marcas de deformação causadas pelo contato do centro da fresa com peça. Na análise da superfície do CP2 o menor valor de Ra (0,17) foi registrado nas inclinações de 5° e 15° cerca de 40% menor que os valores registrados nas outras inclinações. Os valores de Ry e Rz tiveram seus menores registros nas inclinações de 10°, 15° e 20° com valores aproximados entre elas. Nas demais inclinações registros cerca de 30% mais altos mostrando um comportamento igual ao do CP1. Juntamente com os dados de rugosidade foram geradas imagens da textura, que mostram a inclinação de 15° tendo uma textura com a forma arredondada e muito regular ao longo de sua extensão, as outras inclinações tiveram formas mais irregulares com algumas marcas de vales profundos, principalmente nas inclinações de 30°, 35° e 40°.

Ao comparar os dois corpos de prova, concluí-se que a maior velocidade de corte não só realizou o processo em menos tempo, como também gerou superfícies com melhor qualidade. Assim, pode-se confirmar os benefícios da usinagem em alta velocidade (HSC). Por fim, a melhor inclinação do plano de corte entre todas as utilizadas nos testes, foi a inclinação de 15° com a velocidade de corte de 250m/min, obtendo-se assim a superfície com menores valores de Ra, Ry e Rz tanto no sentido longitudinal quanto no transversal.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Conforme o grande número de variáveis envolvidas e as diversas possibilidades de estratégias e parâmetros utilizadas neste estudo, para a continuidade desse desenvolvimento e mantendo a mesma linha de pesquisa. Pode-se sugerir algumas alternativas de trabalhos futuros conforme a lista abaixo:

- a) realização dos ensaios alterando a estratégia de corte para horizontal ascendente, vertical ascendente ou vertical descendente;
- b) utilizar um centro de usinagem 5 eixos de alta velocidade para elevar os parâmetros de velocidade de corte afim de confrontar os resultados obtidos;
- c) realizar estudos para identificar e compreender a vibração e a atuação das forças e esforços da usinagem ao usinar com planos inclinados;
- d) utilizar ferramentas do tipo barril para confrontar os resultados com a ferramenta de topo esférico.
- e) aumentar a inclinação do plano de corte para identificar o que ocorre com inclinações acima de 40°.
- f) aumentar a área das superfícies usinadas para conseguir avaliar os dados de desgaste através do aumento da velocidade de corte.

REFERÊNCIAS

ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; MACHADO, A. R.; SILVA, M. B.; **Teoria da usinagem dos materiais**. 2ª. Edição. São Paulo: Edgard Blücher, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6175:2015 **Usinagem – Processos Mecânicos**. Rio de Janeiro, 2015.

BATISTA, M. F. RODRIGUES, A. R. COELHO, R.T. Modelling and characterisation of roughness of moulds produced by high-speed machining with ball-nose end mill. **Journal of Engineering Manufacture**, p. 1-12, 2015.

BET, L. **Estudo da medição da textura de superfícies com sondas mecânicas e com sondas ópticas tipo seguidor**. 243 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

CHEN, X. ZHAO, J. DONG, Y. LI, A. WANG, D. Research on the machined surface integrity under combination of various inclination angles in multi-axis ball end milling. **Journal of Engineering Manufacture**, v. 228, p. 31-50, 2014.

CHEVRIER, P. TIDU, A. BOLLE, B. CEZARD, P. TINNES, J. P., Investigation of surface integrity in high speed end milling of low alloyed steel. **International Journal of Machine Tool and Manufacture**, 2003.

DAYMIN, A. BOUJELBENE, M. BEN, A. BAYRAKTAR, E. KATUNDI, D. Surface integrity in high speed end milling of titanium alloy Ti-6Al-4V. **Mater Sci Tech Ser** 27(1):387–394, 2011.

DMG MORI. **Centro de precisão de 5 eixos com tecnologia linear**. Disponível em: <<http://br.dmgmori.com/produtos/tecnologia-de-fresamento/centros-de-precis%C3%A3o-para-corte-em-alta-velocidade/hsc/hsc-20-linear#Intro>>. Acesso em 27 de março de 2020.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI N. L., **Tecnologia da usinagem dos materiais**. MM editora, 1ª edicao , 147p, 2001.

ENSELMANN, A. **HSC-Hartfräsen von Formen und Gesenken. Schriftenreihe des ISF**. Vulkan Verlag, ISBN 3-8027-8703-X, Essen, 1999.

HONG, C., IBARAKI, S., MATSUBARA, A. Influence of position-dependent geometric errors of rotary axes on a machining test of cone frustum by five-axis machine tools. **Precision Engineering**, Volume 35, Issue 1, 2011.

KÖNIG, W. e KLOCKE, F., **Fertigungsverfahren - Drehen, Fräsen, Bohren**, 7ª ed. Berlin: Springer Verlag, 1997.

LACERDA, F. B. **Análise da viabilidade da inserção de centro de usinagem cinco eixos no processo de fresamento de moldes**. Dissertação de Mestrado, PPGEP-UNIMEP, Santa Bárbara d'Oeste, 2013.

MIRALLES, C. E. **Análise de Estratégias de Corte no Fresamento com 5 eixos.** Dissertação (Mestrado), PPGEP-UNIMEP, Santa Bárbara d'Oeste, 2009.

NEVES, D., **Uma contribuição ao fresamento de matrizes com fresa de topo esférico,** 2002, 142 p, Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

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

OLIVEIRA, J. M. **Caracterização da Integridade de Superfícies Usinadas Para Produção de Moldes e Matrizes.** 92 f. Dissertação (Mestrado) Curso de Engenharia e Ciências dos Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2006.

OZTURK, E.; TUNC, L.T.; BUDAK, E. Investigation of lead and tilt angle effects in 5-axis ball-end milling processes. **International Journal Of Machine Tools & Manufacture**, v49 Elsevier, 2009.

REDDY, N. S. K., RAO, P. V., Selection of optimum tool geometry and cutting condition using a surface roughness prediction model for end milling. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London: Springer Verlag, 2005.

SEBRAE. **Sobrevivência das empresas no Rio Grande do Sul.** Disponível em: < <https://datasebrae.com.br/sobrevivencia-das-empresas-no-rio-grande-do-sul/>>. Acesso em: 27 mar, 2020.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. **Projeto de Engenharia Mecânica;** tradução J. B. AGUIAR, J. M. AGUIAR. Artmed, Porto Alegre, 2005.

SCHULZ, H. **High Speed Milling Machines.** In: Seminário Internacional de Alta Tecnologia – Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte, Santa Bárbara d'Oeste, 1996.

SILVA FILHO M. S. **Fresamento por Regioes com uma Alternativa na Usinagem de Cavidades para Moldes de Injecao Atraves de Sistema CAD/CAM,** 2000, 121f.

Dissertacao (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

SINHOFF, V. ALTMÜLLER, S. EISENBLÄTTER, G. A Usinagem a Seco em Alta Velocidade: Revolução ou Evolução?. **Máquinas e Metais, São Paulo**, v.35, n.404, p.22-37, 1999.

SONG, J. F. VORBURGER, T. V. Surface texture. In: **ASM Handbook: Friction, lubrication and wear technology**, v. 18, p. 184-190, 1992.

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

SOUZA, G. O. **Avaliação da aplicação do fresamento em 5 eixos a conjuntos de superfícies complexas.** 2011. 218f. Tese (Doutorado) Engenharia Aeronáutica e Mecânica –

ITA, São José dos Campos, 2011.

SOUZA, G. O.; GOMES, J. O.; SCHROETER, R. B.; **Estratégias de Usinagem Para Fresamento em 5-Eixos Simultâneos de Pás de Turbinas a Gás em TiAl6V4**. ITA, São José dos Campos, 2006.

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

TOH, C. K. Cutter path orientations when high-speed finish milling inclined hardened steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2006.

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

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

YAO, C. TAN, L. YANG, P. ZHANG, D. Effects of tool orientation and surface curvature on surface integrity in ball end milling of TC17. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2017.