

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
FACULDADE DE ENGENHARIA, ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Análise de Estratégias de Corte no Fresamento com 5 eixos

Carlos Eduardo Miralles
Orientador: Prof. Dr.-Ing. Klaus Schützer

Santa Bárbara d'Oeste, SP

2009

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
FACULDADE DE ENGENHARIA, ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Análise de estratégias de Corte no Fresamento com 5 eixos

Carlos Eduardo Miralles

Orientador: Prof. Dr.-Ing Klaus Schützer

Dissertação de Mestrado apresentada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP.

Santa Bárbara d'Oeste, SP

2009

Agradecimentos

Ao Professor Dr.-Ing. Klaus Schützer pela orientação e incentivo para a conclusão deste trabalho. Agradeço principalmente por ter me dado condições de realizar o sonho de conclusão em um título de mestrado.

Ao Professor Dr. Jefferson de Oliveira Gomes, por desde o início confiar em meu potencial e nunca ter me fechado as portas. Agradeço também por ter ajudado na principal fase deste trabalho. Sem sua ajuda, este trabalho não seria possível.

Ao Professor Dr. Alvaro José Abackerli, pelos conselhos, incentivo e cooperação para a conclusão deste trabalho.

Aos amigos de trabalho do Laboratório de Sistemas Computacionais para Projeto e Manufatura (SCPM) pelo apoio, incentivo e orientação.

A CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Centro Competência em Manufatura (CCM) pela infra-estrutura cedida para a realização dos experimentos, em especial para Willian Tavares de Carvalho e Tiago Franco do Nascimento.

À Sandvik, pelo fornecimento de ferramentas para a execução deste trabalho.

Aos meus amigos que sempre me ajudaram e estiveram ao meu lado, em especial, Henrique Lucena, Nilton Júnior, Rafael Assim, André Helleno (por todo o incentivo e conselhos), Carlos A. S. Barroso e Bruno B. e todos os outros que não haveria possibilidades de inserir aqui, mas que vivem sempre em minha lembrança.

Agradecimentos

À minha família, por todo o suporte e incentivo, em especial, minha mãe Simone Aparecida Pereira, meu irmão Francisco e minha irmã Mariana.

À minha noiva, Luciana Maria Fadini, pela cooperação, apoio, compreensão e incentivo em todos os momentos.

Ao meu grande amigo José Luis Motta, por todos os conselhos e incentivos dados durante toda a minha vida.

"Desde a antigüidade não se ouviu, nem com ouvidos se percebeu, nem com os olhos se viu um Deus além de ti, que trabalhe para aqueles que nele esperam."

(Isaías 64:4)

Sumário

SUMÁRIO.....	III
LISTA DE FIGURAS.....	V
LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE SIGLAS.....	IX
RESUMO.....	X
ABSTRACT	XI
1. INTRODUÇÃO	1
2. CADEIA CAD/CAM/CNC.....	4
2.1 Fresamento 5 eixos	4
2.2 Tipos de máquinas-ferramentas com 5 eixos.....	9
2.3 Modelagem de superfícies complexas.....	13
2.4 Integração CAD/CAM	20
2.5 Geração da trajetória para fresamento com 5 eixos	23
2.6 Estratégias de corte para 5 eixos	28
2.6.1 Ferramenta Inclínada (<i>Sturz</i>).....	28
2.6.2 Multiponto	29
2.6.3 PAM – <i>Principal Axis Method</i>	30
2.6.4 MPF – <i>Machining Potential Field</i>	31
2.6.5 Fresamento Periférico (<i>Swarf Milling</i>).....	32
2.7 Tolerância CAM	34
2.8 Interpolação da trajetória da ferramenta.....	35
2.9 Verificação e simulação da trajetória da ferramenta.....	36
2.9.1 Verificação do Programa NC	38
2.9.2 Simulação virtual de máquinas-ferramentas.....	42
2.10 Pós-processamento.....	44
3. PROPOSTA DO TRABALHO.....	46
3.1 Objetivos Gerais	46
3.2 Método.....	46
4. REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS	48
4.1 Definição do corpo de prova	48
4.2 Ferramentas e Sistema utilizados para a realização dos experimentos	50

4.2.1	Centro de usinagem utilizado	50
4.2.2	Sistema CAD/CAM	51
4.2.3	Dispositivo de fixação	51
4.2.4	Ferramentas	52
4.2.5	Rugosímetro Digital	53
4.2.6	Máquina de Medir por Coordenadas	54
4.3	Descrição das operações	58
4.3.1	Desbaste	58
4.3.2	Pré-acabamento	59
4.3.3	Acabamento	59
4.4	Descrição das estratégias de corte.....	60
4.4.1	Estratégias de corte para operações de acabamento.	62
4.4.2	Simulação das estratégias de corte.....	67
4.5	Pré-Testes	69
5.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	69
5.1	Tempo de Usinagem.....	70
5.2	Qualidade Superficial.....	72
5.3	Exatidão geométrica	87
6.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	92
7.	BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA	95

Lista de Figuras

Figura 2.1: Etapas da programação NC [14].	8
Figura 2.2: Posição dos eixos de translação e rotação.	10
Figura 2.3: Principais tipos de máquinas-ferramenta de 5 eixos [18].	10
Figura 2.4: Máquina-ferramenta com 5 eixos do tipo pórtico [19].	12
Figura 2.5: Exemplo de máquina-ferramenta com eixo C localizado na mesa [20].	12
Figura 2.6: Sólido de revolução (esquerda) e sólido de extrusão (direita).	14
Figura 2.7: Sólido de revolução com descontinuidades na superfície.	14
Figura 2.8: Manipulação de superfícies.	15
Figura 2.9: Exemplo da curva de Bézier.	16
Figura 2.10 Exemplo de modificação “global” da curva de Bézier.	17
Figura 2.11: Exemplo de modificação da curva B-Spline.	18
Figura 2.12: Exemplos de curvas NURBS [21].	19
Figura 2.13: Exemplo de interferência de corte.	24
Figura 2.14: Trajetória da ferramenta através do método isoparamétrico.	25
Figura 2.15: Método isoplanar	26
Figura 2.16: Intersecção de superfícies, Método APT.	27
Figura 2.17: Método APT.	28
Figura 2.18: Orientação dos eixos (método Sturz).	29
Figura 2.19: Método multiponto [8].	30
Figura 2.20: PAM - Método do Eixo Principal [38].	31
Figura 2.21: MPF - Área Potencial de Usinagem [29]	32
Figura 2.22: Exemplo de superfície regrada [42].	33
Figura 2.23: Trajetória da ferramenta pelo método Swarf Milling [41].	33
Figura 2.24: Tolerância CAM [45].	34
Figura 2.25: (a) Visualização gráfica entre peça e ferramenta; (b) Simulação com máquina-ferramenta virtual.	38
Figura 2.26: Análise de interferência do sistema CAM do software NX3.	39
Figura 2.27: Exemplo de exibição gráfica dos movimentos da ferramenta.	39

Figura 2.28. Exemplo de exibição gráfica dos movimentos da ferramenta com retirada de material.....	40
Figura 2.29: Transformação dos movimentos através do pós-processador [53].	45
Figura 2.30: Transmissão de dados entre sistemas CAM e comando numérico da máquina ferramenta [61].	45
Figura 4.1: Corpo de prova utilizado nos experimentos	49
Figura 4.2: Máquina-ferramenta Hermle C 600 U.....	50
Figura 4.3: Exemplo de mandril, utilizado para fixação da ferramenta.	52
Figura 4.4: Rugosímetro digital.....	53
Figura 4.5: Regiões de medição de rugosidade	53
Figura 4.6: Máquina de medir por coordenadas.	55
Figura 4.7: Secções de Medição	56
Figura 4.8: Pontos de medição.....	56
Figura 4.9: Vetores Normais à superfície.	57
Figura 4.10: Trajetória da ferramenta na operação de desbaste.....	60
Figura 4.11: Etapas para a usinagem do pré-acabamento.....	61
Figura 4.12: Trajetória da ferramenta na operação de acabamento da base (Base para medição).....	61
Figura 4.13: Trajetória da ferramenta na operação de acabamento do topo da lâmina.	62
Figura 4.14: Estratégia de corte com inclinação 45° com movimento de 360°.	63
Figura 4.15: Estratégia de corte com inclinação 45° com movimento de 180°.	64
Figura 4.16: Superfície externa à peça, formato de cilindro.	65
Figura 4.17: Estratégia de corte com inclinação 45° em relação a superfície externa à peça com movimento de 360°.	66
Figura 4.18: Estratégia de corte com inclinação 45° em relação a superfície externa à peça com movimento de 180°.	67
Figura 4.19: Simulação do corpo de prova com máquina-ferramenta virtual.	68
Figura 4.20: Usinagem em resina de poliuretano (pré-testes).....	69
Figura 5.1: Gráfico de comparação de tempos de usinagem	71
Figura 5.2: Gráficos de Interação	77
Figura 5.3: Análise de resíduos.	79

Figura 5.4 Aspecto superficial dos corpos de prova	83
Figura 5.5 Textura da superfície dos corpos de prova, aumento em 10 x.....	84
Figura 5.6: Problema de qualidade superficial.....	86
Figura 5.7: Análise de qualidade superficial.	87
Figura 5.8: Gráfico da média dos erros (RMS).....	91

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Comparativo entre modelagem de sólidos e de superfícies [26].	20
Tabela 2.2 Recursos geométricos contidos nas interfaces normalizadas [28].	22
Tabela 4.1: Características da máquina-ferramenta.	51
Tabela 4.2 Características da ferramenta	52
Tabela 4.3 Características da ferramenta	52
Tabela 5.1 (a), (b), (c) e (d): Valores de rugosidade Ra (μm).	73
Tabela 5.2: Fatores e Níveis.	74
Tabela 5.3: Resumo dos dados obtidos.	74
Tabela 5.4: Média das regiões em cada peça.	74
Tabela 5.5: Desvio Padrão das regiões em cada peça.	75
Tabela 5.6: Média Geral de cada peça.	75
Tabela 5.7: Desvio Padrão Geral de cada peça.	75
Tabela 5.8: Média de cada região medida.	76
Tabela 5.9: Desvio Padrão das regiões medidas.	76
Tabela 5.10: Análise de variância dos níveis.	80
Tabela 5.11: Análise de variabilidade das regiões.	81
Tabela 5.12: Médias Global, Peças e Regiões.	81
Tabela 5.13: Médias da interação entre peça e região.	82
Tabela 5.14: Tabela da ANOVA	89
Tabela 5.15: Porcentagem de variação em relação à variação total	89
Tabela 5.16: Resultados.	90
Tabela 6.1 Resultado Geral.	94

Lista de Siglas

CAD Computer Aided Design

CAM Computer Aided Manufacturing

CC Cutter Contact

CL Cutter Location

NC Numerical Control

CNC Computer Numerical Control

APT Automatically Programmed Tool

NURBS Non Uniform Rational Basis Spline

PAM Principal Axis Method

MPF Machining Potencial Field

HSM High Speed Machine

IGES Initial Graphics Exchange Specification

VDA-FS Verband Der Automobilindustrie-Flächenschnittstelle

STEP STandard for the Exchange of Product model data

Resumo

A crescente demanda de produtos com superfícies complexas ou com formas harmônicas e ergonômicas impõem grandes desafios para as indústrias automobilística, aeronáutica, eletroeletrônicos e de moldes e matrizes, com relação à fabricação de produtos com menor tempo, melhor qualidade e menor custo. A tecnologia de fresamento com 5 eixos é uma das soluções para esse desafio, pois permite a manufatura de peças com geometria complexa em um menor tempo de usinagem, menor custo de processo e melhor qualidade de acabamento. Sua vantagem está na possível otimização do contato entre peça e ferramenta de corte devido a sua maior flexibilidade na usinagem de superfícies complexas em relação ao fresamento com 3 eixos. Visando uma contribuição para a otimização do processo de usinagem, este trabalho tem como objetivo, analisar diferentes estratégias de corte no fresamento com 5 eixos, no qual será avaliado somente as operações de acabamento, etapa crítica do processo de usinagem. A análise foi realizada através dos resultados de comparação dos corpos de prova usinados, levando em consideração o tempo de usinagem associado a cada estratégia, exatidão geométrica, e qualidade superficial de cada peça. Concluiu-se que a escolha da superfície guia da ferramenta, utilizada nas estratégias de corte para a geração da trajetória da ferramenta, foi o fator que apresentou maior influência nos resultados do experimento.

Palavras-chave: Fresamento com 5 eixos, superfícies complexas, estratégias de corte.

Abstract

The increasing demand for products with free form surface or with harmonic and ergonomic shapes, requires high challenges for the automotive, aeronautic, electronic and mould and die industries to related the product manufacturing with a lower time and cost and a better quality. The technology of 5 axis milling is one of the solutions to this challenge because it allows the manufacture of parts with complex geometry in a shorter time of machining, lower cost of process and better quality surface. Its advantage is the possibility of optimization of the contact between the piece and the cutting tool due the better flexibility in machining of free form surfaces in relation to milling with 3 axis. Looking for a contribution to the optimization of the machining process, this research has as objective examine different kinds of cut strategies in milling with 5 axis, which will be evaluated only end-mill operations, critical stage of the process of machining. The analysis was made by results of comparison of machined workpiece of evidence taking into account the machining time associated with each strategy, geometric accuracy and surface quality of each piece. It was concluded that the choice of the guide surface of the tool used in cutting strategies for the tool path generation was the factor that showed a greater influence on the results of the experiment.

Keywords: 5 axis milling, Free form surface, Cut strategy.

1. Introdução

O desenvolvimento da indústria aeronáutica, automotiva, produção de energia, e de moldes e matrizes, trazem um grande desafio tecnológico devido ao crescimento da complexidade das formas geométricas de seus produtos no decorrer dos anos, desafio este que impõe novas maneiras para a fabricação de produtos com formas geométricas complexas.

Dentre os novos desafios e avanços tecnológicos empenhados na fabricação de produtos com geometrias ou formas complexas, encontra-se a tecnologia de fresamento com 5 eixos.

Geralmente, a fabricação de superfícies complexas é realizada através de centros de usinagem CNC com 3 eixos para realização dos movimentos.

Neste processo de fabricação, os tempos de preparação da máquina-ferramenta conhecidos como tempo de *setup* da máquina-ferramenta, e em alguns casos onde as peças possuem mais do que uma face ou lado a ser usinado, muitas vezes implica em atrasos de produtividade e imprecisão da geometria devido a necessidade de preparação da máquina-ferramenta para um novo posicionamento da peça a ser usinada.

Também, deve-se levar em consideração que em alguns casos, peças com superfícies complexas tais como componentes de turbina e peças com faces de inclinação “negativa”, impõem grandes dificuldades para o fresamento de 3 eixos.

A tecnologia de fresamento com 5 eixos visa otimizar os processos de usinagem, pois permite a produção de peças com formas complexas com menor tempo de usinagem, melhor qualidade superficial e maior precisão, devido a capacidade de produzir com um único posicionamento as peças com várias faces usinadas [1].

Suas vantagens abrangem menores tempos de usinagem e conseqüentemente menores custos de fabricação, o que torna essa tecnologia atrativa para os fabricantes da indústria aeronáutica, assim como, para a indústria de moldes e matrizes, pois reduz

várias etapas do processo de fabricação. Em alguns casos, elimina processos de eletroerosão de cantos e raios de pequeno tamanho, devido a acessibilidade que a tecnologia de usinagem com 5 eixos permite.

A partir deste contexto, há a necessidade de maiores conhecimentos dessa tecnologia, portanto, este trabalho tem como objetivo analisar estratégias de corte com o fresamento em 5 eixos, utilizando um corpo de prova com geometria complexa com características específicas para este tipo de usinagem. Ou seja, uma forma geométrica que contém faces com ângulo “negativo” inacessível para usinagem tradicional de 3 eixos.

A análise foi realizada através da comparação dos corpos de prova, e foi concluído que a superfície guia, necessária para a geração da estratégia de corte, proporcionou uma significativa influência nos resultados de tempo de usinagem, qualidade superficial e exatidão geométrica.

Este trabalho possui sete capítulos que serão detalhados a seguir.

Capítulo 1 – Introdução

Capítulo 2 – Cadeia CAD/CAM/CNC – Revisão Bibliográfica sobre a usinagem com tecnologia de fresamento com 5 eixos. Relata de maneira abrangente os principais tópicos que envolvem a cadeia CAD/CAM/CNC deste processo de fabricação.

Capítulo 3 – Proposta do trabalho – Detalhamento dos objetivos do trabalho e dos métodos utilizados para realização dos experimentos de usinagem.

Capítulo 4 – Realização dos ensaios - Descrição dos experimentos, corpo de prova, e medições realizadas, com o intuito de analisar diferentes tipos de estratégias de corte visando buscar um critério para a melhor escolha das mesmas para o modelo geométrico proposto.

Capítulo 5 – Análise dos resultados – Análise dos resultados obtidos com os experimentos de usinagem e medição dos corpos de prova.

Capítulo 6 – Conclusões e sugestões para trabalhos futuros – Conclusões dos resultados obtidos através da análise de tempos de usinagem e medições, e sugestões para futuros trabalhos.

Capítulo 7 - Bibliografia referenciada – Lista de referências bibliográficas utilizadas na realização deste trabalho.

2. Cadeia CAD/CAM/CNC

Este capítulo relata os principais tópicos sobre a usinagem com tecnologia de fresamento com 5 eixos que envolvem a cadeia CAD/CAM/CNC deste processo de fabricação.

Inicialmente este capítulo descreve de maneira geral a tecnologia de fresamento com 5 eixos, suas características e vantagens. Em seguida são descritos os tipos de máquinas-ferramentas com 5 eixos, suas características e aplicações, mostrando a importância do conhecimento prévio do tipo de máquina a ser utilizada na realização da programação NC no fresamento com 5 eixos.

Também, neste capítulo é descrito sobre modelagem de superfícies complexas, mostrando os tipos de modeladores, tipos de modelagem e características que devem ser levadas em consideração, pois influenciam no acabamento da peça usinada. Depois, é descrito sobre a integração CAD/CAM, e trata de alguns fatores que podem influenciar na qualidade do modelo geométrico.

Em seguida, este capítulo trata da geração da trajetória da ferramenta e estratégias de corte no fresamento com 5 eixos, mostrando suas características e influências na programação NC, incluindo a tolerância do sistema CAM e interpolação da trajetória da ferramenta.

Posteriormente, este capítulo trata sobre verificação e simulação da trajetória da ferramenta, mostrando a sua grande importância na usinagem com 5 eixos, seguido do pós-processamento que realiza a transformação do programa NC em linguagem de máquina, mostrando alguns caminhos para a realização dessa tarefa.

2.1 Fresamento 5 eixos

O advento de novas tecnologias e a crescente demanda de produtos ergonômicos, aerodinâmicos ou com formas inovadoras e harmoniosas, tem desafiado as empresas de diversos ramos como a aeronáutica, automobilística, e eletro-eletrônicos, a produzir ferramentas como moldes e matrizes ou peças com formas e superfícies complexas.

Com o intuito de obter vantagem competitiva no mercado, as empresas necessitam atrelar seus processos de desenvolvimento e processos de fabricação de produtos com as regras impostas pelo mercado consumidor, ou seja, menor tempo de desenvolvimento e fabricação dos produtos, atenderem a alta qualidade que é exigida pelos clientes e obter um menor custo de produção. Esses fatores são à base da evolução dos processos de fabricação dentro da indústria.

Dentre os diversos tipos de processos de fabricação encontra-se o processo de usinagem, caracterizado pela retirada de material de uma determinada peça de trabalho (*blank*), onde se inclui o processo de fresamento. No início da utilização desse processo de fabricação, as fresas realizavam os movimentos dos eixos através da intervenção manual do operador, onde era possível, apenas operação simples como furos, rebaixos, rasgos e superfícies planas. Com a necessidade das indústrias em produzir uma maior variedade de produtos em um menor tempo surge, como resposta, a tecnologia CNC em máquinas-ferramentas.

Neste contexto, desenvolveram-se os centros de usinagem convencionais de 3 eixos que apresentam movimentos de translação nos eixos X, Y e Z das coordenadas cartesianas, devido às necessidades específicas de usinagem, surgiram os centros de usinagem de 5 eixos que possuem maior flexibilidade de movimento entre a ferramenta e peça, pois além dos 3 eixos de translação X, Y e Z, ele possui mais 2 eixos de movimentos rotativos que podem estar localizados em torno de quaisquer eixos de translação.

Embora a tecnologia de fresamento com 5 eixos ofereça várias vantagens em relação à usinagem convencional de 3 eixos, no decorrer do processo evolutivo de máquinas-ferramentas, sua aceitação não foi de imediato como esperado, devido a sua complexidade de operação. Com o avanço tecnológico de ferramentas que auxiliam no desenvolvimento de projeto e manufatura, os sistemas CAD/CAM passam a contribuir para a divulgação e adoção desta tecnologia por parte das indústrias fabricantes de moldes e matrizes, aeronáutica, energia e automobilística [2].

A tecnologia de fresamento com 5 eixos permite uma maior liberdade de orientação da ferramenta do que o processo de usinagem 3 eixos, possível pelo fato de dispor de dois eixos rotacionais, o que permite inúmeras vantagens com relação ao processo convencional.

Em um processo de usinagem convencional, de peças contendo múltiplas faces, muitas vezes são necessários vários posicionamentos e fixação da peça na mesa da máquina para a usinagem, isso ocasiona diversos problemas como [3]:

- Maior imprecisão do produto final, devido ao reposicionamento das outras faces a serem usinadas;
- Necessidade em projetar dispositivos de fixação, aumentando o custo do produto final;
- Processo com maior dependência do operador de máquina para reposicionamento e operação da mesma.

No caso do processo de usinagem com máquinas-ferramentas de 5 eixos, primeiramente, pode-se relatar a vantagem da acessibilidade da ferramenta em determinados ângulos negativos e faces da peça, onde a máquina convencional não teria acesso. Isso permite, na maioria das vezes, a usinagem de peças com uma única fixação, implicando em uma considerável redução de tempo e custo de usinagem, além da possibilidade de utilizar ferramentas mais curtas que proporcionam uma maior rigidez do processo e conseqüentemente melhor acabamento da superfície usinada [4, 5, 6].

O processo de usinagem com 5 eixos permite a variação da inclinação da ferramenta em relação à superfície. Sua posição pode ou não ser normal em relação à superfície da peça a ser usinada, possibilitando a otimização no contato da ponta da ferramenta e peça [7, 8].

No caso de fresas com ponta esférica, o centro de sua ponta tem a velocidade de corte zero, acarretando em um acabamento superficial de baixa qualidade, entretanto, com a

inclinação consegue-se excluir eliminar o problema de velocidade de corte zero, possibilitando uma melhor qualidade superficial.

Outra vantagem é a adequação da geometria da ponta da ferramenta à geometria da peça a ser usinada, pois a tecnologia de usinagem com 5 eixos permite a inclinação de ferramentas, tais como uma fresa de topo reto, ou fresa de topo toroidal, que diferentemente de uma fresa de ponta esférica, quando inclinadas, modificam a geometria de contato entre peça e ferramenta.

A consequência deste tipo de estratégia de corte é que ao modificar a geometria de contato de corte, a ferramenta se ajusta melhor à superfície da peça proporcionando um número menor de passes da ferramenta e menor irregularidade do sobremetal (cristas), melhorando a qualidade da superfície para operações de acabamento seguintes e diminuindo o tempo de usinagem.

A inclinação da ferramenta também permite a usinagem de paredes ou superfícies inclinadas com diferentes ângulos usando a lateral da ferramenta.

Portanto, as características da usinagem com 5 eixos, atreladas aos atuais métodos de geração da trajetória da ferramenta, permitem uma significativa redução de tempo de usinagem [9, 10], chegando a alguns casos uma redução a cerca de 85% com relação à usinagem com tecnologia 3 eixos [11].

A usinagem de peças com 5 eixos é complexa, e por isso todo o processo de usinagem deve ser levado em consideração, desde a modelagem de superfícies ou formas complexas do produto em sistemas CAD que podem influenciar na geração da trajetória da ferramenta, até a programação em sistemas CAM que depende do conhecimento e interação do programador que deve possuir o pleno conhecimento da máquina-ferramenta a ser utilizada, tal como sua estrutura, dispositivos de fixação e limites de movimento [9, 12, 13].

Outro fator a ser considerado é o custo, que envolve a aquisição de softwares específicos como os sistemas citados, custo da máquina ferramenta e o custo de manutenção das mesmas, além da maior qualificação de programadores e operadores.

Com a complexidade de programação ocasionada pelos fatores citados, o processo de usinagem com máquinas de 5 eixos requer maior cuidado com relação à verificação da trajetória da ferramenta, pois erros na programação podem ocasionar colisões entre peça, ferramenta, dispositivos de fixação e máquina ferramenta.

A Figura 2.1, representa o fluxo para a programação NC (*Numerical Control*) para usinagem com máquinas-ferramentas de 5 eixos:

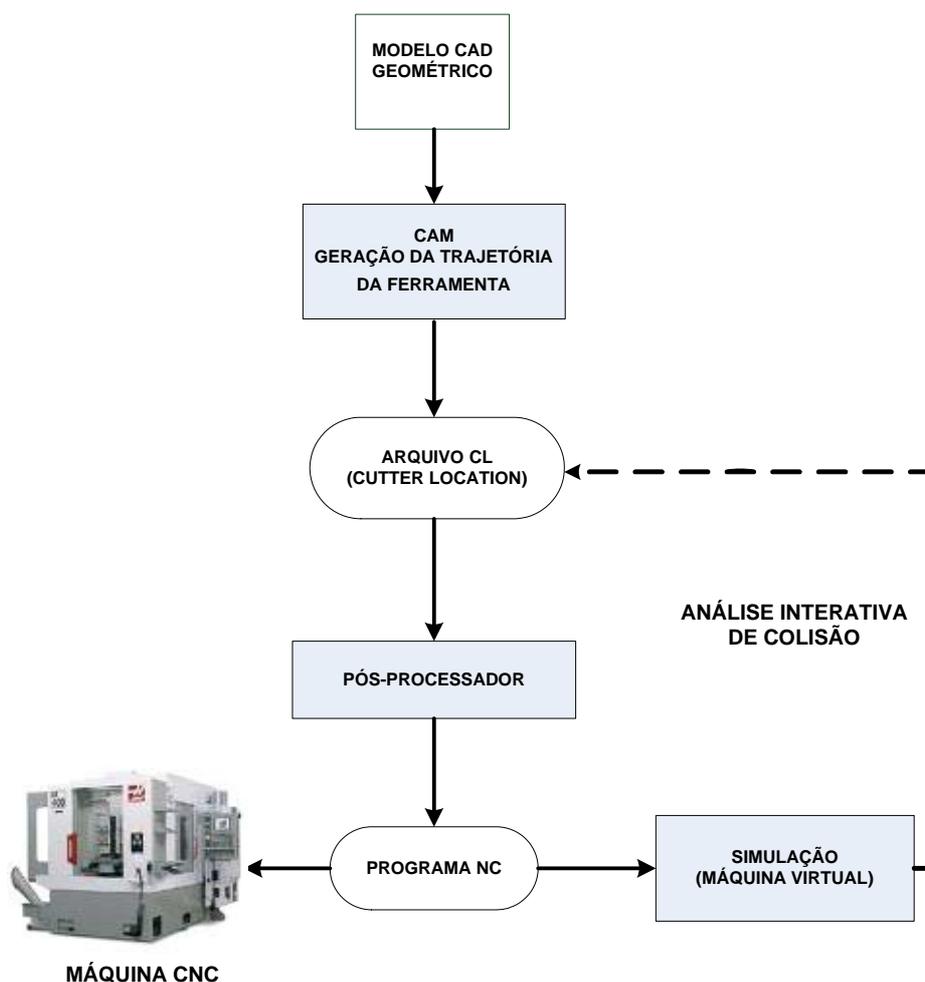


Figura 2.1: Etapas da programação NC [14].

Como mostra a Figura 2.1, o primeiro passo para o processo de usinagem de superfícies e formas complexas é a modelagem da geometria em um sistema CAD. Após a modelagem, o programador usa a geometria modelada em um sistema CAM, que define as operações de usinagem, posteriormente gerando o programa NC. Feito

isso, o programa pode ser analisado através da simulação de usinagem em uma máquina-ferramenta virtual, ou transferido para a máquina-ferramenta onde a usinagem ocorre através da execução do programa NC.

No Processo de programação do sistema CAM estão incluídas as etapas:

- Geração da trajetória da ferramenta, onde são estipulados os tipos de ferramentas a serem utilizadas, os métodos e as estratégias de corte, o tipo de interpolação e a própria geração da trajetória da ferramenta, que também deve levar em consideração o sistema de fixação da peça;
- Verificação e simulação da trajetória da ferramenta, que leva em consideração apenas o movimento entre a ferramenta e peça a ser usinada. Já a simulação considera todo o volume de trabalho que inclui a máquina-ferramenta, dispositivos de fixação e refrigeração, peça e ferramentas. Esta etapa é necessária para validar os programas garantindo a segurança do processo de usinagem;
- Pós-processamento, que é responsável por traduzir as instruções geradas pelo sistema CAM (trajetória da ferramenta) em instruções específicas requeridas pela máquina-ferramenta CNC.

A seguir, serão demonstrados os principais tipos e características de máquinas-ferramentas com 5 eixos, abordando estruturas de máquinas, posicionamento e funcionamento dos eixos, onde será feita uma abordagem sobre as vantagens e desvantagens desse processo.

2.2 Tipos de máquinas-ferramentas com 5 eixos.

As máquinas-ferramentas de 5 eixos possuem 3 eixos de translação que estão relacionados por coordenadas cartesianas X, Y e Z, e dois eixos rotacionais que podem estar localizados no cabeçote ou na mesa da máquina-ferramenta. Os eixos rotacionais estão ligados ao tipo de estrutura da máquina-ferramenta, as máquinas podem conter os pares de eixos A e B, A e C ou B e C.

A Figura 2.2, demonstra a posição de cada eixo e seus respectivos movimentos de atuação na máquina-ferramenta.

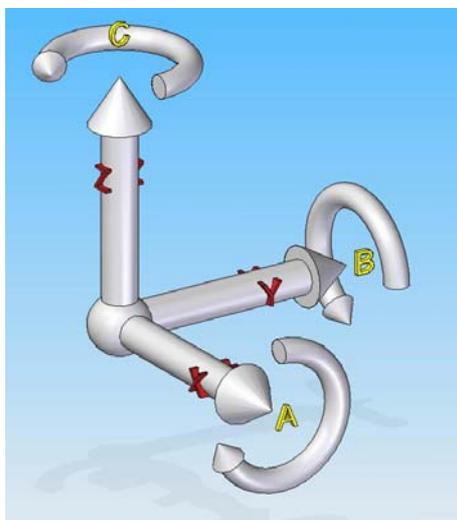


Figura 2.2: Posição dos eixos de translação e rotação.

De acordo com as inúmeras possibilidades de combinações entre os eixos de atuação linear X, Y e Z e os eixos de atuação rotacional A, B e C, na literatura são encontrados 3 principais tipos de centros de usinagem com 5 eixos representados pela Figura 2.3 [15, 16, 17]:

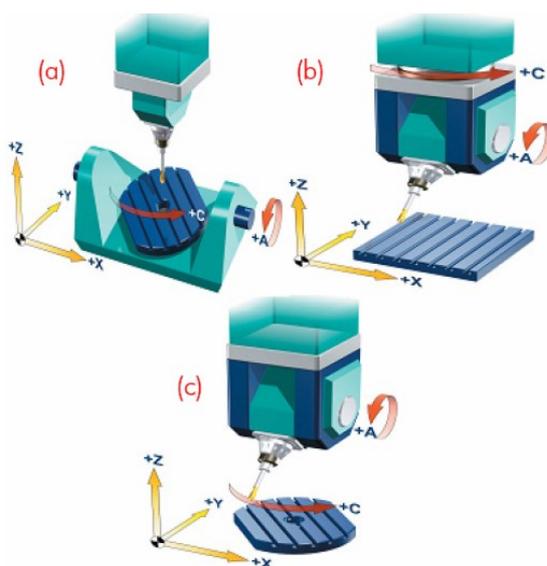


Figura 2.3: Principais tipos de máquinas-ferramenta de 5 eixos [18].

Características:

Tipo (a): Máquina-ferramenta com movimentos lineares em X, Y e Z localizados no cabeçote e movimentos rotacionais em A e C localizados na mesa.

Tipo (b): Máquina-ferramenta com movimentos lineares em X, Y e Z e movimentos rotacionais em A e B localizados no cabeçote.

Tipo (c): Máquina-ferramenta com movimentos lineares em X, Y e Z e um movimento rotacional em B localizados no cabeçote além de um movimento rotacional em A localizado na mesa.

A máquina do tipo (a) é a mais conhecida, por permitir que este tipo de configuração seja aplicado em máquinas convencionais. Ou seja, pode-se adaptar eixos rotativos na mesa de uma máquina convencional e transformá-la em uma máquina com 5 eixos com as características do tipo (a). A vantagem deste tipo de máquina é que as cargas impostas sobre fuso são menores em relação a outros tipos de máquinas. Outra vantagem é a maior precisão na usinagem de contorno de formas circulares quando utilizado o eixo de rotação C [17]. Porém, peças grandes e pesadas não são adequadas a esse tipo de máquina, pois para a movimentação dos eixos rotacionais a máquina necessitará de grande torque, o que implica em um baixo desempenho de usinagem.

A máquina do tipo (b) é recomendada para peças grandes e pesadas, pois o cabeçote que contém todos os eixos se movimenta em torno da peça, porém o cabeçote possui menor rigidez devido aos eixos rotacionais localizados no mesmo [17]. Este tipo de máquina também pode ser encontrado no mercado com estrutura do tipo pórtico, conforme mostra a Figura 2.4.



Figura 2.4: Máquina-ferramenta com 5 eixos do tipo pórtico [19].

A máquina do tipo (c) é pouco difundida. Ela possui um eixo de rotação localizado no cabeçote (eixo B), e outro em sua mesa (eixo A). Ela pode ser utilizada em várias aplicações de usinagem e, em alguns casos, há variação de configuração da estrutura da máquina, fazendo com que o eixo C possa estar localizado na mesa da máquina. Esse tipo de configuração é considerado por estar mais adequado para usinagem de peças cilíndricas e que possuem furos ou rebaixos em torno de sua periferia [17].

A Figura 2.5 mostra um exemplo deste tipo de máquina-ferramenta.



Figura 2.5: Exemplo de máquina-ferramenta com eixo C localizado na mesa [20].

O conhecimento da configuração estrutural da máquina-ferramenta a ser utilizada na usinagem é um fator importante para a realização da programação NC. É apenas mais

um dos parâmetros a ser considerado na usinagem com tecnologia 5 eixos, dentre os quais serão detalhados a seguir.

Neste trabalho, foi utilizada uma máquina-ferramenta do tipo (a), devido a sua disponibilidade e suas características para a realização deste trabalho.

2.3 Modelagem de superfícies complexas

Nos processos de fabricação que envolve o ciclo CAD/CAM/CNC iniciam-se com o desenvolvimento de um modelo tridimensional da peça ou produto através de um sistema CAD. O desenvolvimento do modelo geométrico pode ser gerado internamente em um sistema CAD, através de seus elementos geométricos e recursos, ou através da importação de dados provenientes de sistemas externos tais como, por exemplo, uma nuvem de pontos baseada em um modelo geométrico através dos resultados de uma medição por coordenadas. [21].

Para garantir a fidelidade do produto ou peça, e suas respectivas características, os sistemas CAD possuem inúmeras ferramentas para o modelamento tridimensional.

De acordo com as ferramentas e seus recursos os sistemas CAD podem ser classificados em dois tipos:

- Modeladores de Sólidos;
- Modeladores de Superfícies.

Ambos os modeladores permitem a aplicação de análises através do método de elementos finitos, que para a indústria é de essencial importância para cálculos e fabricação de produtos [21, 22].

Basicamente, os sistemas CAD que utilizam recursos de modelagem sólida, permitem a criação de modelos geométricos tridimensionais através de recursos de extrusão e de revolução de um perfil em torno de um eixo estipulado.

A Figura 2.6, mostra alguns objetos construídos a partir dos recursos citados.

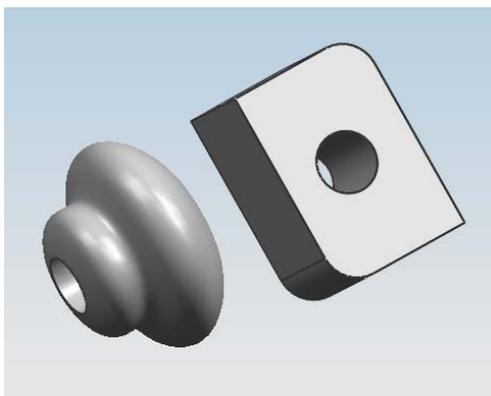


Figura 2.6: Sólido de revolução (esquerda) e sólido de extrusão (direita).

A Figura 2.7 demonstra uma geometria sólida gerada através do recurso de revolução de um perfil definido torno de um eixo estipulado, onde o perfil foi gerado através de elementos geométricos distintos tais como retas e arcos. Segundo Silva [12], isso ocasiona a descontinuidade da superfície do sólido de revolução, o que pode ser um problema para a usinagem através de fresamento com tecnologia de 5 eixos, devido a forma como é realizada a geração da trajetória da ferramenta em um sistema CAM para determinadas estratégias de corte realizadas neste tipo de fresamento.

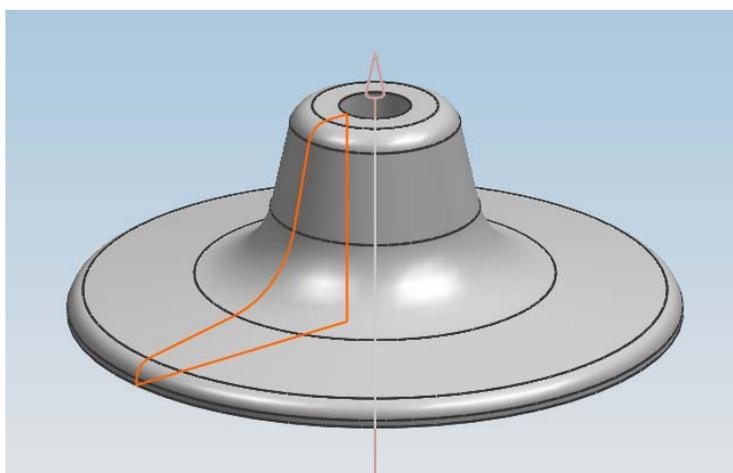


Figura 2.7: Sólido de revolução com descontinuidades na superfície.

Outra solução seria a utilização de sistemas CAD com modeladores de superfícies, pois possui maior flexibilidade para a modelagem de modelos complexos e contínuos.

Nesse tipo de sistema CAD, a geometria é representada por uma superfície, da qual pode ser gerada por uma simples entidade geométrica como reta e ou arco, como por curvas representadas por modelos matemáticos complexos. Os sistemas CAD com modeladores de superfície possuem sofisticados recursos de manipulação de superfície, que permite ao projetista modificar o formato e curvatura da mesma de forma a obter a geometria desejada para o produto.

A Figura 2.8 mostra a manipulação de uma superfície através da movimentação dos pontos do polígono de controle da superfície.

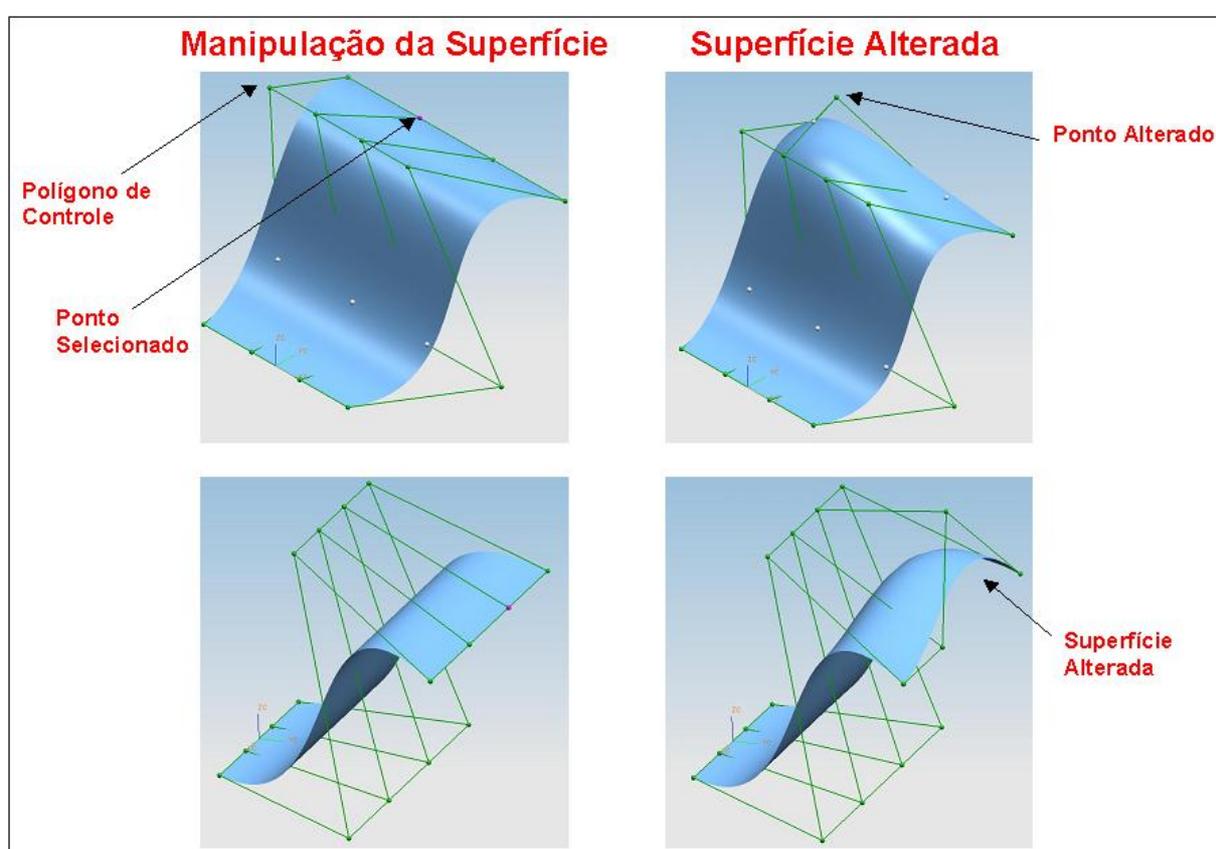


Figura 2.8: Manipulação de superfícies.

Devido a necessidade de representações de formas geométricas complexas, foi necessária a utilização de curvas para o modelamento dessas geometrias dentro do sistema CAD. Essa tecnologia teve seu início em 1972 com o francês Paul Bézier, o qual empregou curvas que representavam o modelo matemático desenvolvido por ele,

em um sistema CAD chamado *Unisurf*, essas curvas foram utilizadas para o modelamento de um componente automotivo que possuía uma geometria complexa, este componente era fabricado pela empresa onde trabalhava [21, 23].

Desde então, com a origem do modelo inicial de Bézier, surgiram novos modelos matemáticos como o B-Spline (Basis-Spline) e outro modelo matemático mais recente chamado NURBS (Non-Uniform Rational Basis-Spline), onde suas características permitem ao projetista uma melhor manipulação da superfície complexa, e conseqüente melhora na representação geométrica de produtos.

A Figura 2.9 mostra modelo de curva polinomial proposto por Bézier, o seu grau polinomial é controlado pelo número de pontos do polígono de controle menos 1, a demonstração matemática da curva pode ser encontrada na literatura [21-25].

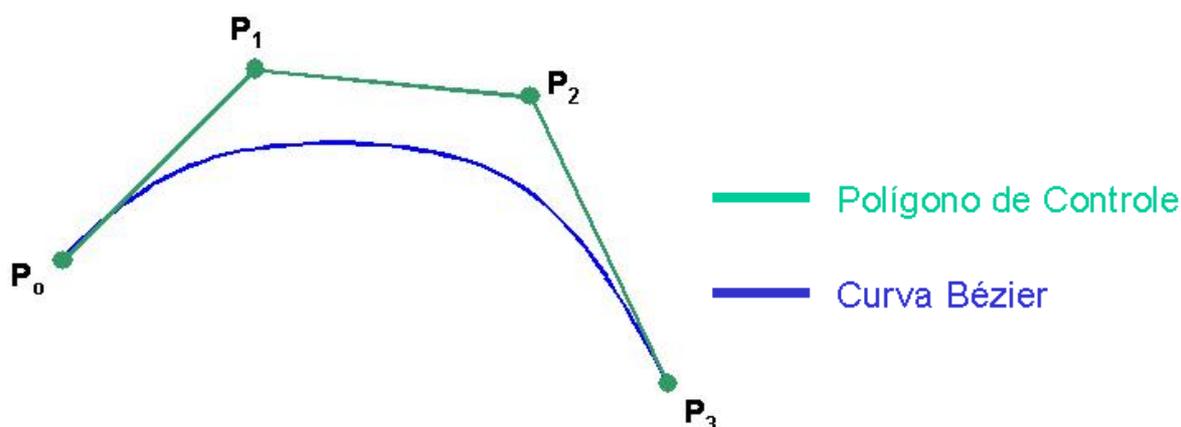


Figura 2.9: Exemplo da curva de Bézier.

De acordo com o grau do polinômio, a exigência de cálculos computacionais complexos deve ser levada em consideração, pois quanto maior o grau, maior a exigência de capacidade para o computador, e, portanto, maiores serão as dificuldades de seu uso em um ambiente industrial.

A curva polinomial de Bézier, em relação ao seu polígono de controle, tem como característica passar pelo primeiro e último ponto do seu polígono de controle e ser tangente em relação aos vetores formados pelos segmentos de reta P_0P_1 e $P_{n-1}P_n$ [21, 24, 25]. Esta curva tem como característica a mudança “global” da curva, ou seja, ao

mover o ponto do polígono de controle, a curva inteira sofre modificação em sua forma. A Figura 2.10 mostra um exemplo de modificação dos pontos do polígono de controle e conseqüente mudança “global” na curva de Bézier.

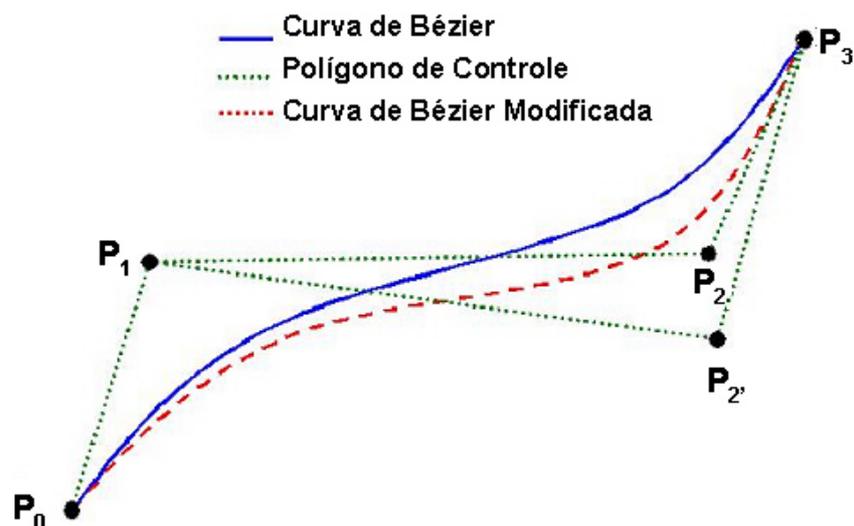


Figura 2.10 Exemplo de modificação “global” da curva de Bézier.

A curva B-Spline (Basis-Spline) possui modelo de curva semelhante ao modelo de curva proposto inicialmente por Bézier, onde também utiliza um polígono de controle e uma curva polinomial que interpola. Porém, este modelo de curva possui algumas características diferenciadas do modelo de curva original de Bézier, permitindo um maior controle sobre as modificações da curva [21, 24, 25].

A Figura 2.11 mostra a modificação de uma curva do tipo B-Spline .

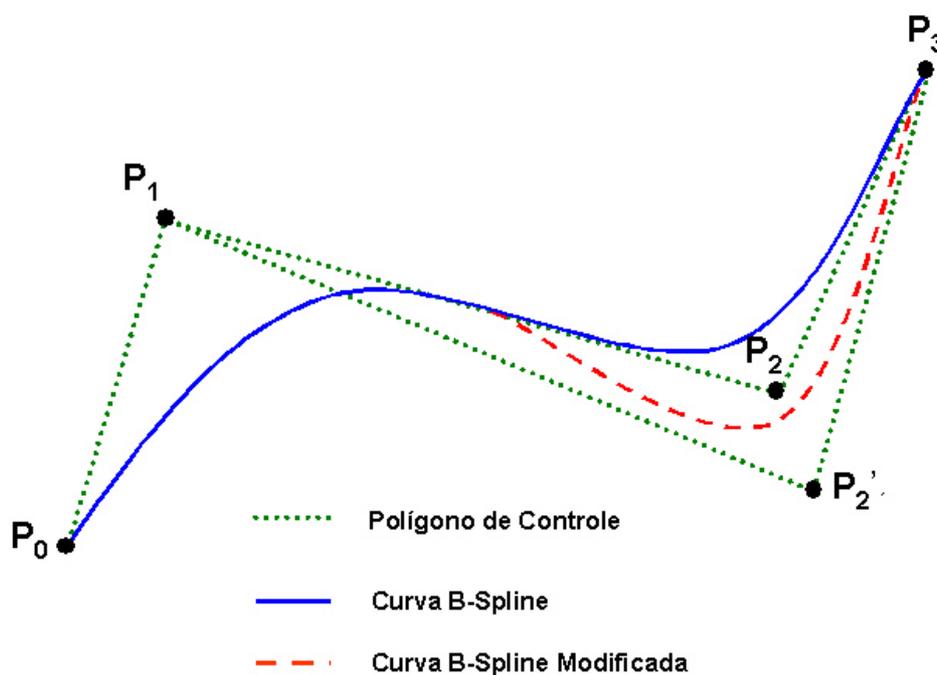


Figura 2.11: Exemplo de modificação da curva B-Spline.

A modificação da curva original de Bézier, conforme a Figura 2.10, mostra que ao modificar a posição de um único ponto do polígono de controle, toda a curva sofre alterações em sua forma (mudança “global”), porém, na curva do tipo *B-Spline*, quando modificada a posição do ponto do polígono de controle P_2 , como mostrado na Figura 2.11, a curva sofre apenas alteração local em relação ao ponto do polígono de controle reposicionado. Essa característica permite ao projetista um maior controle de manipulação da curva para melhor adequação das formas requeridas no produto a ser modelado em um sistema CAD.

Outro modelo de curva, que pode ser considerado como a evolução do modelo de curva *B-Spline*, chama-se *NURBS*. Sua concepção permite que os vértices do polígono de controle modifiquem a curva de forma não uniforme, por isso o nome *Non-Uniform*. Esse modelo de curva permite determinar a intensidade que cada ponto do polígono de controle atua na formação da curva, ou seja, cada ponto do polígono de controle, de

acordo com sua intensidade estipulada, determina a maior ou menor aproximação da curva em relação ao polígono de controle.

A Figura 2.12 mostra as modificações de intensidade dos pontos do polígono de controle, essa intensidade também é conhecida como atribuição de peso no ponto do polígono de controle, demonstrando a atuação dessa característica no modelo de curva *NURBS*:

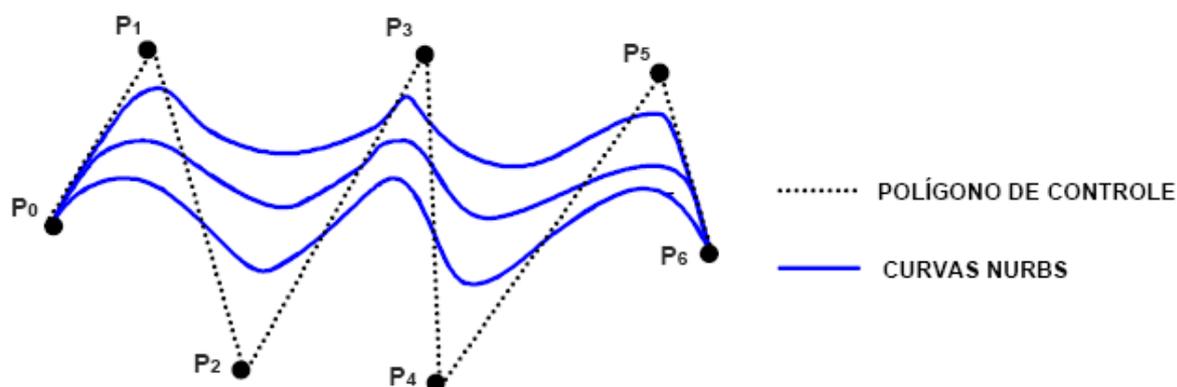


Figura 2.12: Exemplos de curvas *NURBS* [21].

A característica do modelo de curva *NURBS*, permite ao projetista, adequar a melhor forma da curva ou superfície para a modelagem de produtos, pois o controle de curvatura é realizado através da posição e intensidade (peso) de cada ponto do polígono de controle, permitindo ao projetista manipulação total da curva.

Em virtude dessas características especiais que o modelo matemático *NURBS* possui, estudos voltados para a geração da trajetória da ferramenta visam utilizar o modelo em questão como método de interpolação da trajetória da ferramenta para a otimização do processo de usinagem de superfícies complexas.

Neste trabalho, a geometria da peça a ser usinada é um modelo sólido e não possui descontinuidade, isso facilitou a geração da trajetória da ferramenta.

Cada tipo de modelador de sistemas CAD possui características específicas, a Tabela 2.1 mostra um comparativo entre as vantagens da modelagem de superfícies complexas e modelagem de sólidos [26].

Tabela 2.1 Comparativo entre modelagem de sólidos e de superfícies [26].

Modelagem de Sólidos	Modelagem de Superfícies
Fácil de aprender e usar.	Complexidade em aprender e usar.
Dificuldade em criação de modelos complexos	Maior flexibilidade na criação de modelos complexos
Capacidade de parametrização e associatividade de modelos geométricos.	Capacidade de associatividade e de modelagem interativa.
Rápida criação de conjuntos montados.	Rápida criação de modelos complexos.
Excelente para a criação de modelos funcionais.	Excelente para a criação de modelos ergonômicos, estéticos ou de forma complexa.

Outro fator de grande importância é a qualidade da superfície do modelo geométrico CAD que pode influenciar nos resultados de acabamento da peça usinada [9.12]. Ao gerar a trajetória da ferramenta através do sistema CAM, a superfície do modelo geométrico é utilizada para os cálculos, isso influencia na orientação da posição ferramenta e pode acarretar em melhora ou piora da qualidade da superfície usinada. A geração da trajetória da ferramenta será abordada no tópico 2.5.

2.4 Integração CAD/CAM

Após a criação de um modelo tridimensional de uma forma geométrica complexa em um sistema CAD, é necessário realizar a transferência desse modelo geométrico para um sistema CAM, onde será realizada a programação NC para, posteriormente, ser transferida ao comando numérico da máquina-ferramenta CNC, onde será produzida.

Quando o modelador geométrico dos sistemas CAD e CAM são o mesmo, a transferência do modelo é realizada de forma direta, sem a necessidade de uma interface que faça a integração entre os mesmos, isso ocorre quando os sistemas CAD/CAM são do mesmo fabricante.

Outra vantagem de possuir sistemas CAD e CAM do mesmo fabricante é o recurso de associatividade, que permite uma integração entre os sistemas, onde qualquer alteração que haja no modelo geométrico dentro do sistema CAD, automaticamente o

sistema CAM reconhece e atualiza a alteração realizada. Isso permite que as áreas de projeto e manufatura dentro de uma empresa, realizem as etapas de projeto e produção de forma simultânea, eliminando o retrabalho do programador NC, caso o modelo geométrico sofra alterações.

Quando as empresas não possuem softwares de sistema CAD e CAM de mesmo fabricante, devido a grande variedade de fabricantes de software, é necessário a utilização de uma interface que realize a transferência do modelo geométrico entre os sistemas CAD e CAM.

Os sistemas CAD e CAM, produzidos por diferentes fabricantes de software, devem possuir o mesmo tipo de interface de transferência para que possa ocorrer a transferência de informações como o modelo geométrico.

A interface de transferência é responsável por converter o modelo geométrico tridimensional original de um sistema CAD específico em um formato neutro, ou seja, em um formato aberto a todos os sistemas CAD e CAM, desde que os mesmos possuam o mesmo tipo de interface de transferência como citado anteriormente. Essa conversão ocorre através dos cálculos internos da interface de transferência utilizando seus próprios recursos geométricos para a transformação do modelo geométrico original em um modelo geométrico de formato neutro.

Dentre as opções de interfaces de transferência do modelo geométrico, algumas opções freqüentemente utilizadas tais como: IGES, STEP e VDAFS, entre outras, possuem diferentes recursos geométricos para a conversão de dados do modelo tridimensional em um formato neutro para que os diversos sistemas CAD e CAM possam ter acesso.

Alguns problemas com qualidade e precisão geométrica podem ocorrer durante a conversão do modelo geométrico gerado em um sistema CAD específico para modelo geométrico de formato neutro, pois se o modelo geométrico original conter elementos geométricos que não fazem parte dos recursos geométricos disponíveis na interface de transferência escolhida, o mesmo será eliminado ou substituído por outro elemento

geométrico[27]. Esse problemas de qualidade e precisão advindos do formato neutro podem acarretar em má geração da trajetória da ferramenta e possíveis colisões da máquina-ferramenta.

A escolha da interface de transferência é um fator importante para garantir a qualidade e precisão do modelo geométrico a ser transferido e evitar futuros problemas de geração da trajetória da ferramenta em um sistema CAM.

A tabela 2.2, mostra uma comparação entre três tipos de interface de transferência que convertem modelos geométricos gerados em um sistema CAD específicos em um modelo geométrico de formato neutro.

Tabela 2.2 Recursos geométricos contidos nas interfaces normalizadas [28].

Tipo de Elemento	VDAFS	IGES	STEP
Ponto	X	X	X
Vetor	X		X
Reta	U	X	X
Arco de Círculo	X	X	X
Curva de secção cônica		X	X
Curva Polinomial	X	U	X
Curva B-Spline		U	X
Curva Nurbs		X	X
Plano	U	X	X
Cilindro		X	X
Cone		X	X
Esfera		X	X
Elipsoide		X	X
Superfície anelar		X	X
Superfície Polinomial	X	E	X
Superfície B-Spline		U	X
Superfície Nurbs		X	X
Curva em superfície polinomial	X	U	X
Superfície de Regulagem	E	X	X
Superfície polinomial limitada	X	U	X
Sólidos		E	X

(X=contém; E=limitado; U=contido como sub-elemento)

Como demonstrado na tabela 2.2, a interface de transferência que apresenta maior quantidade de recursos geométricos é a do tipo STEP definida nas normas ISO 10303 [27], e que, portanto, é a que realiza a conversão do modelo geométrico original em formato neutro com melhor qualidade e precisão.

Neste trabalho, o arquivo do modelo geométrico utilizado era de formato neutro com interface STEP, esse modelo geométrico foi posteriormente modificado e salvo como arquivo nativo.

Para a exportação do modelo geométrico para a máquina de medir por coordenadas, também foi utilizado a interface STEP para evitar possíveis erros na medição das peças.

2.5 Geração da trajetória para fresamento com 5 eixos

A programação CAM para a usinagem de superfícies complexas utilizando máquinas-ferramentas com 5 eixos é considerado o ponto crítico deste processo. Os sistemas CAM atuais, em geral, são inflexíveis e dependentes da interação do homem [29].

A trajetória da ferramenta para o fresamento com 5 eixos deve conter os dados a respeito do caminho a ser seguido pela ferramenta, semelhante ao fresamento com 3 eixos, e também da inclinação ou comportamento do eixo da ferramenta, além de que esta trajetória deve estar isenta de interferências de corte e de colisões.

A colisão, é o choque entre ferramenta, peça, dispositivo de fixação ou algum componente da máquina ferramenta.

A interferência de corte é o pequeno contato indesejado entre a ferramenta e peça e que viola a geometria da peça. Esta por sua vez pode ser de dois tipos, local e traseira.

A interferência local é aquela provocada pela parte da frente da ferramenta quando está avançando, e a interferência traseira, como o próprio nome diz, causada pela parte de trás da ferramenta quando a mesma avança, como mostra a Figura 2.13.

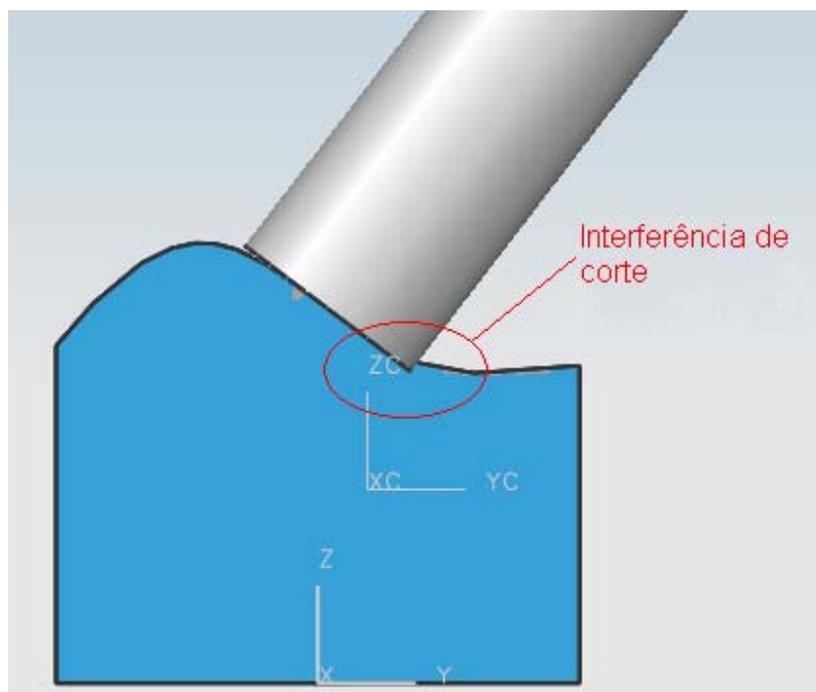


Figura 2.13: Exemplo de interferência de corte.

O caminho da ferramenta deve ser gerado de forma que a ferramenta retire com eficiência a maior quantidade de material possível, respeitando a geometria da peça e os limites da máquina ferramenta para que não haja colisão.

A geração da trajetória da ferramenta com tecnologia de fresamento com 5 eixos compreende primeiramente a definição dos pontos de contato da ferramenta conhecidos como CC (*Cutter Contact*) que, posteriormente, são transformados em pontos de localização da ferramenta conhecidos com CL (*Cutter Location*). A base de cálculo para os pontos CL é o centro da ferramenta, portanto, o cálculo dos pontos CL indicam o sentido, direção e distribuição (passo lateral da ferramenta) da trajetória da ferramenta em relação a superfície da peça a ser usinada. Além da orientação do trajeto da ferramenta, é também necessário a orientação da inclinação do eixo da ferramenta em relação a superfície da peça a ser usinada.

Na literatura, para a definição dos pontos CC e CL, são encontrados os principais métodos de geração da trajetória da ferramenta utilizados na programação NC para

usinagem com tecnologia de 3 eixos, assim como para usinagem com tecnologia de 5 eixos.

São basicamente os três métodos:

- Isoparamétrico [29-32];
- Isoplanar ou Cartesiano [29, 30, 32, 33, 37];
- APT - (*Automatically Programmed Tool*) [24, 29, 30,].

O método isoparamétrico tem como base para a geração da trajetória da ferramenta as curvas u e v , conforme apresentado na Figura 2.14, da superfície a ser usinada, sua vantagem está na simplicidade de como os pontos CL são calculados.

Dependendo da superfície, este método pode gerar trajetórias redundantes devido ao caminho da ferramenta ser baseado nas curvas da superfície. Portanto, o espaçamento ou passo lateral da trajetória da ferramenta se torna maior ou menor de acordo com a intensidade da curvatura utilizada na construção da superfície a ser usinada [31].

Trajétória redundante é a trajetória da ferramenta que se encontram próximas umas das outras, tornando-as ineficientes em relação a retirada de material por passo lateral. A Figura 2.14 mostra um exemplo de geração da trajetória redundante através o método isoparamétrico.

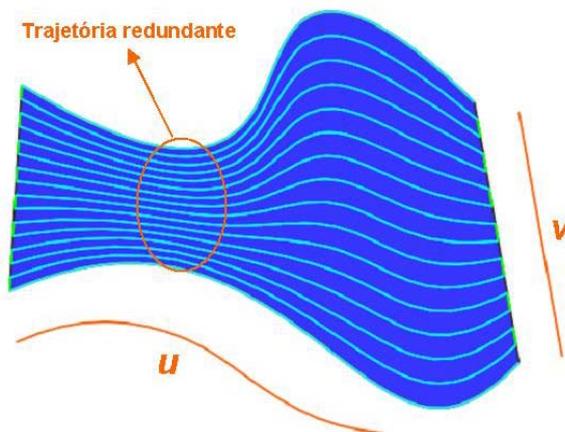


Figura 2.14: Trajetória da ferramenta através do método isoparamétrico.

O fato é que esse método é dependente do modo pelo qual foi construída a superfície a ser usinada [35]. Quando uma superfície é modelada, ela está sujeita a diversos tipos de manipulação como operações de corte (*trimming*) e ou extensão (*extending*). Esse tipo de operação implica muitas vezes em curvas não concordantes, o que pode ocasionar problemas de descontinuidade da trajetória da ferramenta que podem ser melhorado caso o sistema CAM possua algoritmos de suavização da trajetória da ferramenta.

O outro método de geração da trajetória da ferramenta é o método isoplanar ou cartesiano. Ele é semelhante ao método isoparamétrico le gera o caminho da ferramenta através de um plano guia em relação a superfície a ser usinada, onde a posição da ferramenta é projetada sobre a superfície como mostra a Figura 2.15:

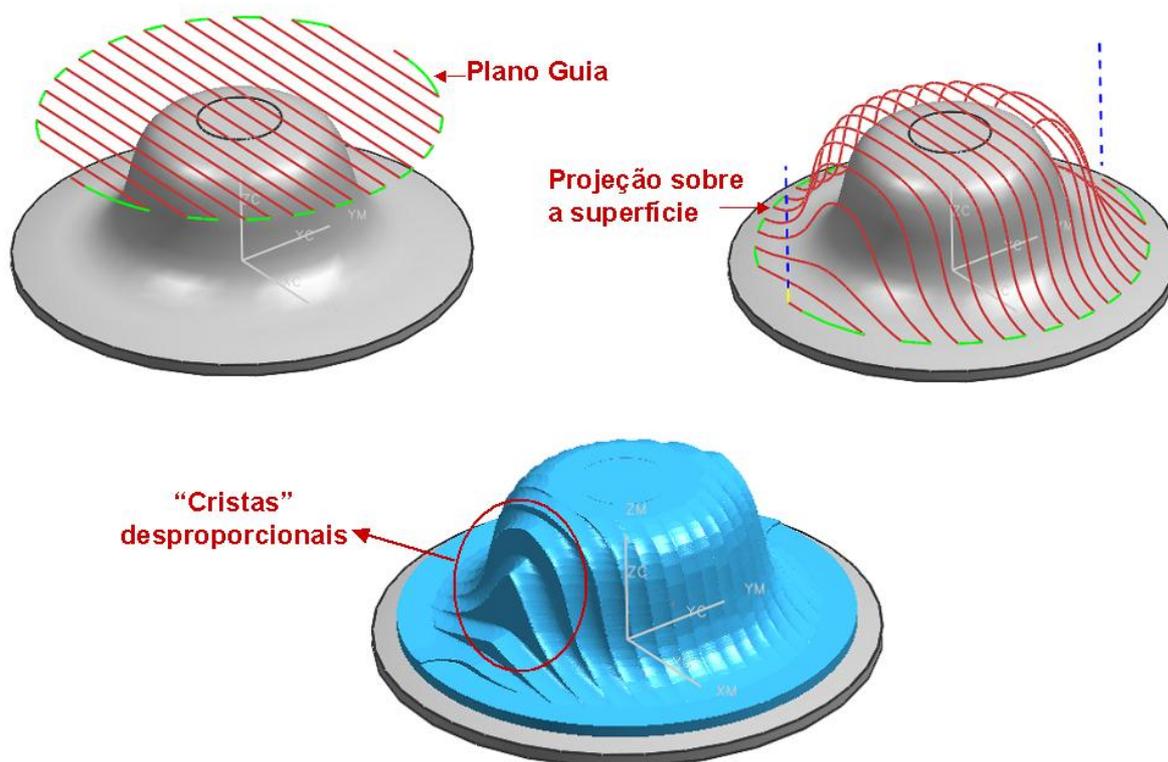


Figura 2.15: Método isoplanar .

A vantagem deste tipo de método em relação ao método isoparamétrico, é que ele previne automaticamente a geração da trajetória redundante da ferramenta quando aplicado em uma superfície complexa. No entanto, sua desvantagem está no espaçamento ou passo lateral referente a superfícies muito inclinadas, ocasionando “cristas” desproporcionais de sobremetal como mostra a Figura 2.15. [30].

O método APT gera o caminho da ferramenta através da intersecção entre superfícies, ou seja, além da superfície a ser usinada que é chamada de *part-surface*, Uma outra superfície chamada de *drive-surface* determina a direção e sentido do caminho que a ferramenta deve percorrer, o cálculo do ponto CL é definido pela intersecção de ambas as superfícies, como mostra a Figura 2.16 [32].

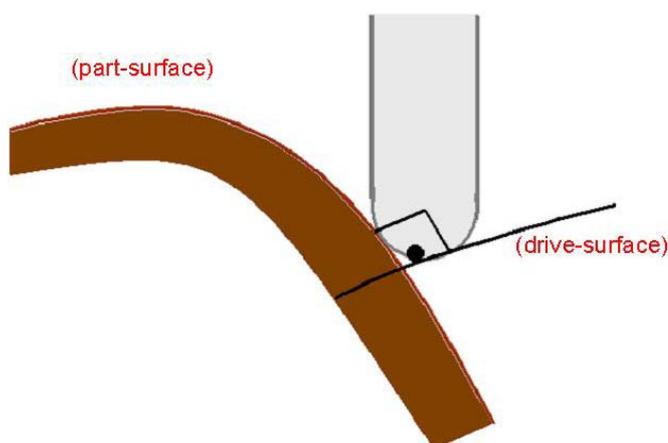


Figura 2.16: Intersecção de superfícies, Método APT.

Há uma terceira superfície chamada *check-surface*, ela é responsável pelo limite que o caminho da ferramenta pode alcançar em relação a superfície a ser usinada.

A Figura 2.17 mostra a essa terceira superfície chamada *check-surface*, em que ω representa o passo lateral da ferramenta (*stepover*), e λ representa o limite estipulado para a geração da trajetória da ferramenta.

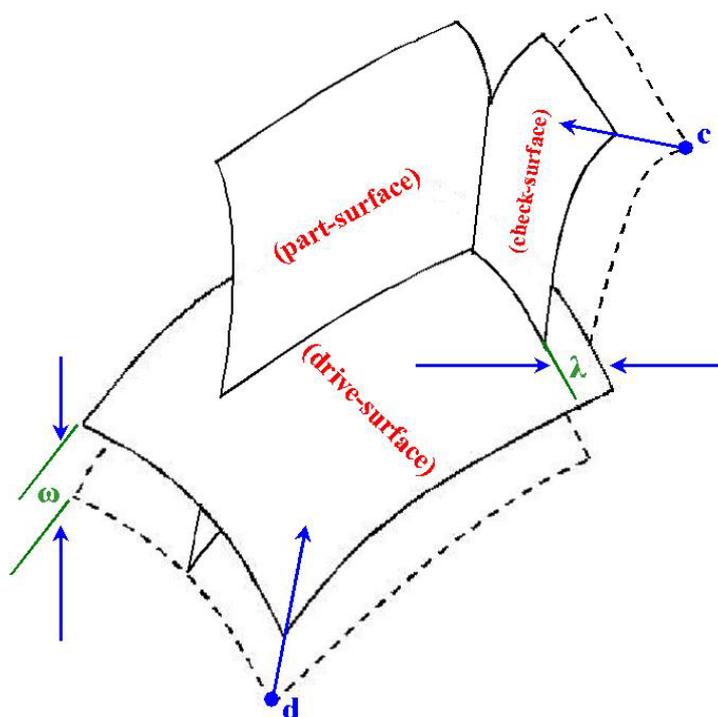


Figura 2.17: Método APT.

2.6 Estratégias de corte para 5 eixos

A geração da trajetória da ferramenta para o fresamento com 5 eixos está relacionada com a inclinação do eixo da ferramenta. No fresamento com 3 eixos basta apenas o cálculo dos pontos de localização CL da ferramenta como visto anteriormente.

2.6.1 Ferramenta Inclinada (*Sturz*)

Um dos métodos para a orientação dos eixos da ferramenta é o método *Sturz* ou método da ferramenta inclinada [8, 36, 38].

Este método consiste na inclinação constante em relação ao vetor normal local da superfície a ser usinada. A inclinação do eixo da ferramenta pode ser definida por dois ângulos; o primeiro é o ângulo de inclinação lateral conhecido como *Tilt*. Considerando o vetor normal como inclinação zero, a ferramenta pode variar para positivo caso incline para à esquerda em relação ao avanço da ferramenta, e negativo para à esquerda, como mostra a Figura:

O segundo ângulo que pode ser ajustado na direção de avanço da ferramenta, recebe o nome de *Lead* quando positivo, e *Lag* quando negativo, como mostra a Figura 2.18.

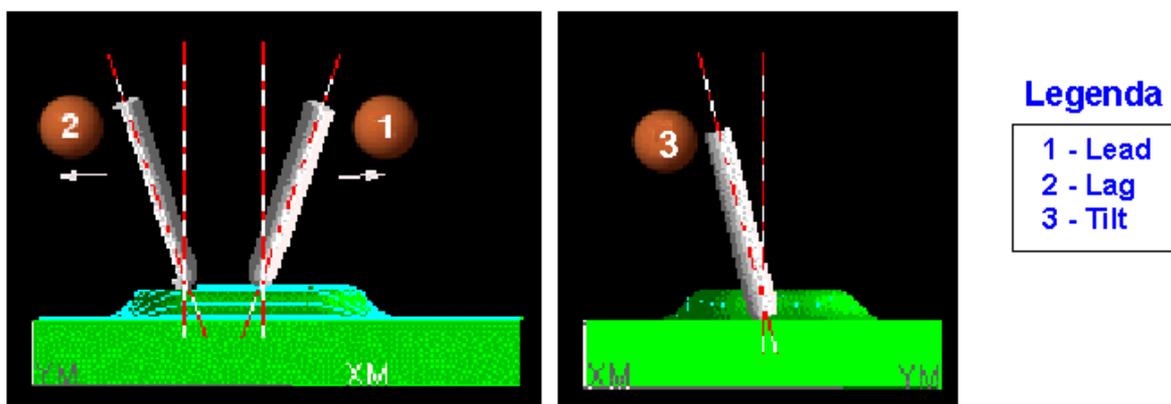


Figura 2.18: Orientação dos eixos (método Sturz).

Existe uma grande dificuldade na utilização desse método com ferramentas de topo reto ou toroidal, apesar de possuir vantagens como uma significativa redução de tempo de usinagem em relação a usinagem convencional de 3 eixos. Ele é um método de experimentação de combinações de ângulos até encontrar a melhor posição para uma geometria de corte adequada entre a peça e ferramenta. Se a ferramenta estiver com um ângulo de inclinação pequeno, há um grande risco de interferência de corte. Se o ângulo da ferramenta for maior, as cristas geradas pelo fresamento podem se tornar maiores. Portanto, o processo se torna muito dependente do programador pois é necessária a verificação e simulação do caminho da ferramenta para a geração satisfatória dessa estratégia de corte.

2.6.2 Multiponto

Outro método, conhecido como Multiponto [8, 39, 40], consiste na orientação do eixo da ferramenta de forma que a ponta da ferramenta tenha dois pontos de contato de corte simultaneamente sobre a superfície a ser usinada. Este método utiliza somente ferramentas de topo ou ferramentas de topo com raio (toroidal), pois as ferramentas de ponta esférica não modificam a geometria de corte de acordo com a maior ou menor inclinação. Porém, a desvantagem desse método é a dificuldade e complexidade de

sua implementação, por isso, os parâmetros envolvidos são alvos de estudo. Ele também é falho na solução de muitos casos e, portanto, seu uso na indústria é limitado [39].

A Figura 2.19 mostra o exemplo de como este método utiliza vários pontos de contato entre a ponta da ferramenta e a superfície a ser usinada.

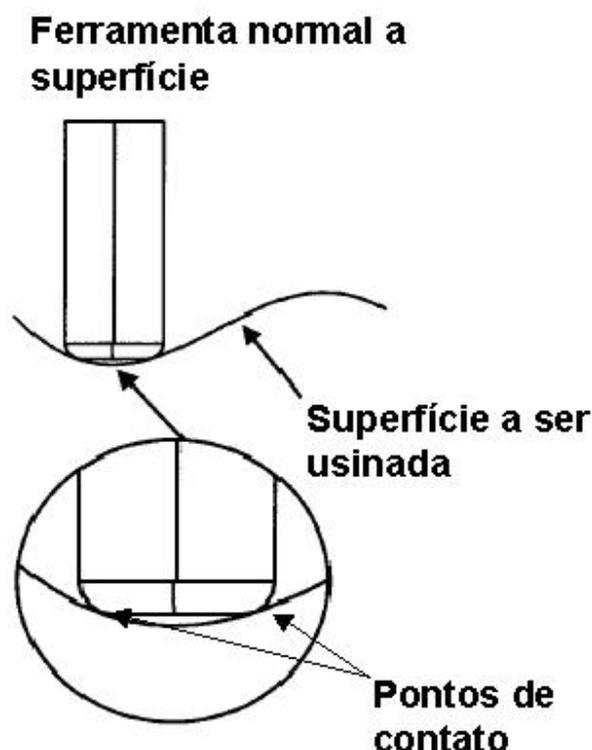


Figura 2.19: Método multiponto [8].

2.6.3 PAM – *Principal Axis Method*

Outro método também encontrado na literatura é o PAM (*Principal Axis Method*) [40]. Este método procura adaptar a curvatura máxima e mínima da superfície do modelo geométrico em relação à inclinação da ponta da ferramenta e ao avanço da usinagem respectivamente. Para o ponto de contato de corte da ferramenta será considerado sua inclinação de forma que o seu raio efetivo corresponda a máxima curvatura do local da superfície a ser usinada. O avanço da ferramenta é definido pela direção em que a superfície a ser usinada tenha a menor curvatura.

A Figura 2.19 mostra como este tipo de método consegue adaptar a curvatura da superfície e o raio da ferramenta através da inclinação da ferramenta.

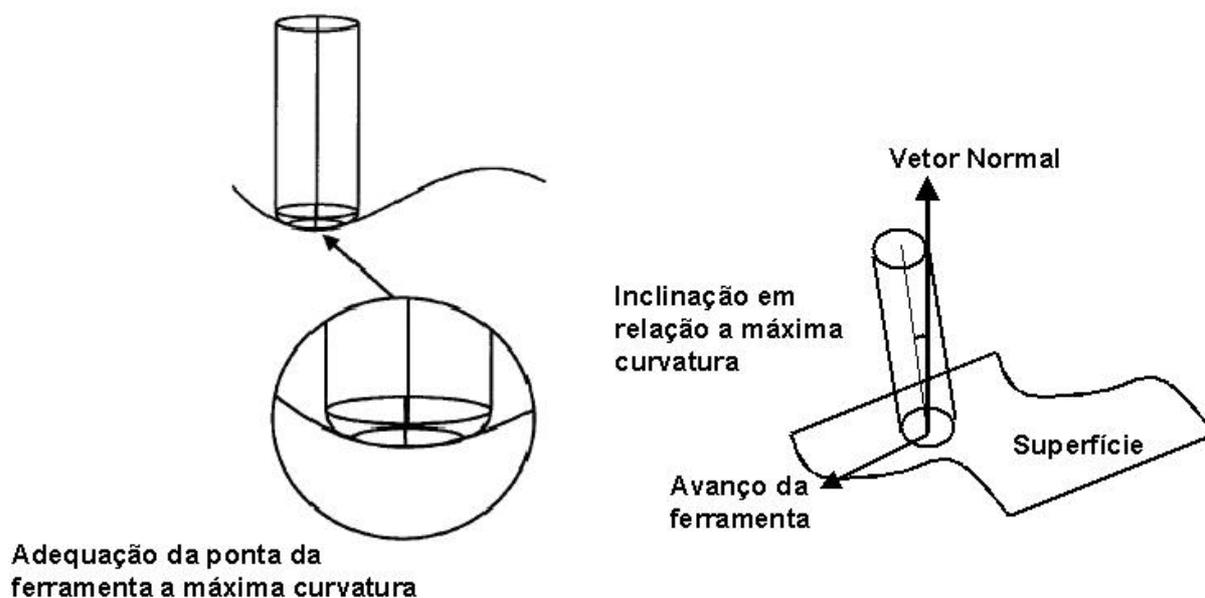


Figura 2.20:PAM - Método do Eixo Principal [38].

Tal como o Método Multiponto, o método PAM não é aplicado para fresa de ponta esférica. O principal problema com este método é o risco de interferência de corte da ferramenta.

2.6.4 MPF – *Machining Potential Field*

Outro método bastante semelhante ao método multiponto e ao método PAM é o Método MPF (*Machining Potential Field*) [29].

O MPF busca como resultado a máxima largura da faixa a ser usinada através da inclinação da ferramenta, adequando-se a superfície, sem que haja interferência de corte. Quando a direção do avanço de corte muda de direção, a largura da faixa a ser usinada também muda.

Portanto o método MPF procura gerar a melhor distribuição do caminho da ferramenta pela relação entre a largura da faixa de usinagem e a direção de corte, de acordo com a

superfície complexa a ser usinada. Na Figura 2.21, a faixa w_a tem uma largura maior em relação à faixa w_b , pois a curvatura da superfície é menos acentuada na primeira opção de avanço e mais acentuada na segunda opção.

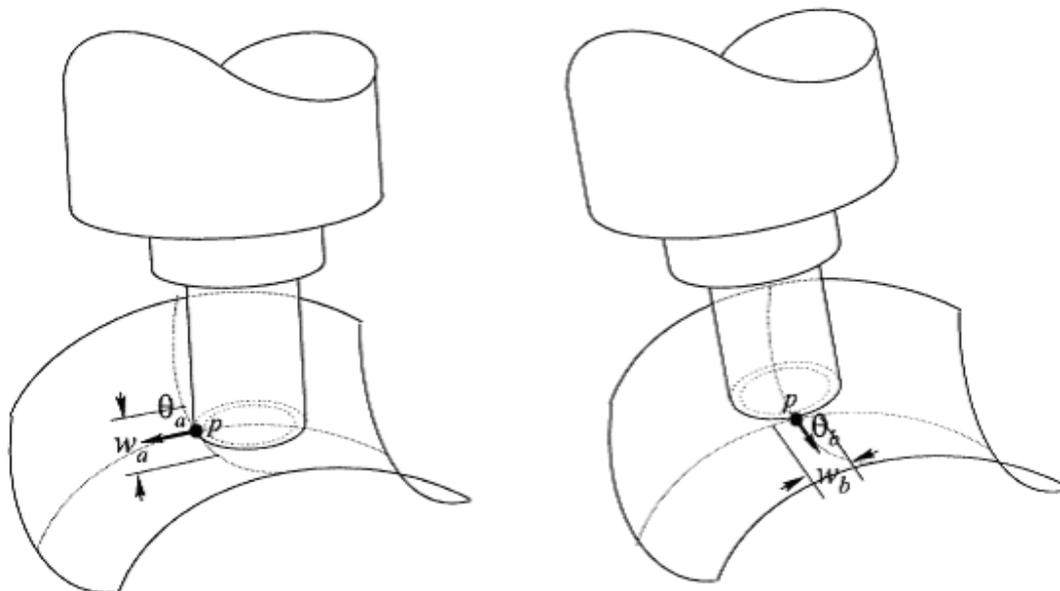


Figura 2.21: MPF - Área Potencial de Usinagem [29]

2.6.5 Fresamento Periférico (*Swarf Milling*)

Há também outro método alternativo para o fresamento com 5 eixos conhecido como Fresamento Periférico ou *Swarf Milling*.

Este método possui aplicação específica, só é possível sua utilização em usinagem de superfícies regradas (*ruled surfaces*).

A superfície regrada, como mostra a Figura 2.22, pode ser encontrada em peças aeronáuticas, automotivas e em moldes e matrizes, ela pode ser descrita através do movimento de um segmento de linha reta no espaço 3D com as duas extremidades do segmento percorrendo ao longo de dois geradores (*Generators*). Os geradores são nada mais do que curvas complexas que podem ser descritas matematicamente, podem ser curvas do tipo B-Spline [41, 42].

A Figura 2.22 mostra um exemplo de superfície regradada conforme sua explicação anterior:

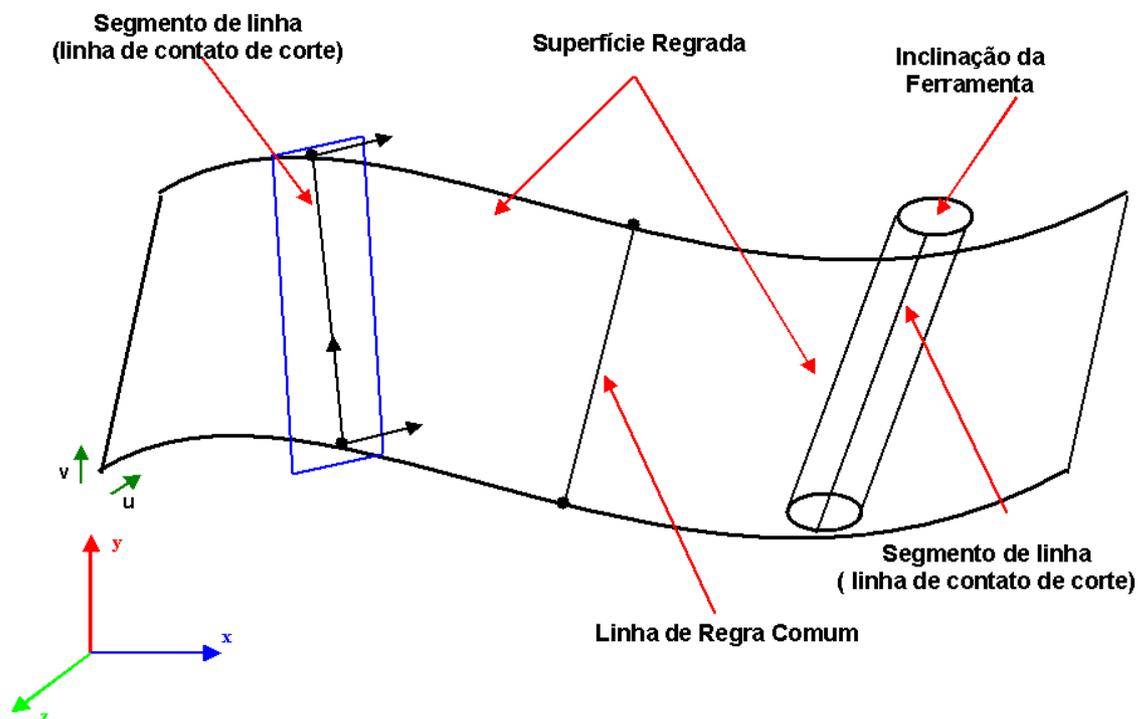


Figura 2.22: Exemplo de superfície regradada [42].

O método do Fresamento Periférico ou *Swarf Milling* é realizado através da lateral da ferramenta. Ou seja, o contato de corte é feito ao longo do comprimento da ferramenta, a tangência entre a peça e ferramenta é o próprio segmento de reta que rege a superfície regradada.

A Figura 2.23 demonstra um exemplo de trajetória da ferramenta pelo método do fresamento periférico.

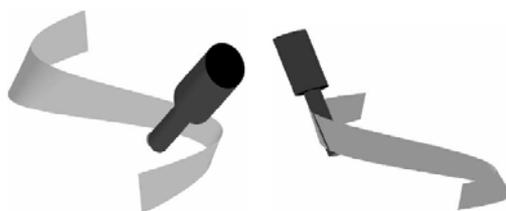


Figura 2.23: Trajetória da ferramenta pelo método *Swarf Milling* [41].

De todas as estratégias de corte apresentadas, a que possui as características mais adequadas para a realização dos experimentos deste trabalho é a estratégia da ferramenta inclinada (*Sturz*), escolhida para a realização da usinagem de acabamento de cada corpo de prova, as estratégias de corte estão detalhadas no capítulo 4 deste trabalho.

2.7 Tolerância CAM

Para a geração da trajetória da ferramenta, outro fator a ser considerado é a tolerância CAM.

A tolerância CAM é uma faixa de tolerância definida pelo programador, onde a mesma é aplicada sobre a superfície do modelo geométrico. É dentro dessa faixa que a trajetória da ferramenta é calculada.

A Figura 2.24 mostra um exemplo de geração da trajetória da ferramenta, com a mesma interpolação linear (tipos de interpolação serão vistas no próximo tópico), mesmo modelo geométrico e com faixas de tolerância diferentes:

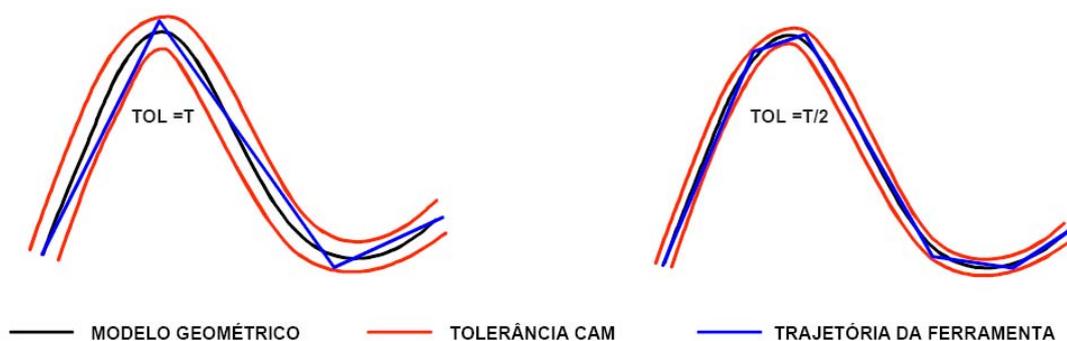


Figura 2.24: Tolerância CAM [45].

Através da Figura 2.24, pode-se observar que a variação da faixa de tolerância CAM influencia na exatidão da peça.

Quando a faixa de tolerância CAM é maior, pode-se observar as seguintes características:

- Trajetória mais simplificada;
- Maior segmento de reta (utilizando trajetória do tipo linear);
- Menor exatidão da trajetória da ferramenta em relação ao modelo teórico CAD;
- Menor tempo de cálculo da trajetória da ferramenta.

Quando a faixa de tolerância CAM é menor, pode-se observar as características inversas as citadas anteriormente.

A quantidade de segmentos que um programa NC pode conter não está relacionado somente com a faixa de tolerância CAM, mas também com a curvatura do modelo geométrico.

A curvatura da geometria a ser usinada também tem forte relação com a exatidão da trajetória da ferramenta, com o tamanho dos segmentos da trajetória, com o tamanho do programa NC e com o tempo de cálculo do mesmo [43, 44, 45].

Há outro fator que deve ser levado em consideração na geração da trajetória da ferramenta, que influencia no tempo do cálculo e tamanho do programa NC. É a interpolação da trajetória da ferramenta e que será vista no tópico seguinte.

2.8 Interpolação da trajetória da ferramenta

A interpolação da trajetória da ferramenta, tanto para fresamento com 3 eixos como para fresamento com 5 eixos, é um parâmetro de corte que determina como o movimento da ferramenta se comportará no espaço entre um ponto CL até o seguinte.

Os sistemas CAM, em uma programação de usinagem com 3 eixos, podem utilizar diferentes tipos de interpolação para a geração da trajetória da ferramenta que melhor se adaptam à faixa de tolerância CAM.

Na usinagem com máquinas de 3 e 5 eixos, o tipo de interpolação da trajetória da ferramenta mais comumente utilizado é a linear, pois o cálculo do programa NC com este tipo de interpolação é mais simples.

Para a usinagem com tecnologia HSM (*High Speed Machine*) em que as velocidades do processo são maiores, a interpolação linear gera limitações com relação ao avanço da ferramenta e conseqüente desempenho dos movimentos da máquina ferramenta.[44, 46, 47].

Novos métodos de interpolação da trajetória da ferramenta foram desenvolvidos e que hoje são alvos de estudo, tais como:

- Interpolação Circular [43, 45];
- Interpolação Polinomial [48, 49];
- Interpolação Spline [49, 50, 51, 52].
- Estes métodos de interpolação da trajetória da ferramenta podem ser observados com melhor detalhamento através da literatura já referenciada anteriormente.

Na usinagem utilizando máquinas-ferramentas com tecnologia 5 eixos, a interpolação da trajetória da ferramenta é pouco estudada devido as grandes dificuldades encontradas para a geração dos programas NC com outros tipos de interpolação que não seja a tradicional interpolação linear.

Porém, alguns estudos [53, 54] comprovam os benefícios da utilização de interpolação *Spline*, tais como, a suavização da trajetória da ferramenta e a melhora no tempo de usinagem.

2.9 Verificação e simulação da trajetória da ferramenta

Após a geração da trajetória da ferramenta, é necessário avaliar os movimentos da ferramenta verificando a ocorrência de violação ou invasão da geometria da peça e

colisão entre peça, ferramenta e máquina ferramenta. Esta etapa é de crucial importância para o fresamento com tecnologia 5 eixos.

No caso de usinagem com máquinas de 3 eixos, o processo de geração e verificação da trajetória da ferramenta é simples se comparado à usinagem com máquinas de 5 eixos, pois o programador possui maior controle e melhor previsão sobre a movimentação dos eixos. Os sistemas CAM permitem a visualização gráfica da trajetória da ferramenta, e dependendo do software, mostra inclusive a retirada do material. Para o processo de usinagem com 3 eixos esse tipo de verificação é bastante satisfatório, e em alguns casos, são feitas usinagem em vazio direto na própria máquina-ferramenta para a verificação de possíveis erros do programa NC gerado.

Já na usinagem com máquinas de 5 eixos para superfícies complexas, além da complexidade de operação, para programação dessas máquinas é necessário a utilização de softwares CAM que contenham operações específicas para a mesmas. Muitas vezes, a verificação de erros na programação de máquinas com 5 eixos é feita apenas pela visualização gráfica entre peça e ferramenta partindo para a usinagem em vazio ou resina, o que aumenta o risco de colisão entre a peça, ferramenta e partes da máquina, além do aumento do tempo empregado para a realização dessa tarefa que não agrega valor algum no produto final. Conseqüentemente, aumenta o custo de produção [54].

Portanto, faz-se necessário não só apenas verificar a trajetória da ferramenta com a peça e ferramenta, mas também a simulação virtual da máquina-ferramenta e seus movimentos.

A Figura 2.25 a) mostra um exemplo de visualização gráfica, em que está representado apenas a ferramenta de corte e a peça usinada, mostrando a retirada de material.

A Figura 2.25 b) mostra um exemplo de simulação virtual de uma máquina-ferramenta que possui todos os componentes da maquina ferramenta, desde o sistema de fixação, suporte da ferramenta e até sistema de refrigeração.

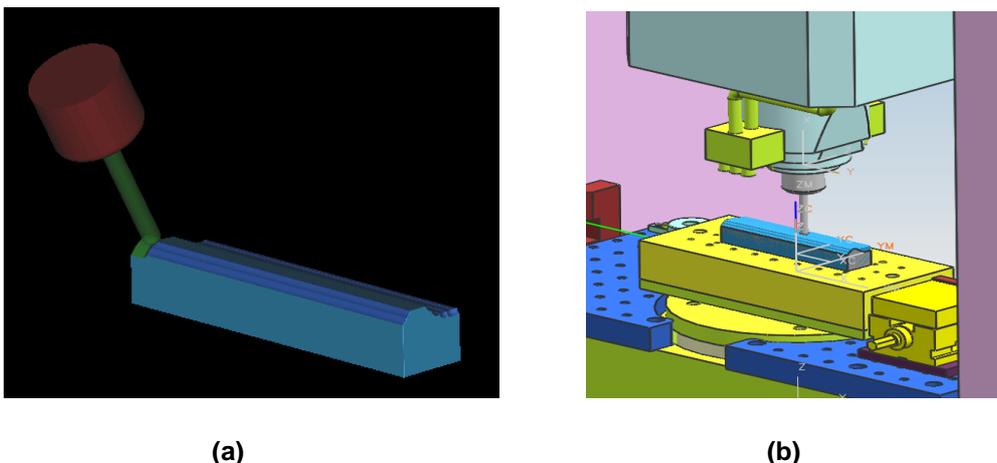


Figura 2.25: (a) Visualização gráfica entre peça e ferramenta; (b) Simulação com máquina-ferramenta virtual.

Neste trabalho, a verificação e simulação da trajetória da ferramenta foram de grande importância para a escolha das estratégias, realização e análise de possíveis erros dos programas NC.

2.9.1 Verificação do Programa NC

Como visto, a verificação da trajetória da ferramenta é necessária para garantir que os movimentos da máquina-ferramenta sejam livres de colisão e livres de interferências de corte. Também deve proporcionar a otimização do processo de usinagem pela verificação e eliminação de movimentos em vazio, além da escolha da melhor estratégia.

A verificação da trajetória da ferramenta em um sistema CAM pode ser feita através de simples análise de interferência, exibição gráfica dos movimentos da ferramenta e exibição gráfica dos movimentos da ferramenta com retirada de material [55].

Na análise de interferência são realizados apenas cálculos matemáticos que verificam se há ocorrência de invasões ou interferências de corte na geometria da peça feito através de mensagens de aviso na tela do computador. Porém, na programação para usinagem com 5 eixos,

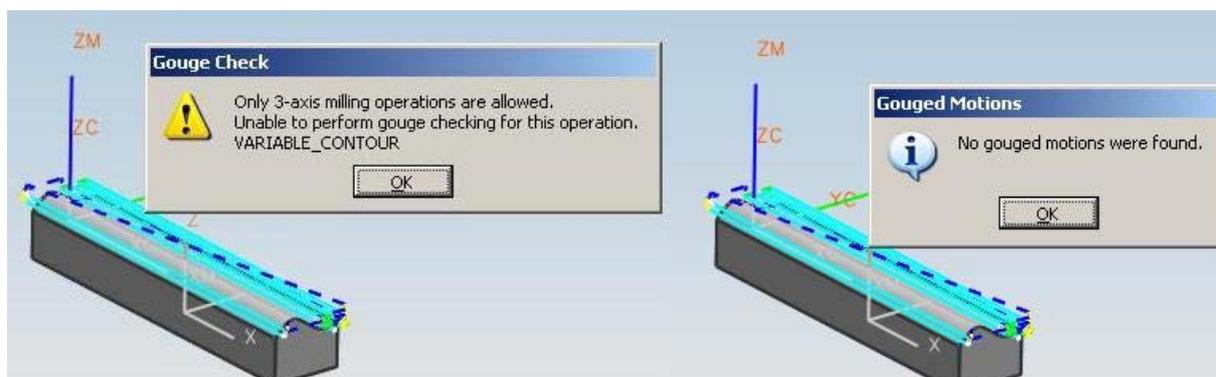


Figura 2.26: Análise de interferência do sistema CAM do software NX3.

Na exibição gráfica dos movimentos da ferramenta, o programador verifica os movimentos da ferramenta através de linhas, os diferentes tipos de movimento como movimentos de avanço de corte, entrada e saída da ferramenta na peça, e movimentos em vazio, são representados por linhas e cores diferentes. Porém, problemas de invasão ou interferência de corte na geometria da peça podem não ser identificados. A Figura 2.27 mostra um exemplo de representação gráfica dos movimentos da ferramenta, mostrando os diferentes tipos de movimentos com as cores de cada linha e o modelo gráfico da ferramenta.

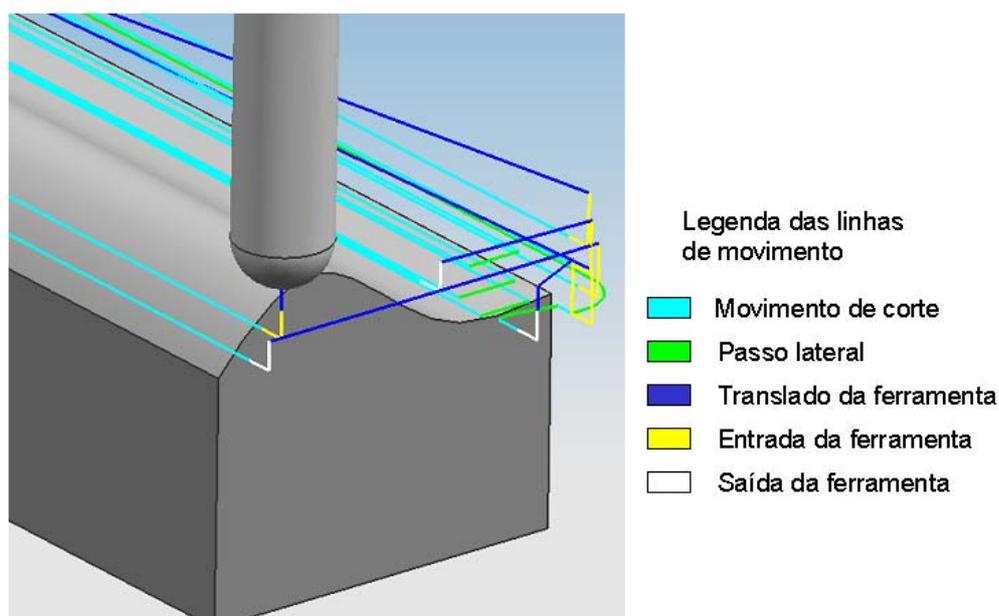


Figura 2.27: Exemplo de exibição gráfica dos movimentos da ferramenta.

A exibição gráfica dos movimentos da ferramenta com retirada de material consiste na animação da trajetória da ferramenta sobre a peça com a retirada de material de acordo com as passadas da ferramenta sobre a bruta (blank). Além de verificar os movimentos da ferramenta, também possibilita a verificação de invasões ou interferência de corte sobre a geometria da peça e também análise de regiões com sobremetal e inacabadas, permite o ajuste de movimentos como entradas e saídas de ferramenta na peça e ajuste de parâmetros de inclinação da ferramenta.

A Figura 2.28, mostra um exemplo de exibição gráfica dos movimentos da ferramenta com retirada de material. A região sobre a peça que possui cor azul representa a sobra de material deixado na etapa de acabamento.

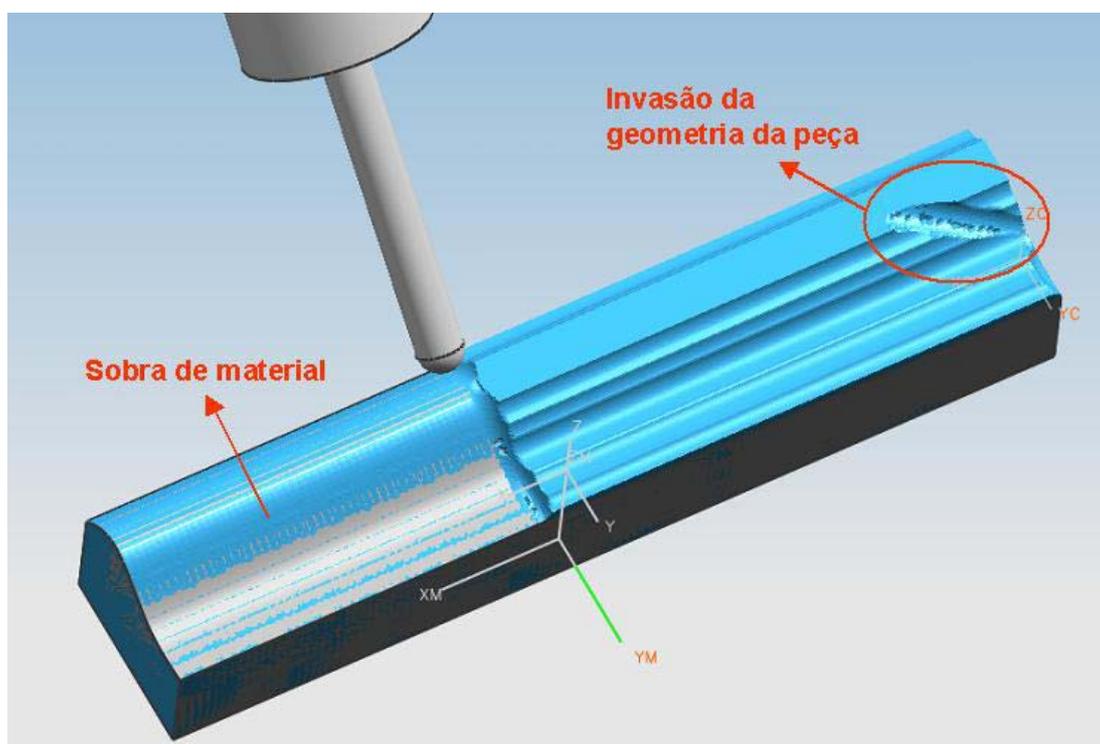


Figura 2.28. Exemplo de exibição gráfica dos movimentos da ferramenta com retirada de material.

Para verificação da trajetória da ferramenta dentro de um sistema CAM há três métodos que permitem a exibição gráfica da função de verificação, os métodos são:

- Baseados em vistas [30, 56]: O método baseado em vistas utiliza um dispositivo gráfico como o z-buffer, que verifica graficamente os resultados do corte da ferramenta, porém, quando é necessário a visualização de um outro ângulo da peça, é necessário um novo cálculo para a verificação da trajetória da ferramenta.
- Modelos sólidos [30, 56]: O método baseado em sólidos, consiste na subtração booleana entre o movimento percorrido pela ferramenta e o modelo da peça de trabalho (*blank*), considerado um ótimo método com relação a precisão da verificação. O problema com este método está na necessidade equipamento computacional de grande capacidade de desempenho, conseqüentemente, de maior custo.
- Vetores discretos [30, 56]: No método baseado em vetores discretos, a peça a ser usinada é representada por um conjunto de pontos com seus respectivos vetores normais a superfície da mesma, o comprimento dos vetores se estende até a superfície da peça bruta (*blank*). Para a verificação, a intersecção entre os vetores da peça com o movimento da ferramenta pode ser calculado. O módulo do vetor corresponde ao material a ser retirado, isso é usado como base para a representação gráfica da verificação da peça a ser usinada. Esse método é capaz de lidar com usinagem com 5 eixos, é um método preciso e simples.

No entanto, a verificação da trajetória da ferramenta de acordo com os três métodos sejam suficientes para usinagem com máquinas de 3 eixos, na usinagem com máquinas de 5 eixos essas verificações não bastam. A maior quantidade de eixos e conseqüente complexidade dos movimentos da ferramenta fazem com que seja necessária a simulação virtual da máquina-ferramenta para garantir a segurança do processo de usinagem, evitando colisões entre os vários componentes da máquina, ferramenta e a peça.

2.9.2 Simulação virtual de máquinas-ferramentas

A simulação de usinagem com máquina-ferramenta virtual permite ao programador verificar a trajetória da ferramenta e analisar as possíveis falhas dentro da programação. Permite analisar a transição entre métodos de usinagem, além da otimização do processo de programação e usinagem. Um exemplo de usinagem com máquina ferramenta virtual é mostrado na Figura 2.26 (b).

A simulação de usinagem com máquina-ferramenta virtual pode ser de dois tipos:

- Simulação cinemática;
- Simulação dinâmica.

A simulação cinemática de máquinas virtuais, como o próprio nome diz, simula os movimentos e limites reais dos eixos de uma máquina-ferramenta, permitindo a visualização realística do posicionamento da peça em relação aos dispositivos de fixação e eixos, e análise do comportamento da máquina ferramenta com relação ao programa NC gerado.

O desenvolvimento das máquinas virtuais não é uma tarefa simples, mesmo que seja um modelo já simplificado. Para que a simulação cinemática da máquina-ferramenta seja próxima da realidade, é necessária a modelagem de todas as peças da máquina em um sistema CAD, peças como: eixos, dispositivos de fixação, sistemas de refrigeração, todas com dimensões exatas da máquina real. Também é necessário desenvolver e integrar, junto ao sistema CAM e pós-processador da máquina, um controle numérico virtual (*VNC - Virtual Numerical Control*), adicionando os limites de movimento e características da máquina-ferramenta. Em alguns softwares CAM possuem um banco de dados com máquinas-ferramentas virtuais prontas.

No mercado existem programas de computador que possuem módulos para a criação de pós-processadores e VNCs que integram os sistemas CAD e CAM. Porém, de acordo com alguns autores [57, 58], é possível o desenvolvimento de simuladores de máquinas-ferramentas virtuais baseado em algoritmos através de software de programação ou através da internet como plataforma de desenvolvimento utilizando

uma linguagem de modelamento de realidade virtual e *Java*, como explicado na referência [59].

A simulação dinâmica de máquinas virtuais consiste não só apenas na movimentação dos eixos mas também nas forças, velocidades e acelerações que atuam no processo. Através da simulação dinâmica é possível analisar além dos problemas do programa NC, forças de corte, vibrações, possibilitando a otimização de estratégias de corte levando em consideração outros parâmetros além dos movimentos da trajetória da ferramenta [59, 60].

Para o desenvolvimento de máquinas-ferramentas virtuais que possuam simulações dinâmicas, é necessário tanto a implementação dos movimentos e limites reais da máquina como também algoritmos que simulem as forças de corte, a deflexão de ferramenta e máquina de acordo com o material usinado.

Segundo Pörbacher [62], existem programas de computador específicos que possibilitam a otimização do processo de usinagem através da análise de força de corte, e de análise de elementos finitos, que devem ser integradas à cadeia CAD/CAM. A simulação descrita pelo autor [62] não é dinâmica. O processo de análise é feita através das etapas:

- Simulação cinemática da máquina-ferramenta virtual, na qual indica a ocorrência de colisão entre ferramenta, peça, e dispositivo de fixação;
- Análise de forças de corte através de dispositivos de medição fixados na máquina-ferramenta real, os resultados serão inseridos em um simulador de forças de corte;
- Análise por elementos finitos do dispositivo de fixação, através de outro software.

Segundo o autor, os resultados fornecem informações importantes para a segurança e otimização do processo de usinagem.

2.10 Pós-processamento

No processo de usinagem de superfícies complexas, após a geração da trajetória da ferramenta em um sistema CAM e verificação da trajetória da ferramenta, analisando e corrigindo as possíveis colisões e invasões da geometria da peça, é necessária a realização do pós-processamento para a criação do programa NC que será inserido no comando numérico da máquina-ferramenta.

Os sistemas CAM geram a trajetória da ferramenta a partir de um sistema de coordenadas que está fixo à peça, considerando a peça estacionária, e que todos os movimentos serão realizados pela ferramenta, sem levar em consideração o tipo de máquina-ferramenta que será realizado a usinagem [17, 63], e que portanto, é necessário a realização do pós-processamento da trajetória da ferramenta.

O pós-processamento nada mais é do que a transformação ou tradução das coordenadas de movimento da trajetória da ferramenta, gerada pelo sistema CAM, em uma linguagem que o comando numérico entenda e transmita as coordenadas para os eixos da máquina-ferramenta.

Para o fresamento com 5 eixos, o cálculo da posição da ferramenta realizado pelo sistema CAM, o ponto CL, é sempre associado a um vetor que indica a inclinação da ferramenta em relação a superfície. A geração desses pontos está baseado no sistema de coordenadas fixo a peça.

O pós-processamento realiza a transformação ou tradução das coordenadas do ponto CL, que está baseado no sistema de coordenadas fixa a peça (X_p , Y_p e Z_p , e seus respectivos vetores no qual indicam a inclinação da ferramenta i , j e k), em instruções de coordenadas para movimentos dos 5 eixos de uma máquina-ferramenta, como por exemplo X_m , Y_m , Z_m , A e C , os eixos A e C são responsáveis pela inclinação da ferramenta. Essa transformação ou tradução das coordenadas é conhecida como cinemática inversa (*inverse kinematics*) [61, 63].

A Figura 2.29 mostra um exemplo de como a etapa de pós-processamento traduz as coordenadas da peça em instruções de coordenadas para os movimentos em 5 eixos:

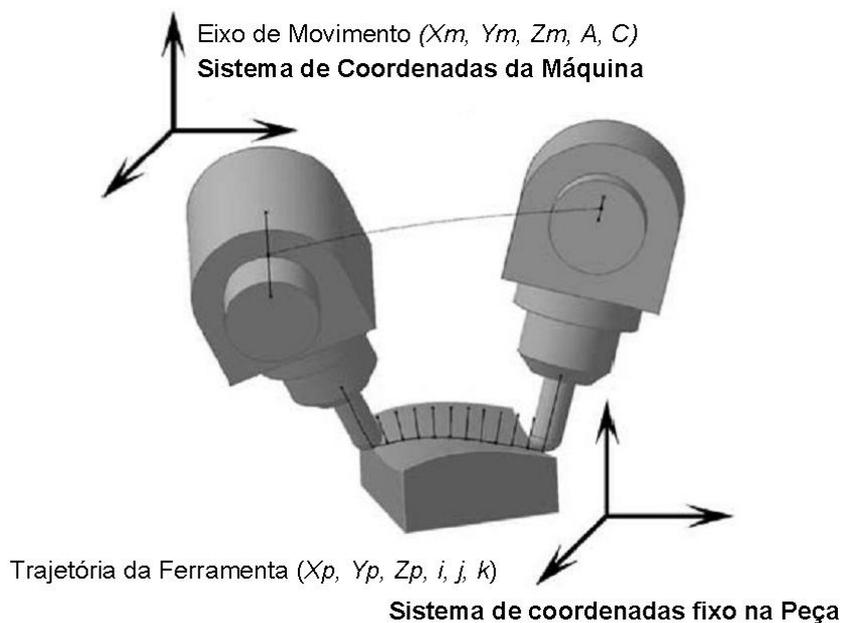


Figura 2.29: Transformação dos movimentos através do pós-processador [53].

A cinemática inversa pode ser realizada através do pós-processador do sistema CAM ou usando o comando numérico da máquina-ferramenta. Isto possibilita três modos de para a realização desta etapa, como mostra a Figura 2.30 [61].

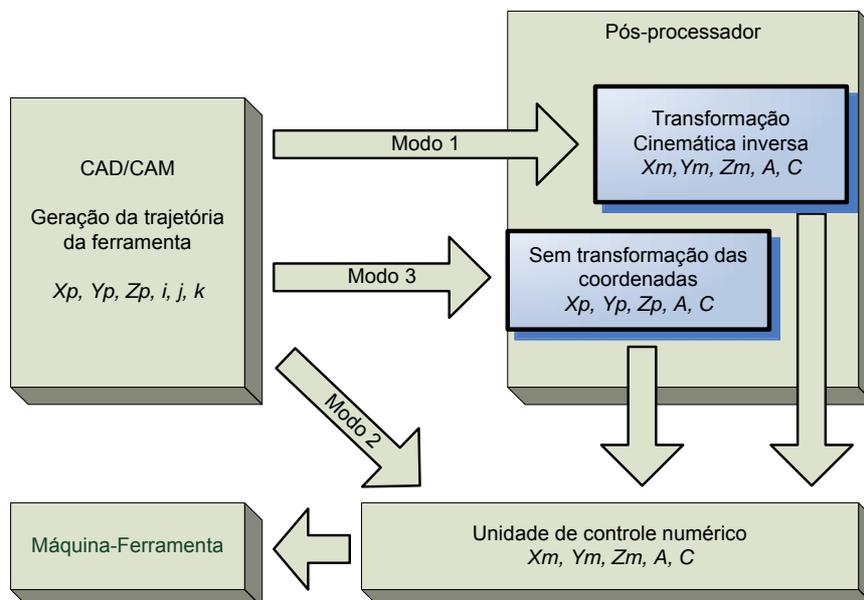


Figura 2.30: Transmissão de dados entre sistemas CAM e comando numérico da máquina ferramenta [61].

A transformação ou tradução feita pelo modo 1, é o pós-processador que efetua toda a cinemática inversa .

No modo 2, toda a transformação ou tradução é feita pelo comando numérico da máquina-ferramenta, é considerado o mais atrativo devido ao cálculo da cinemática inversa ocorrer em tempo real.

No modo 3, parte da transformação ou tradução é feita através do pós-processamento de um sistema CAM no que se refere aos movimentos de rotação, e o comando numérico da máquina ferramenta realiza a outra parte que trata do posicionamento da ferramenta em relação ao sistema de coordenadas da máquina-ferramenta.

Neste trabalho, o pós-processamento de cada programa foi realizado pelo modo 1.

3. Proposta do trabalho

Neste capítulo serão detalhados os objetivos e métodos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho.

3.1 Objetivos Gerais

Este trabalho visa, como contribuição científica, analisar diferentes estratégias de corte para o fresamento com 5 eixos, os critérios de análise envolvem a qualidade e aspecto superficial, exatidão geométrica e tempo de usinagem, por considerar fatores estes, essenciais para aquisição de conhecimento e aplicação.

3.2 Método

Para a realização desse trabalho, iniciou-se uma revisão bibliográfica abordando sistemas CAD/CAM, geração da trajetória da ferramenta, métodos de interpolações e estratégias de corte, além de assuntos relacionados a transmissão de dados do sistema CAM para o comando numérico da máquina-ferramenta, visando a aquisição de conhecimento de todos os elementos que influenciam no processo de usinagem com tecnologia de fresamento com 5 eixos. Essa pesquisa foi realizada foi realizada através

de livros, artigos e revistas nacionais, internacionais e disponíveis na internet, entre outros.

Buscou-se como critério de escolha do corpo de prova uma geometria complexa contendo parede com inclinação “negativa” e com características de usinagem para fresamento com 5 eixos.

As estratégias de corte analisadas foram aplicadas em quatro corpos de prova (mesma geometria) para fins de comparação e validação dos resultados.

A análise das estratégias de corte foi realizada na operação de acabamento, pois ela é considerada crítica na manufatura de superfícies complexas devido ao tempo elevado de usinagem e ao aspecto superficial do produto. Também, o fresamento com 5 eixos simultâneos, em sua grande maioria, é aplicado nas operações de acabamento [64, 65]; portanto, este trabalho visa analisar e comparar somente das estratégias de corte aplicadas nas operações de acabamento da peça. As operações de desbaste e pré-acabamento foram iguais para todos os corpos de prova.

Como o objetivo é a análise de diferentes estratégias de corte, os parâmetros de corte foram mantidos nominalmente iguais para todos os corpos de prova. Procurou-se estipular valores ótimos para os parâmetros de corte, que promovessem altas velocidades de corte neste processo específico de fabricação.

Os critérios de análise das estratégias de corte estudadas foram:

- Tempo de usinagem, obtido durante o início e o fim de cada operação de acabamento analisada incluindo os tempos de usinagem em vazio. Os tempos foram tomados através de um cronômetro.
- Qualidade superficial de regiões críticas dos corpos de prova, avaliada pela rugosidade e medida com um rugosímetro digital;
- Aspecto superficial das regiões críticas dos corpos de prova através de imagens captadas em um microscópio com ampliação de 10 a 60 vezes;

- Exatidão geométrica, caracterizada pela medição de pontos críticos da geometria usando uma máquina de medir por coordenadas.

O detalhamento deste método poderá ser observado no capítulo seguinte que mostra a realização dos ensaios.

4. Realização dos ensaios

Este capítulo relata os experimentos realizados, almeja-se com estes experimentos a análise comparativa das estratégias de corte, de acordo com o abordado no capítulo 3.

Para isso, foi escolhido um corpo de prova com características geométricas específicas para o fresamento com 5 eixos, quatro estratégias de corte diferentes foram aplicadas, totalizando com isso, um número de quatro corpos de prova.

A programação das estratégias de corte e a avaliação dos corpos de prova foram realizadas no Laboratório de Sistemas Computacionais para Projeto e Manufatura (SCPM), da Universidade Metodista de Piracicaba (Unimep), campus de Santa Bárbara D'Oeste, SP.

A usinagem dos corpos de prova foram realizados no Centro de Competência em Manufatura – CCM, laboratório do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), em São José dos Campos, SP.

4.1 Definição do corpo de prova

Buscou-se como corpo de prova um modelo geométrico que representasse características típicas para a usinagem com 5 eixos simultâneos. Com base nessa premissa, o modelo geométrico escolhido foi uma palheta de turbina a vapor que possui superfícies com ângulos “negativos”; ou seja, superfícies com ângulos que uma máquina-ferramenta de 3 eixos não poderia ter acesso de usinagem.

A Figura 4.1 mostra o modelo geométrico da palheta de turbina escolhida. Na sua base se encontra um plano de referência para posterior medição e comparação do modelo geométrico CAD e corpo de prova usinado. O canto superior direito mostra uma vista do

topo da palheta onde é possível observar os perfis utilizados para a modelagem da mesma. Suas proporções são de 107 mm de altura e 46,2 mm de aresta da base.

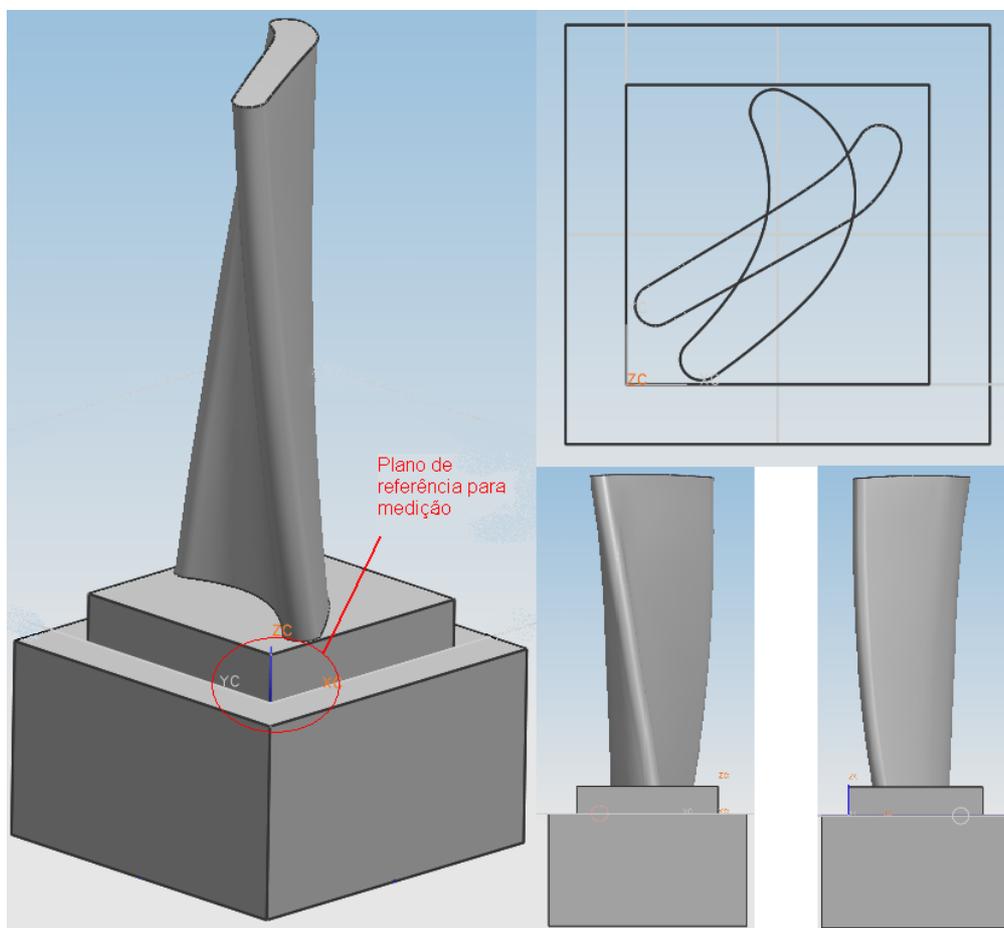


Figura 4.1: Corpo de prova utilizado nos experimentos

Geralmente, as palhetas de turbina a vapor são feitas de aço AISI 410 com dureza em torno de 200 HB.

Neste projeto, o material utilizado para a usinagem do corpo de prova foi o aço AISI-SAE P20, com dureza entre 280 e 320 HB, devido a disponibilidade do material e de ferramental para usinagem do corpo de prova. Esta opção é favorecida pelo conhecimento prévio do SCPM na utilização desse material.

4.2 Ferramentas e Sistema utilizados para a realização dos experimentos

A seguir, serão apresentadas as ferramentas e sistema utilizado para a realização dos experimentos, juntamente com os equipamentos para a aquisição dos resultados obtidos.

4.2.1 Centro de usinagem utilizado

A máquina-ferramenta utilizada nos experimentos foi o centro de usinagem Hermle modelo C 600 U com tecnologia de usinagem 5 eixos HSM (*High Speed Machining*).



Figura 4.2: Máquina-ferramenta Hermle C 600 U

Sua estrutura constitui uma mesa com os eixos de rotação A e C e três movimentos de translação (X, Y e Z), localizados no cabeçote.

Sua base é feita de granito sintético, ela possui uma repetibilidade de $\pm 2 \mu\text{m}$ de posicionamento utilizando dois eixos simultâneos, magazine com capacidade para trinta ferramentas, sistema de medição a laser de comprimento e diâmetro de ferramenta, além do apalpador para referenciar a peça na máquina-ferramenta.

A Tabela 4.1, apresenta as principais características técnicas desta máquina-ferramenta.

Tabela 4.1: Características da máquina-ferramenta.

Fuso	
Velocidade	16.000 rpm
Potência	15 kW a partir de 1.100 rpm
Torque	130 Nm até 1100 rpm / 9Nm até 16.000 rpm
Eixos	
Força de avanço	6000 N
Avanço máximo	35 m/min
Curso máximo dos eixos	
X	600 mm
Y	450 mm
Z	450 mm
Limites e velocidades dos eixos de rotação	
A	110° à -110° / Velocidade: 10 rpm
C	360° (sem limites) / Velocidade: 15 rpm
Capacidade da mesa giratória (eixo C)	
280 mm / 200 Kg	

O comando numérico da máquina-ferramenta é o Sinumerik 840D, da Siemens, apropriado para o fresamento com 5 eixos.

4.2.2 Sistema CAD/CAM

O desenvolvimento da geometria e da programação NC foi realizado no software NX3 da empresa Siemens PLM Software, que possui os módulos CAD e CAM integrados facilitando as eventuais mudanças de geometria e programação.

O módulo CAM possui ferramentas para a geração de estratégias com multi-eixos e permite a verificação e simulação da trajetória da ferramenta com todos os elementos do processo de usinagem, tais como: máquina-ferramenta, ferramenta, dispositivo de fixação da peça e peça.

4.2.3 Dispositivo de fixação

O dispositivo de fixação do corpo de prova foi uma morsa de precisão, apropriada para este tipo de máquina-ferramenta, proporcionando uma base de fixação estável.

Outro dispositivo utilizado para a fixação das ferramentas foi o mandril de arraste de precisão do tipo Corogrip, fabricado pela Sandvik Coromant®. Esse mandril minimiza a vibração, pois possui melhor balanceamento que os mandris mecânicos.



Figura 4.3: Exemplo de mandril, utilizado para fixação da ferramenta.

4.2.4 Ferramentas

As ferramentas utilizadas nos experimentos foram fornecidas pela empresa Sandvik do Brasil S.A®.

Para operação de desbaste e acabamento da base foi utilizada uma ferramenta código R390-022A20L-11L, com as seguintes características:

Tabela 4.2 Características da ferramenta

Tipo	Fresa de topo reto
Diâmetro	22 mm
Comprimento	170 mm
Arestas de corte	2
Pastilha intercambiável	R390-11T308-PM de classe P

Para as operações de pré-acabamento e acabamento, foi utilizado uma ferramenta R216F-16 A20S-100, com as seguintes características:

Tabela 4.3 Características da ferramenta

Tipo	Fresa de topo esférico
Diâmetro	16 mm
Comprimento	166 mm
Arestas de corte	2
Pastilha intercambiável	R216F-1640E-L classe P10A

Para maior controle do processo e do experimento, optou-se por trocar a pastilha da ferramenta a cada acabamento realizado nos corpos de prova, inibindo assim a influência do desgaste da ferramenta nos resultados dos experimentos.

4.2.5 Rugosímetro Digital

Para a medição da rugosidade superficial das peças, foi utilizado o rugosímetro digital modelo SurfTest 211 da Mitutoyo com resolução de $0,01\mu\text{m}$ (Ra, Rq), padrões de medição JIS, DIN, ISO, ANSI, com velocidade de medição de 0,25–0,5 mm/s e retorno de 0,8 mm/s. A Figura 4.4 mostra o rugosímetro do Laboratório de Metrologia da Unimep.



Figura 4.4: Rugosímetro digital.

As medições de rugosidade foram realizadas em 4 regiões do corpo de prova como mostra a Figura 4.5, cada região foi medida 4 vezes sempre medidas perpendicularmente ao sentido de corte da ferramenta. Foi utilizado um comprimento de amostragem (*Cut off*) de 0,8 mm, adequado para a medição de rugosidade em superfícies fresadas como orienta a norma NBR 8404/1984 [66].

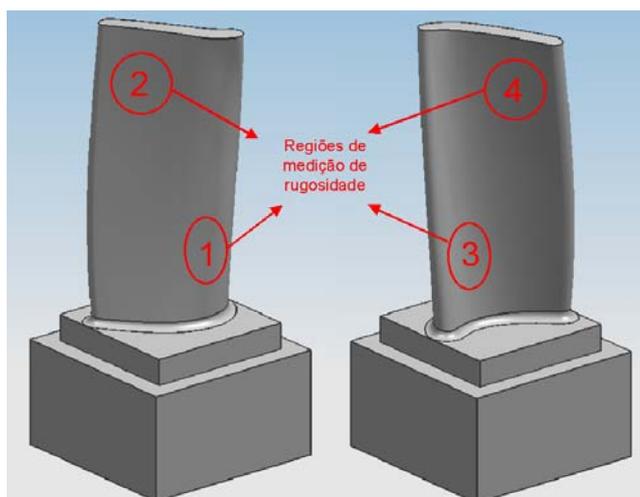


Figura 4.5: Regiões de medição de rugosidade

As regiões de rugosidade mostradas na Figura 4.5 representam regiões de maior e menor curvatura da superfície da peça, escolhidas por representarem as regiões mais críticas da peça.

O parâmetro de medição de rugosidade adotado na realização das medições foi a rugosidade média Ra (*Roughness average*). É o parâmetro de rugosidade que representa as características gerais de rugosidade de uma peça, favorecendo a comparação das características gerais de cada corpo de prova e suas respectivas estratégias de corte.

4.2.6 Máquina de Medir por Coordenadas

Para a medição geométrica dos corpos de prova foi utilizada uma máquina de medir por coordenadas da marca Hexagon modelo TESA MICRO-HITE DCC, com eixos de 705, 605 e 505 milímetros de comprimento, resolução de 0.1 μm em cada eixo e erros máximos permissíveis iguais a $MPE_P = 1.9 \mu\text{m}$ e $MPE_E = 1.9 + 3L/1000 \mu\text{m}$, para L dado em metros quando a máquina é equipada com apalpador TP200 (ISO, 2001). As medições foram feitas em ambiente com $20 \pm 2^\circ \text{C}$ obedecendo as recomendações do fabricante. Também foram tomados os cuidados básicos com relação à limpeza, ao tempo de estabilização e à fixação da peça. Demais cuidados secundários também seguiram as boas práticas de medição.

Características e componentes da Máquina de medir por coordenadas:

- Volume de trabalho de 440 x 490 x 390 mm;
- Velocidade máxima de translado de 350 mm/segundo;
- Cabeçote indexável manual, modelo TESASTAR-i com dois eixos de rotação;
- Sistema CAI utilizado foi o PC-DMIS versão 4.2

A Figura 4.6 mostra a máquina de medir por coordenadas utilizada na medição dos corpos de prova:



Figura 4.6: Máquina de medir por coordenadas.

Para a análise da exatidão geométrica dos corpos de prova, foram realizadas medições de 4 secções de cada corpo de prova. Estas secções são regiões com diferentes curvaturas da peça, posicionadas em relação a altura da peça possibilitando assim avaliar secções com diferentes exigências das estratégias de usinagem.

A Figura 4.7 mostra a distância das secções em relação altura da peça. No lado direito da figura, é mostrado a projeção das linhas sobre a superfície da peça, formando as secções de medição

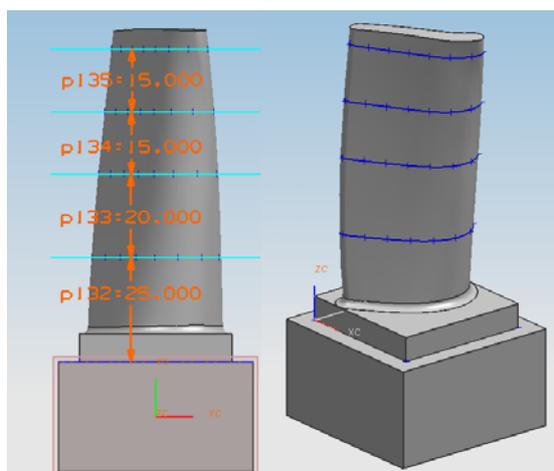


Figura 4.7: Secções de Medição

A Figura 4.8 mostra os pontos de medição que foram criados através de um programa que possibilita a geração de estratégias de medição, este programa é resultante de um trabalho de mestrado [67]. O programa gera pontos a partir de uma curva projetada ou criada em um modelo geométrico CAD, onde o usuário estipula o número de pontos a medir e a estratégia de distribuição sobre a curva de base.

Neste caso, cada curva projetada possui 14 pontos distribuídos uniformemente pelo seu comprimento, totalizando 56 pontos de medição por corpo de prova avaliado.

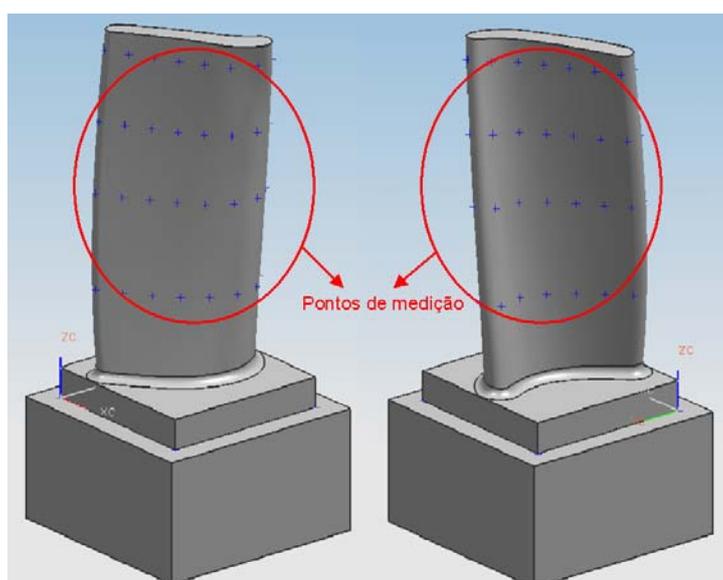


Figura 4.8: Pontos de medição

Esses pontos foram exportados para a máquina de medir por coordenadas. O sentido de aproximação da ponta de medição sobre o ponto medido foi através do vetor normal à superfície da peça, gerado pelo programa, diminuindo assim a influência de erros de medição.

A Figura 4.9 mostra os vetores normais à superfície dos pontos medidos:

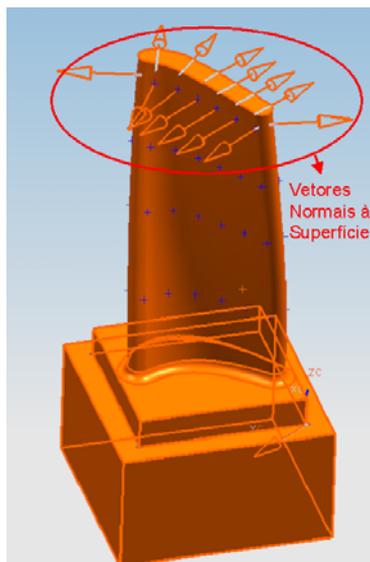


Figura 4.9: Vetores Normais à superfície.

Com os resultados das medições, foi possível comparar a exatidão geométrica dos corpos de prova com modelo CAD, permitindo assim verificar o comportamento de cada estratégia de corte em estudo.

Para a comparação da exatidão geométrica entre cada corpo de prova, foi realizado o cálculo da média do erro geométrico geral de cada corpo de prova através das seguintes etapas:

- Medição dos 56 pontos pré-definidos;
- Em seguida foi realizado o cálculo da distância entre os pontos teóricos (nominais) do modelo CAD e seus respectivos pontos medidos (cálculo do módulo vetorial). As diferenças de cada ponto foram consideradas como erros geométricos;

- Para efeito comparativo, foi calculada a média quadrática geral de erros (valor quadrático médio ou Root Mean Square – RMS) de cada corpo de prova, juntamente com seu valor de máximo erro e mínimo erro;

$$x_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}}$$

- Para a verificação do erro de medição, foi realizada uma análise de repetitividade da máquina de medir por coordenadas, conforme descrito no tópico 5.3 deste trabalho.

4.3 Descrição das operações

Conforme já enunciado serão utilizadas operações de desbaste, pré-acabamento e acabamento. Além disso, em todos os corpos de prova, serão utilizados os mesmos parâmetros de corte para a realização das operações para eliminar o parâmetro de corte como variável do ensaio, pois ela não é o foco de estudo neste trabalho.

A escolha dos parâmetros de corte citados nos itens 4.3.1, 4.3.2 e 4.3.3, baseou-se em catálogos do fabricante das ferramentas utilizadas.

4.3.1 Desbaste

Os parâmetros de corte para as operações de desbaste são as seguintes:

- Velocidade de corte (v_c): 220 m/min;
- Rotação da ferramenta (n): 3.180 rpm;
- Velocidade de avanço (v_f): 636 mm/min;
- Avanço por dente (f_z): 0,1 mm/dente;
- Profundidade de usinagem (a_p): 0.5 mm;
- Penetração de trabalho (a_e): 8,8 mm (40% do diâmetro da ferramenta);

- Sobremetal: 0,5 mm;
- Diâmetro da ferramenta: 22 mm.

4.3.2 Pré-acabamento

Os parâmetros de corte para as operações de pré-acabamento são as seguintes:

- Velocidade de corte (v_c): 315 m/min;
- Rotação da ferramenta (n): 6.270 rpm;
- Velocidade de avanço (v_f): 1.250 mm/min;
- Avanço por dente (f_z): 0,1 mm/dente;
- Penetração de trabalho (a_e): 1 mm;
- Sobremetal: 0,3 mm;
- Diâmetro da ferramenta: 16 mm.

4.3.3 Acabamento

Os parâmetros de corte para as operações de acabamento são as seguintes:

- Velocidade de corte (v_c): 315 m/min;
- Rotação da ferramenta (n): 6.270 rpm;
- Velocidade de avanço (v_f): 1.250 mm/min;
- Avanço por dente (f_z): 0,1mm/dente;
- Penetração de trabalho (a_e): 0,3 mm;
- Diâmetro da ferramenta: 16 mm.

4.4 Descrição das estratégias de corte

As estratégias de corte utilizadas para as operações de desbaste e pré-acabamento e acabamento de algumas partes da peça foram determinadas através da usinagem conhecida como 3+2, onde são realizados movimentos lineares em X, Y e Z para a retirada de material com eixos A e C como eixos indexadores, servindo apenas para o posicionamento de acesso da peça.

A Figura 4.10 mostra a trajetória da ferramenta gerada para a usinagem do desbaste através da estratégia de corte com 3 eixos chamada *Follow Part* com movimentos circulares na entrada e saída da ferramenta na peça.

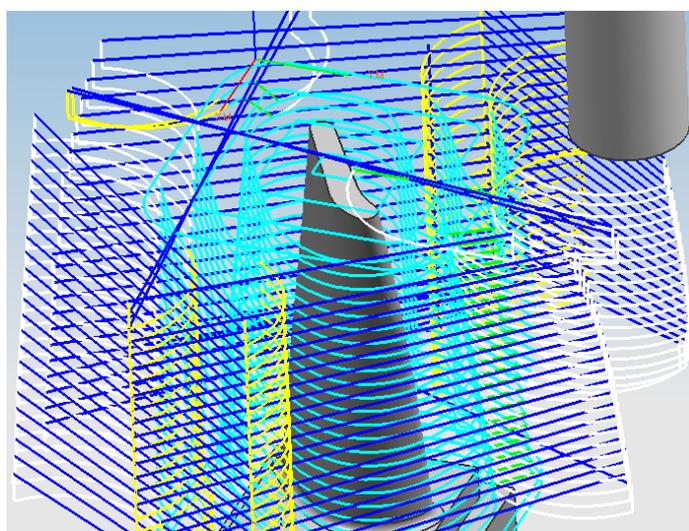


Figura 4.10: Trajetória da ferramenta na operação de desbaste.

O pré-acabamento foi dividido em duas operações, ambas utilizando a estratégia de corte de 3 eixos chamada *Follow Part*. Na primeira parte a peça foi inclinada em um ângulo que permitisse o acesso em toda a sua extensão. Terminada a usinagem desta parte, a peça foi inclinada de modo a permitir o acesso à segunda face, com a mesma inclinação.

A Figura 4.11 mostra as duas operações necessárias para a usinagem do pré-acabamento.

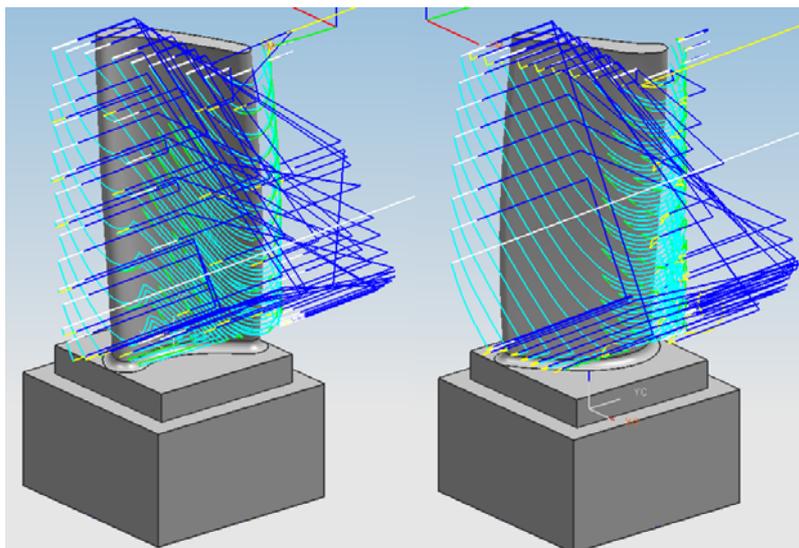


Figura 4.11: Etapas para a usinagem do pré-acabamento.

No acabamento da base (referência para as medições) utilizou-se uma ferramenta de topo reto com diâmetro de 22 mm.

A Figura 4.12 mostra a trajetória da ferramenta gerada para a usinagem de acabamento da base.

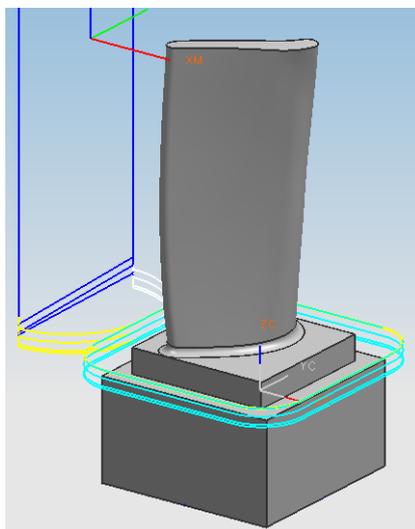


Figura 4.12: Trajetória da ferramenta na operação de acabamento da base (Base para medição).

A operação de acabamento do topo da palheta também utiliza a estratégia de corte *Follow Periphery*, com usinagem em 3 eixos.

A Figura 4.13 mostra a trajetória da ferramenta gerada para a usinagem da operação de acabamento do topo da lâmina.

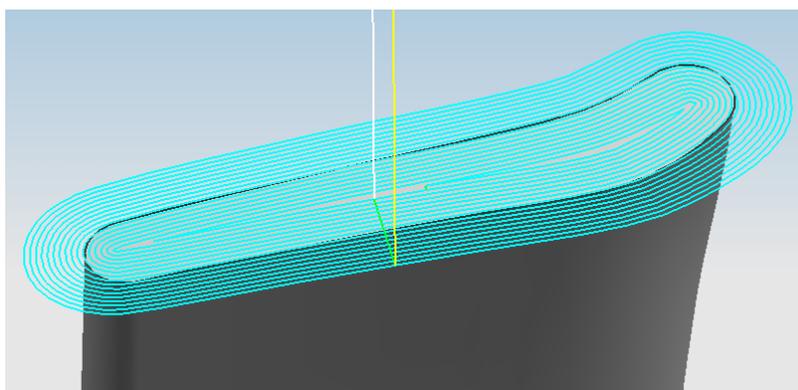


Figura 4.13: Trajetória da ferramenta na operação de acabamento do topo da lâmina.

4.4.1 Estratégias de corte para operações de acabamento.

No acabamento dos corpos de prova o método utilizado na geração da trajetória da ferramenta é o isoparamétrico, e o método de orientação da ferramenta é o da ferramenta inclinada (Sturz). Todas as estratégias de acabamento utilizaram uma tolerância CAM de 0,06 mm.

A diferença entre as estratégias de corte está na superfície em que a ferramenta se guia conhecida como “*drive*”, e também nos movimentos de avanço, que são explicados nos tópicos seguintes.

4.4.1.1 Acabamento com inclinação *Tilt 45°* e com movimento de 360° em relação à peça.

Nesta estratégia de corte, o eixo de rotação C da máquina-ferramenta faz movimentos de 360° , permitindo que a ferramenta gire em torno da peça. A orientação da ferramenta é de 45° com relação ao vetor normal da superfície da peça (palheta).

A Figura 4.14, mostra a trajetória da ferramenta com este tipo de estratégia.

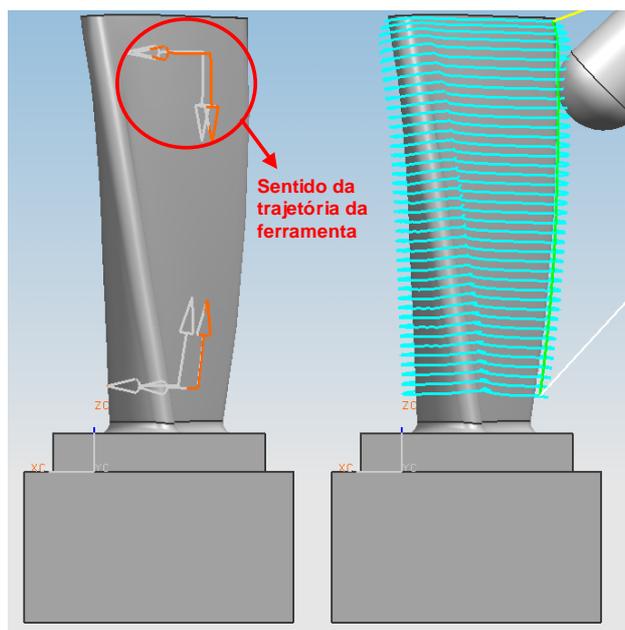


Figura 4.14: Estratégia de corte com inclinação 45° com movimento de 360° .

No lado esquerdo da Figura 4.14, mostra-se a escolha de sentido da trajetória da ferramenta em que o corte é concordante ao avanço da ferramenta. No lado direito da figura está representada a ferramenta com uma inclinação de 45° em relação ao vetor normal da superfície da peça.

Neste tipo de estratégia de corte a velocidade de corte na ponta da ferramenta não tem grande variação, devido à inclinação da ferramenta estar baseada na superfície do modelo geométrico. Conseqüentemente, os movimentos da máquina-ferramenta são mais complexos devido à complexidade da superfície da peça que é utilizada como superfície guia (*drive*) para a geração da trajetória da ferramenta.

4.4.1.2 Acabamento com inclinação *Tilt* 45° e com movimento de 180° em relação à peça.

Nesta estratégia de corte, o eixo de rotação C da máquina-ferramenta fará movimentos de giro de 180° , permitindo que a ferramenta realize o acabamento em apenas um lado da peça. Assim, são necessárias duas etapas para o acabamento total da peça. A orientação da ferramenta é de 45° em relação ao vetor normal da superfície da peça.

A Figura 4.15, mostra a trajetória da ferramenta com este tipo de estratégia.

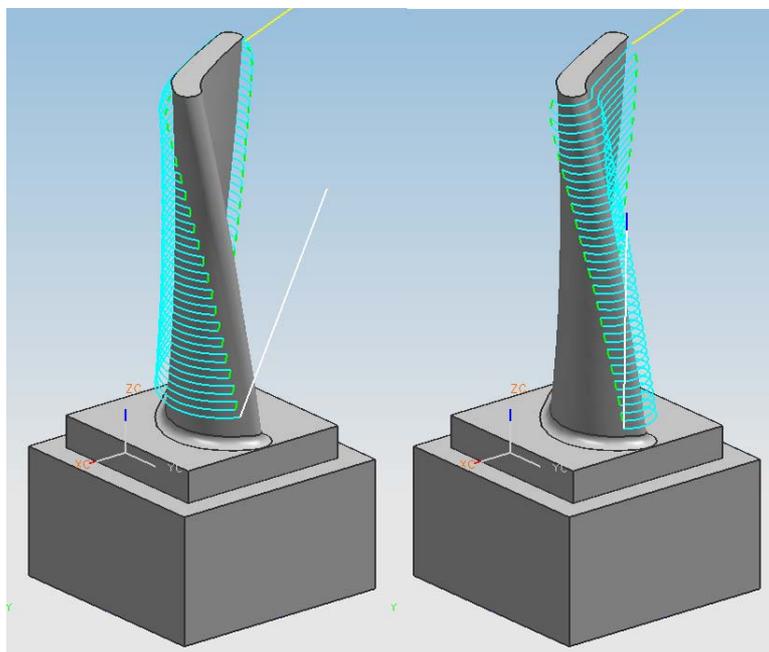


Figura 4.15: Estratégia de corte com inclinação 45° com movimento de 180° .

Neste tipo de estratégia de corte a inclinação da ferramenta estará sempre baseada na superfície do modelo geométrico. O sentido do caminho da ferramenta é *Zig-Zag*. Neste caso, tem o corte concordante e discordante em relação ao avanço da ferramenta.

A velocidade de corte na ponta da ferramenta não tem grande variação, mas os movimentos da máquina-ferramenta são mais complexos. Porém, com movimentos de *Zig-Zag* em comparação com a estratégia anterior.

4.4.1.3 Acabamento com inclinação *Tilt* 45° em relação a uma superfície externa à peça e com movimento de 360° .

Nesta estratégia de corte o eixo de rotação C da máquina-ferramenta faz movimentos de 360° , permitindo que a ferramenta gire em torno da peça com sentido de corte concordante ao avanço da ferramenta. A orientação da ferramenta é de 45° com relação ao vetor normal de uma superfície externa à peça, que neste caso é um cilindro.

O cilindro foi escolhido como “drive” (superfície guia) para a geração da trajetória da ferramenta devido a sua forma geométrica simples e uniforme. Portanto, tende a gerar a trajetória da ferramenta mais simplificada.

A Figura 4.16 mostra a superfície externa à peça com formato de cilindro, criada para a realização desta estratégia.

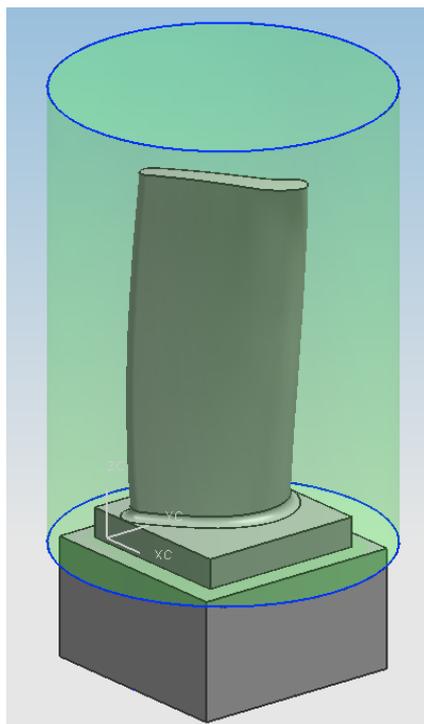


Figura 4.16: Superfície externa à peça, formato de cilindro.

A Figura 4.17 mostra a trajetória da ferramenta gerada através da utilização de uma superfície externa à peça.

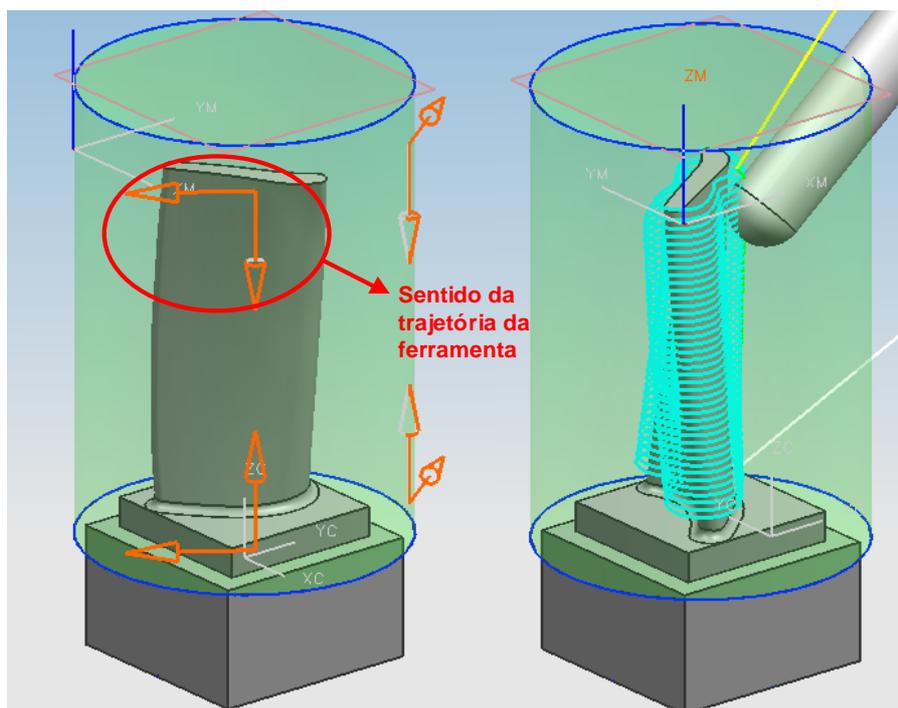


Figura 4.17: Estratégia de corte com inclinação 45° em relação a superfície externa à peça com movimento de 360° .

Neste tipo de estratégia de corte a inclinação da ferramenta é baseada na superfície externa à peça, neste caso um cilindro. Os movimentos da máquina-ferramenta são menos complexos, mas a velocidade de corte na ponta da ferramenta possui maior variação.

4.4.1.4 Acabamento com inclinação *Tilt* 45° em relação a uma superfície externa à peça e com movimento de 180° .

Nesta estratégia de corte o eixo de rotação C da máquina-ferramenta faz movimentos de 180° , permitindo que a ferramenta realize o acabamento em apenas um lado da peça. Por isso, são necessárias duas etapas para o acabamento total da peça. A orientação da ferramenta é de 45° com relação ao vetor normal de uma superfície externa que neste caso também é o cilindro da estratégia anterior, porém, com movimentos de Zig-Zag.

A Figura 4.18 mostra a trajetória da ferramenta gerada através da utilização de uma superfície externa à peça.

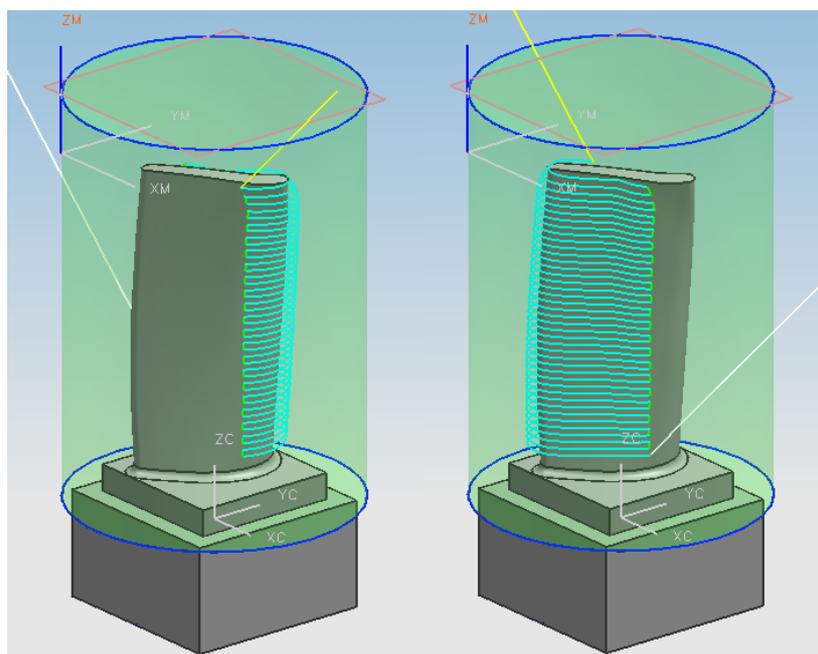


Figura 4.18: Estratégia de corte com inclinação 45° em relação a superfície externa à peça com movimento de 180°.

Nesta estratégia de corte, a inclinação da ferramenta é baseada na superfície externa à peça, neste caso um cilindro. O sentido do caminho da ferramenta é *Zig-Zag*, ou seja, terá o corte concordante e discordante em relação ao avanço da ferramenta.

Nesta estratégia os movimentos da máquina-ferramenta são menos complexos, mas a velocidade de corte na ponta da ferramenta possui maior variação, porém, com movimentos de avanço *Zig-Zag*.

4.4.2 Simulação das estratégias de corte

Para verificar eventuais problemas na programação CAM, como erros de trajetória da ferramenta e possíveis colisões da máquina-ferramenta, foi realizada a simulação virtual da máquina-ferramenta em de todas as operações de usinagem do experimento.

O modelo geométrico da máquina virtual junto com o controle numérico virtual (VNC) foi cedido gentilmente pela equipe do CCM – Centro de Competência a Manufatura, onde posteriormente foram realizados os experimentos de usinagem do corpo de prova na máquina-ferramenta real.

A simulação permitiu verificação do comportamento da máquina-ferramenta em relação às operações de desbaste, pré-acabamento e acabamento. Além disso, auxiliou nos ajustes das operações de acabamento com 5 eixos tais como, por exemplo, os movimentos da ferramenta em vazio, os movimentos de entrada e saída da ferramenta, o posicionamento da peça e os limites de movimento da máquina-ferramenta.

A Figura 4.19 mostra um exemplo de simulação do corpo de prova com máquina-ferramenta virtual.

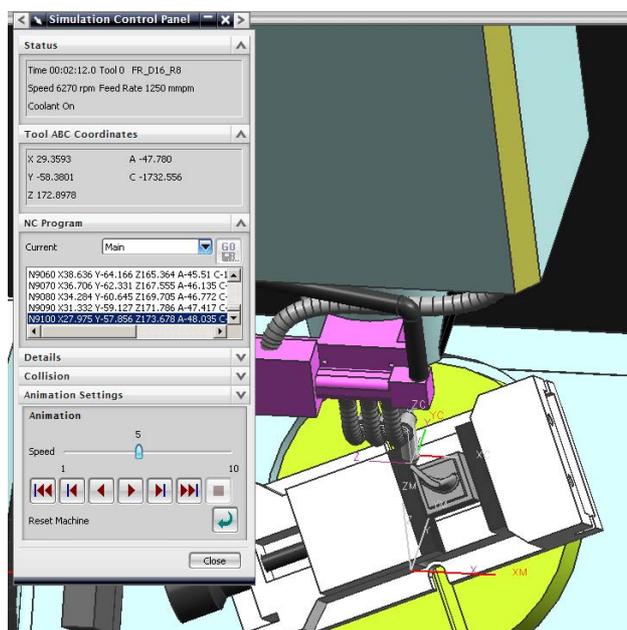


Figura 4.19: Simulação do corpo de prova com máquina-ferramenta virtual.

Após a realização da simulação com máquina-ferramenta virtual verificada a inexistência de problemas da programação CAM, foi realizado o pós-processamento de todas as operações para a realização dos experimentos.

O pós-processamento efetuou a tradução das coordenadas de movimento da trajetória da ferramenta, gerada pelo sistema CAM, na linguagem que o comando numérico entenda e transmita as coordenadas para todos os 5 eixos da máquina ferramenta, como mostra o modo 1 relatado no tópico 2.10 deste trabalho.

Nos programas NC das operações de acabamento (foco desse trabalho) que utilizam o fresamento com 5 eixos, a função do comando numérico Siemens 840D chamada *TRAORI* foi ativada. Essa função permite que a peça possa ser fixada em qualquer ponto da mesa da máquina-ferramenta, pois essa função faz com que o controlador da máquina-ferramenta ajuste a posição da peça durante a execução do programa NC.

4.5 Pré-Testes

Para a confirmação da inexistência de problemas relacionados a trajetória da ferramenta, foram realizados pré-testes de usinagem em resina de poliuretano.

Com eles pôde-se observar a eficácia da simulação virtual da máquina-ferramenta, visto que não ocorreram problemas de colisão da máquina-ferramenta.

Nestes pré-testes, os parâmetros de corte foram alterados para que os programas fossem breves. O avanço por dente foi alterado para 0,3 mm e a penetração de trabalho foi alterada para 0,6 mm.

A Figura 4.20 abaixo ilustra o pré-teste de usinagem:

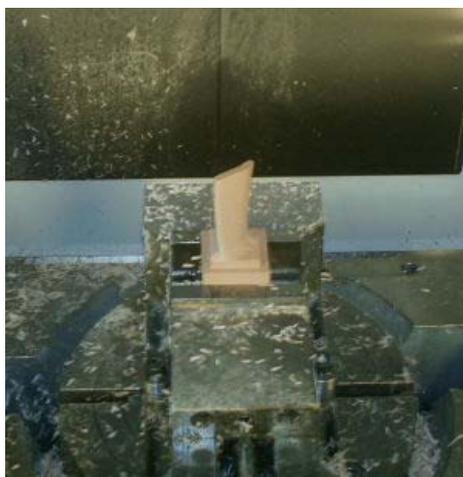


Figura 4.20: Usinagem em resina de poliuretano (pré-testes)

5. Análise dos resultados

Conforme já discutido, os experimentos foram realizados com o intuito de analisar diferentes tipos de estratégias de corte no fresamento com 5 eixos, com corpos de

prova usinados em um único tipo de material. Para cada operação de acabamento foi trocada a pastilha de corte por uma nova pastilha, evitando que os resultados dos experimentos sejam influenciados pelo desgaste da ferramenta e pelo tipo de material do corpo de prova.

Para a realização e identificação das estratégias de corte no fresamento com 5 eixos, os nomes das estratégias de corte relatadas neste trabalho foram substituídos por sua abreviações.

Os nomes das estratégias e suas abreviações:

- Acabamento com inclinação *Tilt* 45° com movimento de 360° em relação à peça, tópico 4.4.1.1 deste trabalho foi substituído por *360° Peça*;
- Acabamento com inclinação *Tilt* 45° com movimento de 180° em relação à peça, tópico 4.4.1.2 deste trabalho foi substituído por *180° Peça*;
- Acabamento com inclinação *Tilt* 45° em relação a uma superfície externa à peça com movimentos de 360°, tópico 4.4.1.3 deste trabalho foi substituído por *360° Externa*;
- Acabamento com inclinação *Tilt* 45° em relação a uma superfície externa à peça com movimentos de 180°, tópico 4.4.1.4 deste trabalho foi substituído por *180° Externa*.

Neste capítulo serão descritas as análises das estratégias de corte, considerando o tempo de usinagem, a qualidade superficial e exatidão geométrica.

5.1 Tempo de Usinagem

Os tempos de usinagem foram tomados através de um cronometro a partir do início e término de cada operação de acabamento representado por cada corpo de prova, incluindo os tempos de usinagem em vazio.

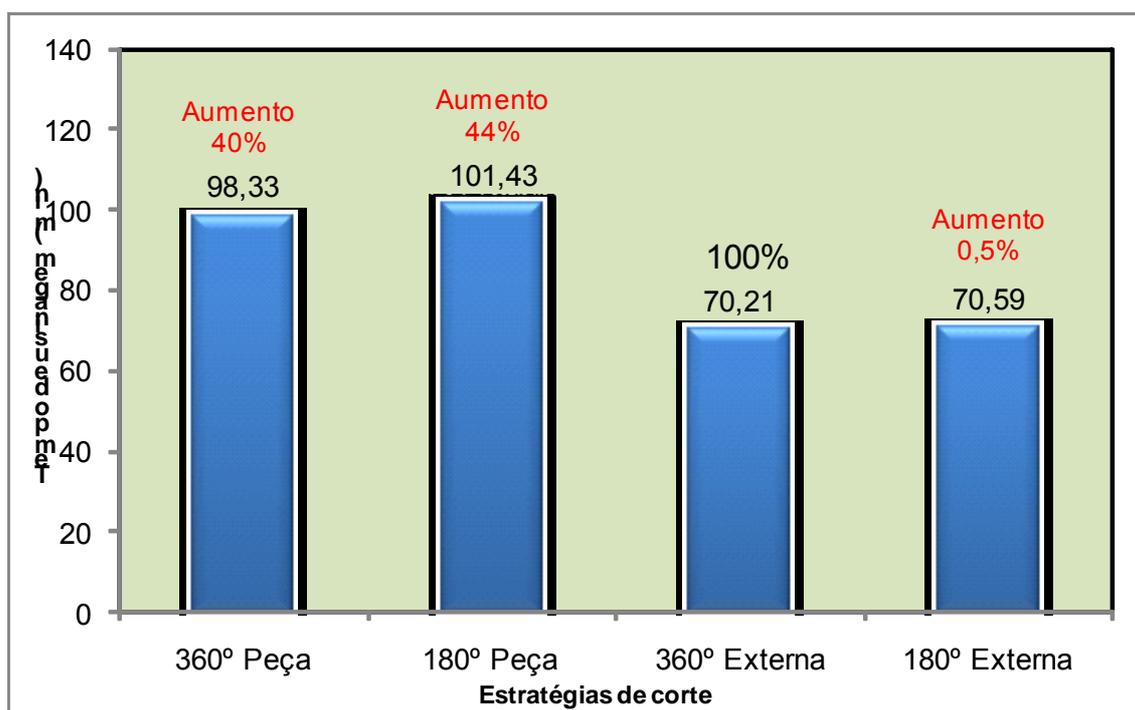


Figura 5.1: Gráfico de comparação de tempos de usinagem

A Figura 5.1 mostra os tempos de usinagem (min) obtidos nos experimentos, para efeito comparativo entre as estratégias de corte, a estratégia *360° Externa* foi tomada como referência por possuir o menor tempo de usinagem.

As estratégias de corte *360° Externa* e *180° Externa* geraram os menores tempos de usinagem em relação às estratégias *360° Peça* e *180° Peça*. Através dos experimentos pode-se observar que:

- As estratégias baseadas em uma superfície externa como a de um cilindro (*360° Externa* e *180° Externa*) possui uma trajetória de ferramenta de menor complexidade, devido a menor movimentação dos eixos de rotação (4 eixos simultâneos + 1 eixo posicionador);
- A adoção de uma superfície externa simples como um cilindro permitiu a geração de uma trajetória mais suave, quando comparada às estratégias *360° Peça* e *180° Peça* com base na superfície do modelo geométrico a ser usinado.

Portanto, as estratégias com base em uma superfície externa (cilindro) obtiveram melhor desempenho com relação ao tempo de usinagem.

O cilindro, por possuir uma geometria simples e uniforme proporcionou trajetórias simplificadas para a ferramenta, utilizando o eixo A apenas como eixo posicionador.

A utilização da superfície complexa do modelo CAD como guia para a ferramenta, proporcionou trajetórias complexas para a ferramenta, gerando movimentos nos eixos de rotação em toda a operação de acabamento

5.2 Qualidade Superficial

Para a análise da qualidade superficial, foram realizadas medições de rugosidade de 4 áreas consideradas críticas de cada corpo de prova, como descrito no tópico 4.1.5.

A Tabela 5.1 (a), (b), (c), e (d) mostram os valores de rugosidade obtidos em cada uma das estratégias de corte. Para efeito comparativo, o resultado a ser considerado é a média aritmética e seu desvio padrão das 4 regiões de cada corpo de prova, que representam as 4 estratégias de corte em estudo.

Tabela 5.1 (a), (b), (c) e (d): Valores de rugosidade Ra (μm).

(a)

180° Externa	
Região	Valor rugosidade Ra (μm)
1	1
	1,27
	0,86
	0,76
2	0,81
	0,65
	0,89
	1,12
3	1,72
	1,27
	0,93
	1,63
4	0,83
	1,05
	1,14
	0,82

(b)

360° Externa	
Região	Valor rugosidade Ra (μm)
1	0,76
	0,67
	0,55
	0,77
2	0,46
	0,61
	0,96
	0,56
3	1,22
	1,03
	1,11
	1,43
4	0,7
	0,77
	0,66
	0,72

(c)

180° Peça	
Região	Valor rugosidade Ra (μm)
1	1,01
	1,11
	1,19
	1,03
2	0,53
	0,59
	0,43
	0,44
3	1,1
	1,37
	1,33
	1,22
4	1,47
	1,62
	1,55
	1,7

(d)

360° Peça	
Região	Valor rugosidade Ra (μm)
1	0,75
	1
	1,07
	1,01
2	1,55
	1,25
	1,34
	1,11
3	1,72
	1,6
	1,12
	1,78
4	0,89
	0,86
	0,85
	0,84

Para análise dos dados, considerou-se a realização de um experimento fatorial com dois fatores e quatro níveis cada fator, de acordo com a tabela:

Tabela 5.2: Fatores e Níveis.

Fatores	Níveis
Peça	180° Externa
	180° Peça
	360° Externa
	360° Peça
Região	1
	2
	3
	4

Primeiramente, podemos verificar um resumo dos dados obtendo os seguintes resultados:

Tabela 5.3: Resumo dos dados obtidos.

Peças	Regiões	Medidas	
180° Externa:16	1:16	Valor Mínimo	0.43 μm
180° Peça:16	2:16	1st Quadrante	0.77 μm
360° Externa:16	3:16	Mediana	1.01 μm
360° Peça:16	4:16	Média	1.03 μm
		3rd Quadrante	1.25 μm
		Valor Máximo	1.78 μm

Os resultados mostram que existem 16 dados para cada nível de cada fator. A coluna Medidas mostra algumas medidas estatísticas dos valores medidos.

Explorando pouco mais as médias, temos:

Tabela 5.4: Média das regiões em cada peça

	Região 1	Região 2	Região 3	Região 4
180° Externa	0,97 μm	0,87 μm	1,39 μm	0,96 μm
180° Peça	1,08 μm	0,50 μm	1,25 μm	1,58 μm
360° Externa	0,69 μm	0,65 μm	1,20 μm	0,71 μm
360° Peça	0,96 μm	1,31 μm	1,55 μm	0,86 μm

Os resultados da Tabela 5.4 mostram os valores medidos, quando consideramos a cada uma das peças para cada uma das regiões medidas. Por exemplo, considerando a peça *180° Externa* e a região 1, temos que o valor médio das medições é de $0,97 \mu\text{m}$, e se considerarmos a mesma peça, porém a região 3, temos que a média das medições é de $1,39 \mu\text{m}$. A mesma análise é entendida para as demais peças.

Podemos explorar também os desvios padrão para o cruzamento dos fatores, da seguinte forma:

Tabela 5.5: Desvio Padrão das regiões em cada peça.

	Região 1	Região 2	Região 3	Região 4
180° Externa	$0,22 \mu\text{m}$	$0,20 \mu\text{m}$	$0,36 \mu\text{m}$	$0,16 \mu\text{m}$
180° Peça	$0,08 \mu\text{m}$	$0,08 \mu\text{m}$	$0,12 \mu\text{m}$	$0,10 \mu\text{m}$
360° Externa	$0,10 \mu\text{m}$	$0,22 \mu\text{m}$	$0,17 \mu\text{m}$	$0,05 \mu\text{m}$
360° Peça	$0,14 \mu\text{m}$	$0,18 \mu\text{m}$	$0,30 \mu\text{m}$	$0,02 \mu\text{m}$

Na Tabela 5.5, a interpretação dos resultados para o desvio padrão é análogo ao da média, por exemplo, o desvio padrão da peça *180° Peça* na região 3 é de $0,12 \mu\text{m}$ e assim sucessivamente com as demais peças e regiões.

Podemos também, avaliar a média geral e o desvio padrão geral de cada uma das peças, da seguinte forma:

Tabela 5.6: Média Geral de cada peça.

	180° Externa	180° Peça	360° Externa	360° Peça
Média Geral	$1,05 \mu\text{m}$	$1,10 \mu\text{m}$	$0,81 \mu\text{m}$	$1,17 \mu\text{m}$

Nota-se que a peça que apresenta menores valores medidos é a *360° Externa*. Vamos avaliar agora o desvio padrão geral das peças, da seguinte forma:

Tabela 5.7: Desvio Padrão Geral de cada peça.

	180° Externa	180° Peça	360° Externa	360° Peça
Desvio Padrão Geral	$0,30 \mu\text{m}$	$0,41 \mu\text{m}$	$0,27 \mu\text{m}$	$0,33 \mu\text{m}$

Nota-se que a peça que apresenta menor desvio padrão também é a peça *360° Externa*.

Desta forma, em uma análise superficial e considerando apenas a media geral e desvio padrão geral das peças, a peça *360° Externa* pode ser considerada a melhor dentre todas as peças avaliadas.

Podemos fazer a mesma análise com as regiões de medição, da seguinte forma:

Tabela 5.8: Média de cada região medida.

Região	1	2	3	4
Média	0,92 μm	0,83 μm	1,35 μm	1,03 μm

Na Tabela 5.8 nota-se que a região que apresenta menores valores medidos é a 2. Avaliando o desvio padrão das regiões da seguinte forma temos:

Tabela 5.9: Desvio Padrão das regiões medidas.

Região	1	2	3	4
Desvio Padrão	0,20 μm	0,35 μm	0,27 μm	0,35 μm

Apesar da região 2 apresentar o menor valor medido (Tabela 5.8), ela apresenta uma das maiores variabilidades (Tabela 5.9), desta forma, as conclusões dependem de uma análise de variância, para verificar se a variabilidade entre as regiões é significativa em nível de 5% ou não.

Antes da análise de variância, vamos verificar se existe interação entre os fatores, da seguinte forma:

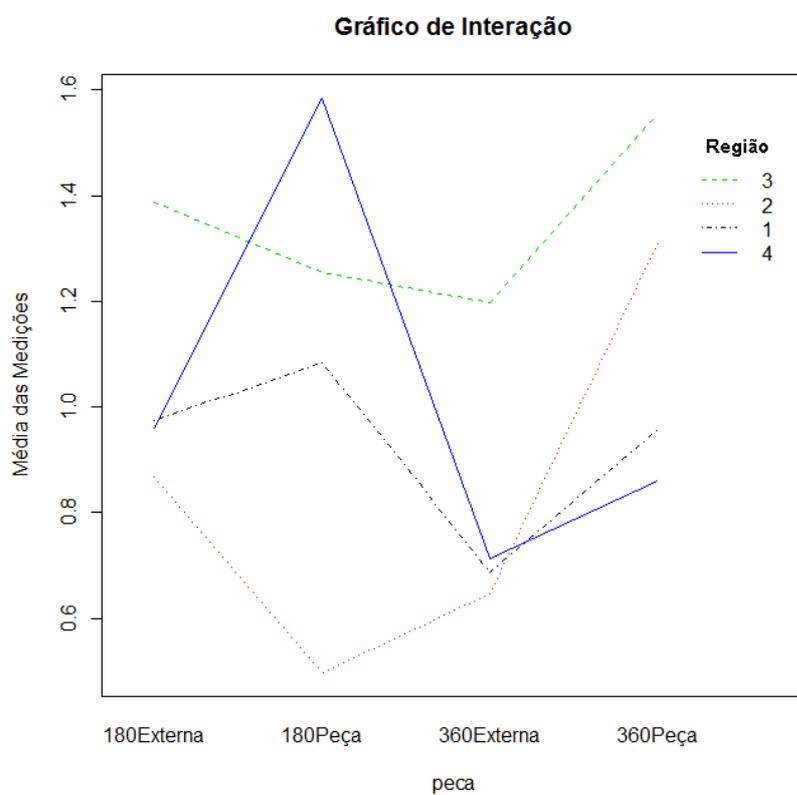
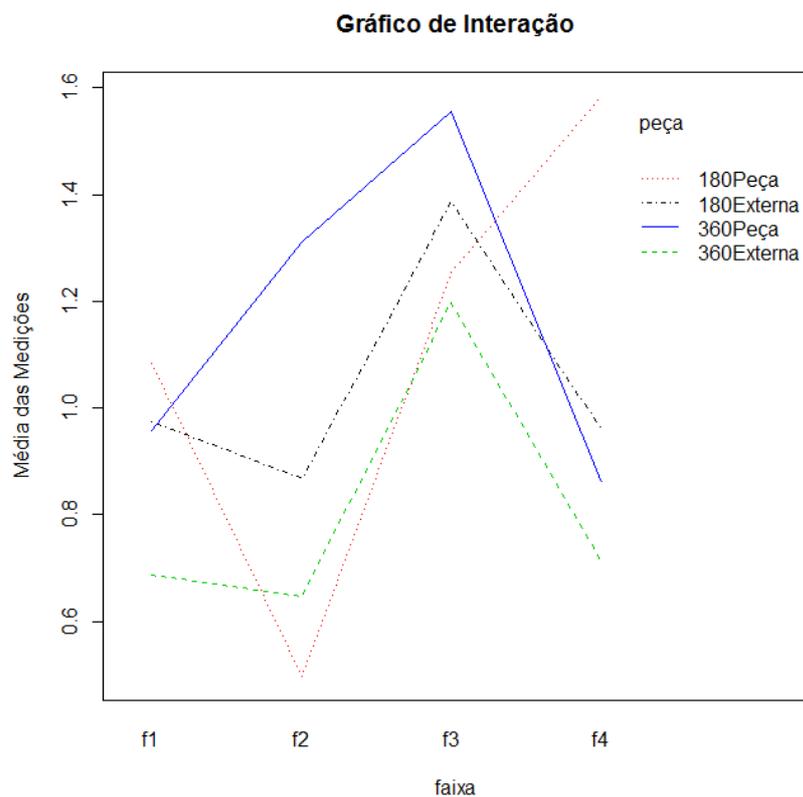


Figura 5.2: Gráficos de Interação

Verifica-se no gráfico que existe interação entre os níveis das peças e os níveis das regiões e vice-versa.

A análise de variância pode ser realizada da seguinte forma:

	Grau de Liberdade	Soma Quadrado	Quadrado Médio	Estatística F	P-valor
Peças	3	1.18001	0.39334	12.2222	4.605e ⁻⁰⁶ ***
Regiões	3	2.43106	0.81035	25.1801	6.226e ⁻¹⁰ ***
Peças Regiões	9	2.74688	0.30521	9.4837	4.040e ⁻⁰⁸ ***
Resíduos	48	1.54475	0.03218		

Níveis de Significância: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

A análise de variância mostra que tanto os fatores individualmente (Peças e Regiões) como a interação entre estes fatores são significativos ao nível 0%, ou seja, tanto a peça quanto a região medida, e especialmente a interação entre as diferentes peças e regiões provocam grande variabilidade nos valores medidos, confirmando o resultado observado nos gráficos de interação.

Para verificar a qualidade do modelo ajustado na análise de variância é preciso realizar uma análise de resíduos. A forma mais usual desta análise é gráfica.

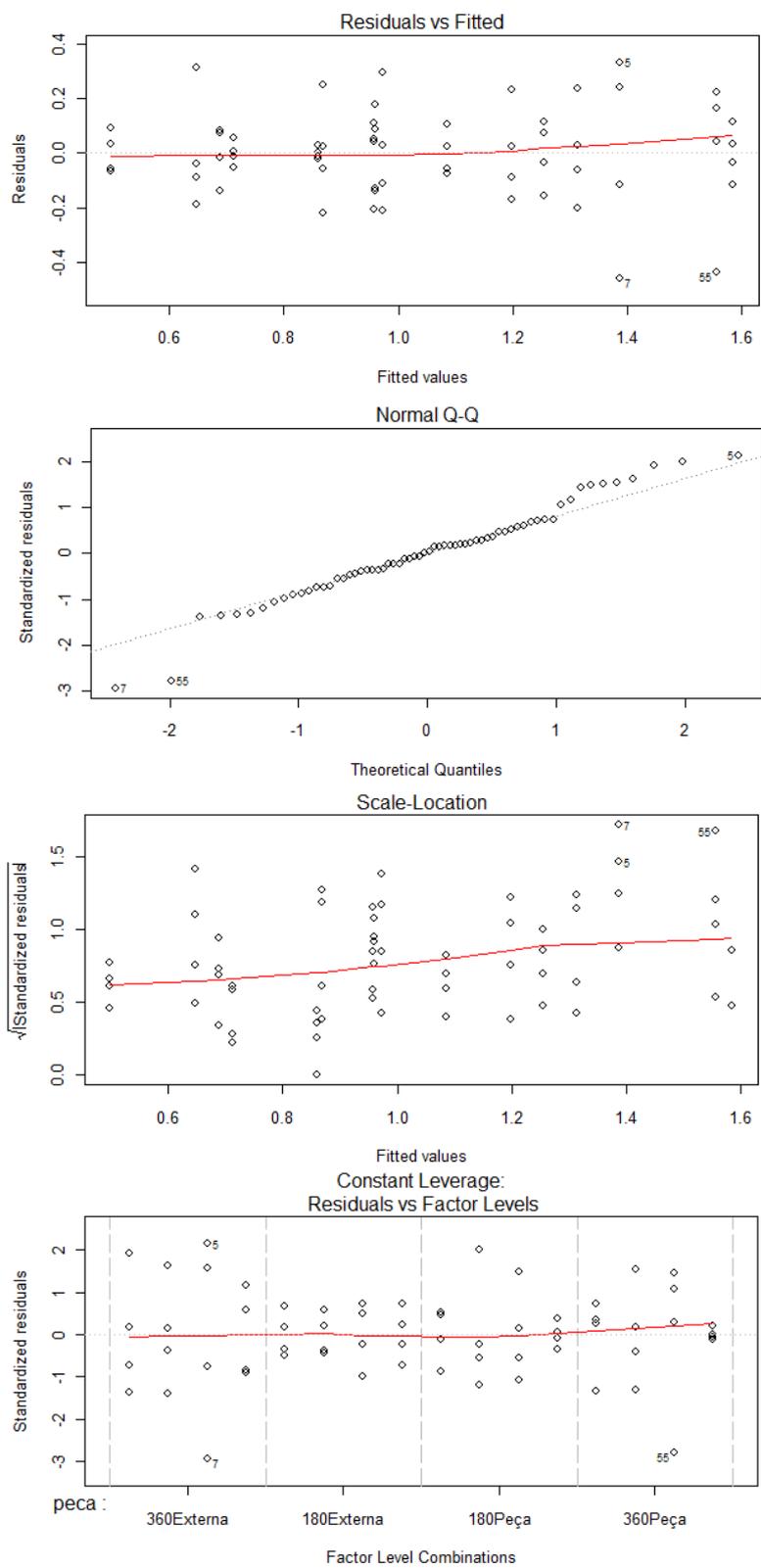


Figura 5.3: Análise de resíduos.

Na Figura 5.3, observa-se no primeiro gráfico (*Residuals vs Fitted*) que os resíduos possuem média zero. O gráfico Normal Q-Q indica que os resíduos têm distribuição Normal. O terceiro gráfico (*Scale-Location*) mostra que as variâncias podem ser consideradas constantes, pois os valores medidos estão distribuídos de forma aleatória, apesar de alguns valores discrepantes. Estes três gráficos permitem verificar que a condição básica de que os resíduos devem ter distribuição normal, média zero e variância constante foram atendidos. O último gráfico (*Constant Leverage: Residuals vs Factor Levels*) mostra que os valores discrepantes correspondem a medições observadas nas peças *360° Externa* e *360° Peça*.

Realizou-se um teste de normalidade para confirmar numericamente que os resíduos realmente possuem distribuição normal [68].

Teste de Normalidade Shapiro-Wilk

W = 0.9717, P-valor = 0.1478

Como o P-valor é maior que 0,05 dizemos que os resíduos possuem distribuição normal.

Quando as interações dos fatores são significativas, é possível desdobrar as interações e verificar quais níveis dos fatores são realmente significativos.

Tabela 5.10: Análise de variância dos níveis.

	Grau de Liberdade	Soma Quadrado	Quadrado Médio	Estatística F	P-valor
Peças	3	1.1800	0.3933	12.2222	4.605e-06 ***
Peças: Regiões	12	5.1779	0.4315	13.4078	1.606e-11 ***
Peças: Regiões: 180° Externa	1	0.1716	0.1716	5.3322	0.02528 *
Peças: Regiões: 180° Peça	1	1.9724	1.9724	61.2869	4.002e-10 ***
Peças: Regiões: 360° Externa	1	0.1430	0.1430	4.4437	0.04028 *
Peças: Regiões: 360° Peça	1	0.1064	0.1064	3.3064	0.07525
Resíduos		48 1.5447	0.0322		

Níveis de Significância: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Verifica-se nos resultados da Tabela 5.10 que somente as medições referentes à peça 360° Peça apresenta variabilidade significativa, devido às diferentes regiões.

Verificou-se também a variabilidade nas regiões devido a interação com as peças, da seguinte forma:

Tabela 5.11: Análise de variabilidade das regiões.

	Grau de Liberdade	Soma Quadrado	Quadrado Médio	Estatística F	P-valor
Regiões	3	2.4311	0.8104	25.1801	6.226e-10 ***
Regiões: Peças	12	3.9269	0.3272	10.1683	1.611e-09 ***
Regiões: Peças: 1	1	0.1355	0.1355	4.2094	0.04568 *
Regiões: Peças: 2	1	0.5941	0.5941	18.4597	8.420e-05 ***
Regiões: Peças: 3	1	0.0469	0.0469	1.4565	0.23339
Regiões: Peças: 4	1	1.6465	1.6465	51.1617	4.290e-09 ***
Resíduos	48	1.5448	0.0322		

Níveis de Significância: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '.' 1

A Tabela 5.11 mostra que somente as medições referentes a região 3 não apresenta variabilidade significativa, devido às diferentes peças.

Considerando que a variável medida é rugosidade, interessa as medições cujos valores são menores. Verificado que a interação entre Peça e Região é significativa, os dados a seguir mostram os valores da média global, a média das peças, das regiões e as médias da interação entre peça e região.

Tabela 5.12: Médias Global, Peças e Regiões

Médias				
Média Global	Peças		Regiões	
1.03 μm	180° Externa	1,05 μm	1	0,92 μm
	180° Peça	1,10 μm	2	0,83 μm
	360° Externa	0,81 μm	3	1,35 μm
	360° Peça	1,17 μm	4	1,03 μm

Através da Tabela 5.12 observa-se que a peça *360° Externa* apresenta menor rugosidade e a região 2 possibilita menor valor de rugosidade.

Tabela 5.13: Médias da interação entre peça e região.

	Regiões			
Peças	1	2	3	4
180° Externa	0,97 μm	0,87 μm	1,39 μm	0,96 μm
180° Peça	1,08 μm	0,50 μm	1,25 μm	1,58 μm
360° Externa	0,69 μm	0,65 μm	1,20 μm	0,71 μm
360° Peça	0,96 μm	1,31 μm	1,55 μm	0,86 μm

Considerando a interação peça e região (já verificada significativa na análise de variância), a peça *360° Externa* apresenta menor valor de rugosidade, portanto, pode-se dizer que a estratégia de usinagem usada nesta peça pode ser considerada como a melhor estratégia na análise de rugosidade.

Além da medição de rugosidade superficial, foi realizada uma comparação de aspecto superficial de cada face dos corpos de prova.

A Figura 5.4 mostra as faces côncavas e convexas dos corpos de prova com seus detalhes característicos dos aspectos superficiais deixados pelas diferentes estratégias.

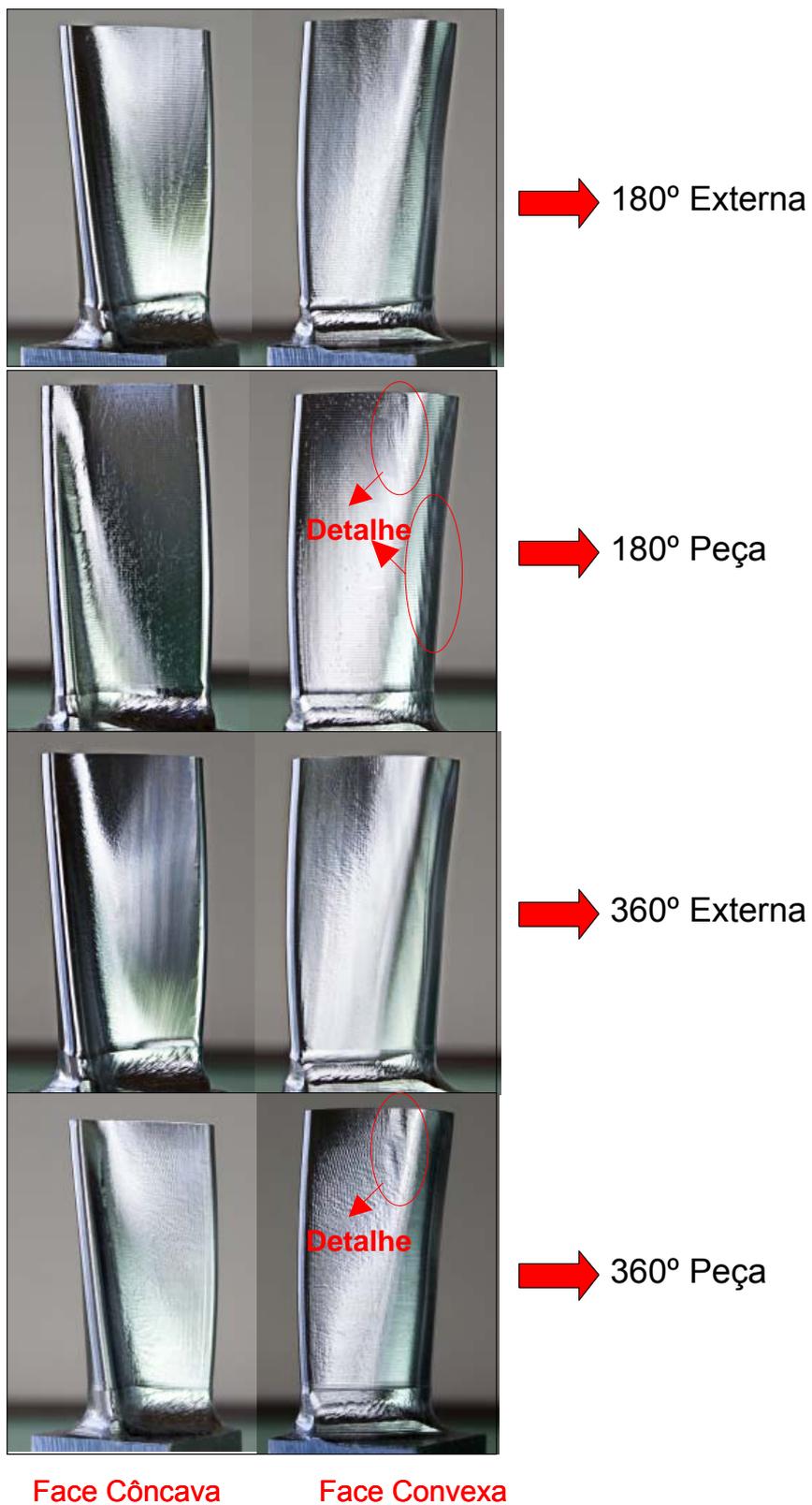


Figura 5.4 Aspecto superficial dos corpos de prova.

A Figura 5.5 mostra a textura da superfície dos corpos de prova ampliada em 10x através de um microscópio

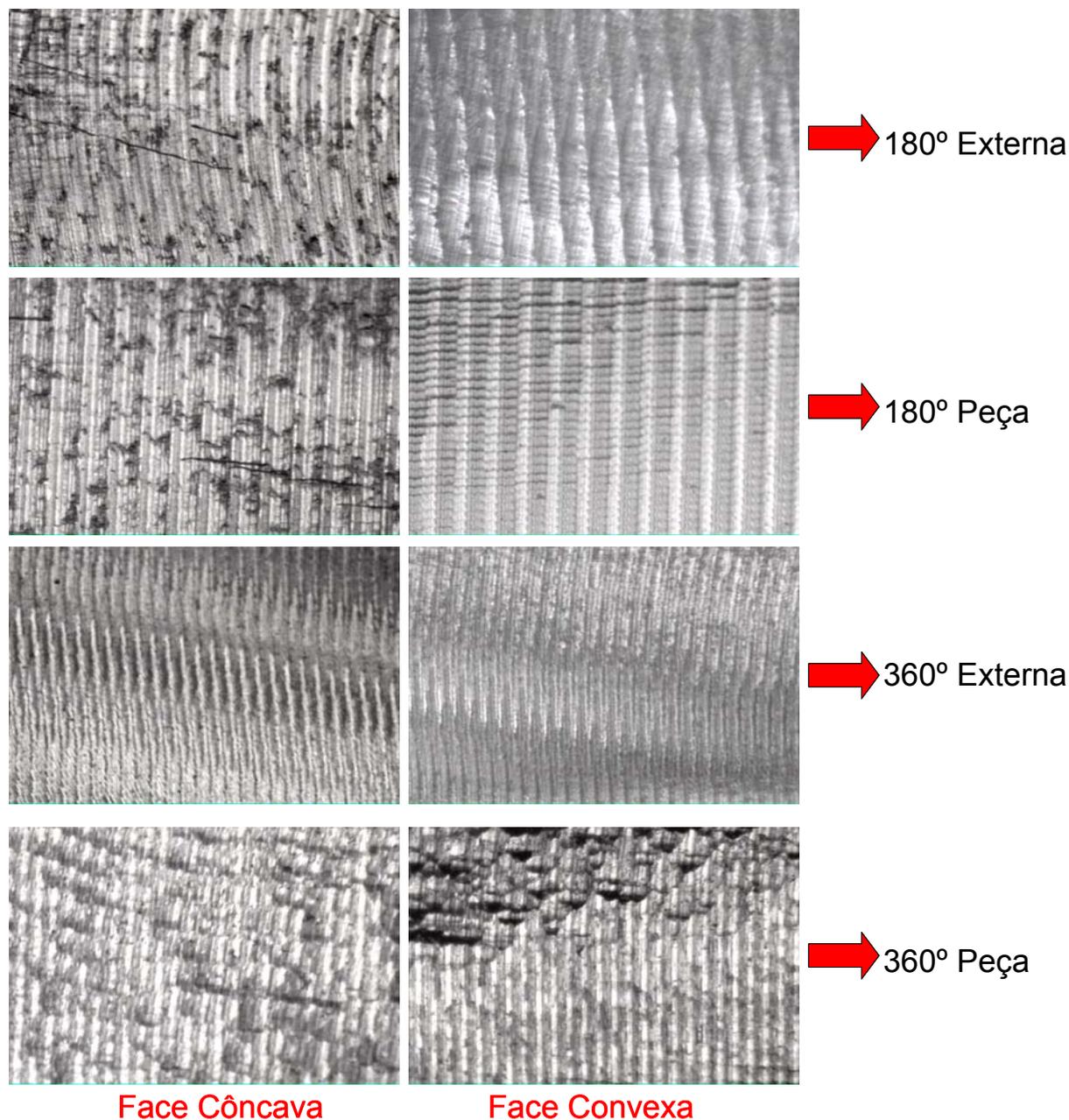


Figura 5.5 Textura da superfície dos corpos de prova, aumento em 10 x.

A estratégia *180° Externa* mostra uma uniformidade dos sulcos da superfície usinada, a variação de velocidade na ponta da ferramenta não apresentou influência expressiva sobre a textura superficial do corpo de prova. No entanto, o movimento *Zig-Zag* da

ferramenta produziu sulcos de maior largura comparados com a estratégia *360° Externa*, como pôde ser observada na Figura 5.5.

A estratégia *180° Peça* mostra uma uniformidade dos sulcos da superfície usinada semelhante a da estratégia *180° Externa*, o movimento *Zig-Zag* da ferramenta também produziu sulcos de maior largura comparada com a estratégia *360° Externa*, como mostra a Figura 5.5. Porém essa estratégia apresentou facetamento e deformação, como ilustrado no detalhe da face convexa da estratégia *180° Peça* na Figura 5.4

A estratégia *360° Externa* demonstrou uma maior uniformidade dos sulcos da superfície usinada comparada as outras estratégias, como mostra a Figura 5.5, a variação de velocidade na ponta da ferramenta também não apresentou influência expressiva sobre a textura superficial do corpo de prova.

Por possuir apenas movimentos concordantes, a estratégia *360° Externa* produziu sulcos de menor largura comparada com as estratégias *180° Externa* e *180° Peça*, como mostra a Figura 5.5.

A estratégia *360° Peça* demonstrou uma pior uniformidade dos sulcos da superfície usinada comparada às outras estratégias.

Na Figura 5.4, o detalhe da face convexa da estratégia *360° Peça* mostra as deformações causadas por essa estratégia de corte.

Na comparação do aspecto superficial de cada estratégia de corte pode-se observar que:

- As estratégias com base em uma superfície externa, *360° Externa* e *180° Externa* respectivamente, obtiveram melhores aspectos superficiais;
- A variação de velocidade de corte na ponta da ferramenta não apresentou efeito expressivo sobre o aspecto superficial. A estratégia *360° Externa* gerou o melhor aspecto superficial, seguida pela estratégia *180° Externa* que possui a mesma característica;

- A escolha da superfície guia (*Drive surface*) para a geração da trajetória da ferramenta de cada estratégia de corte apresentou grande influência nos resultados. Pode-se verificar esta influência quando se compara a estratégia de corte de melhor aspecto superficial (*360° Externa*) e a estratégia de corte com pior aspecto superficial (*360° Peça*);
- Os movimentos de *Zig-Zag* da ferramenta, na estratégia de corte *180° Externa*, gerou uma pior textura superficial em relação a estratégia *360° Externa* com características semelhantes. Porém, na estratégia *180° Peça* os movimentos de *Zig-Zag* da ferramenta geraram uma textura superficial melhor em relação a estratégia *360° Peça* que possui características semelhantes

Vale salientar que as estratégias de corte que utilizaram a superfície do modelo geométrico CAD como superfície guia (*Drive surface*), são muito dependentes da qualidade superficial desse modelo geométrico. Portanto, influenciam na qualidade e rugosidade superficial final da peça usinada.

A Figura 5.6 e Figura 5.7 mostram alguns problemas de qualidade superficial que foram notados após a realização e análise dos experimentos:

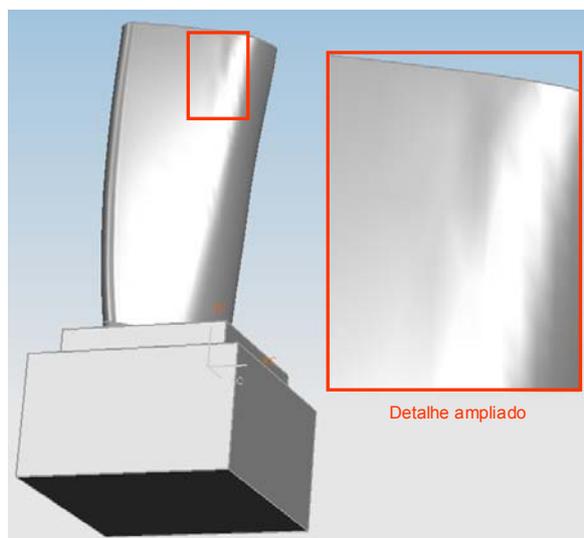


Figura 5.6: Problema de qualidade superficial

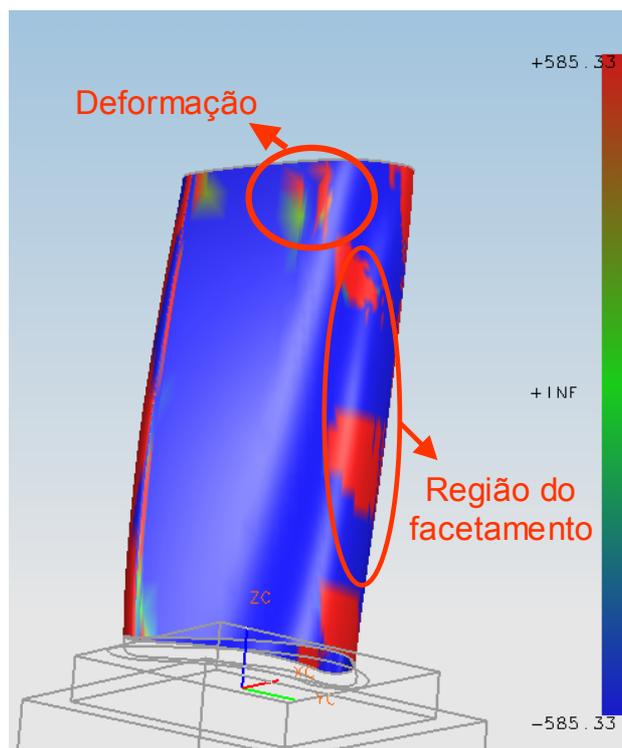


Figura 5.7: Análise de qualidade superficial.

A Figura 5.7 mostra através da análise de Curvatura Gaussiana [69] (realizada no software NX5) os problemas encontrados nas estratégias *180° Peça* e *360° Peça*. As escalas de cores mostram os valores da curvatura gaussiana medidas a partir de um determinado ponto da superfície (escolhido pelo sistema). O valor negativo da escala representa a concavidade da curvatura e o valor positivo representa a convexidade da curvatura, baseados em um ponto de referência sobre a superfície.

5.3 Exatidão geométrica

Após as medições dos 56 pontos de cada corpo de prova, como descrito no tópico 4.2.6, foi realizada uma análise de repetitividade da máquina de medir por coordenadas para a verificação do erro de medição.

A repetitividade é a variação aleatória, de causa comum, resultante de sucessivas medições definidas [68, 70].

O manual de referências para análise dos sistemas de medição [70], define a repetitividade da seguinte forma:

- Variação entre medições obtidas com um mesmo instrumento quando usado várias vezes pelo mesmo operador, medindo a mesma característica de uma peça;
- Variação entre sucessivas medições feitas sob condições fixas e definidas;
- Comumente descrita como Variação do Equipamento - VE;
- Capacidade ou potencial do instrumento de medição;
- Variação dentro do próprio sistema.

Para a análise da repetitividade da máquina de medir por coordenadas foram utilizados os módulos vetoriais (cálculo das distâncias entre o ponto medido e o ponto teórico) que foram considerados como erros geométricos. O exemplo a seguir mostra o cálculo do erro geométrico (módulo vetorial - V) de cada ponto medido e seu respectivo ponto teórico.

Exemplo:

Coordenadas	x	y	z
Teórico	3,6774mm	11,8067mm	75mm
Medido	3,7224mm	11,7094mm	74,9945mm

$$V = \sqrt{(x_M - x_T)^2 + (y_M - y_T)^2 + (z_M - z_T)^2} \quad (1)$$

$$V = \sqrt{(3,7224 - 3,6774)^2 + (11,7094 - 11,8067)^2 + (74,9945 - 75)^2} \quad (2)$$

$$V = 0,107343 \text{ mm} \quad (3)$$

Foram realizadas, em laboratório com temperatura de 20°C, três seqüências aleatórias de medições dos quatro corpos de prova, medição de cada corpo de prova com 56 pontos, e portanto, um total de 672 pontos medidos.

A análise dos resultados foi feita utilizando o método da Análise de Variância – ANOVA, sugerido pelo manual de referência do Instituto da Qualidade Automotiva - IQA [71]. Neste caso, a variação devido às peças e aos diferentes pontos medidos também foi considerada na análise. Os resultados da análise são verificados na Tabela 5.14:

Tabela 5.14: Tabela da ANOVA

Fonte de Variação	Grau de Liberdade	Soma Quadrado	Quadrado Médio	Estatística. F	P-valor
peças	3	0,120600868	0,040200289	61,4636622	0
pontos	55	2,047074397	0,037219534	56,90627949	0
Resíduos	613	0,40093246	0,00065405		

Como o valor da repetitividade é dado pela raiz quadrada do Quadrado Médio do resíduo, neste caso tem-se uma repetitividade de 0,0256 mm. Para avaliar a repetitividade em termos da variação total do sistema de medição, foram obtidos os seguintes resultados, como mostra a Tabela 5.15.

Tabela 5.15: Porcentagem de variação em relação à variação total

Fonte de variação	Variação	% da variação total
Repetitividade	0,025574	0,889107
Peça	0,191143	49,66605
Pontos	0,190717	49,44485
Total	0,271224	100

De acordo com o manual de referência do Instituto da Qualidade Automotiva - IQA [70], um sistema de medição é considerado aceitável, quando sua repetitividade corresponde a menos de 10% da variação total do sistema. Neste caso, pode-se observar que ela corresponde a menos que 1% desta variação total. Desta forma, este sistema de medição é considerado aceitável para as medições e condições definidas neste trabalho.

Feita a análise de variância, pôde-se então comparar os resultados gerados pelas medições dos 4 corpos de prova, que representam as estratégias de corte em estudo.

Os valores utilizados na comparação das estratégias de corte são os valores da média dos erros dos pontos de cada corpo de prova (Valor Quadrático Médio ou Root Mean Square – RMS) juntamente com seu ponto de máximo erro e mínimo erro.

A Tabela 5.16 mostra os valores de erro médio juntamente com o ponto de máximo e mínimo erro de cara corpo de prova:

Tabela 5.16: Resultados

	Medição	RMS	Ponto Máx.	Ponto Mín.
180° Externa	A	0,163mm	0,301mm	0,027mm
	B	0,163mm	0,304mm	0,023mm
	C	0,162mm	0,305mm	0,017mm
180° Peça	A	0,166mm	0,333mm	0,031mm
	B	0,165mm	0,336mm	0,033mm
	C	0,164mm	0,336mm	0,034mm
360° Externa	A	0,165mm	0,348mm	0,055mm
	B	0,168mm	0,338mm	0,061mm
	C	0,166mm	0,343mm	0,061mm
360° Peça	A	0,135mm	0,296mm	0,017mm
	B	0,136mm	0,302mm	0,023mm
	C	0,136mm	0,301mm	0,019mm

Através da Tabela 5.16, pode-se observar que as estratégias *180° Externa*, *180° Peça* e *360° Externa* mantiveram o erro médio (RMS) em 0,16 mm, variando apenas seus valores em milésimos de milímetro.

A estratégia *360° Peça* se mostrou mais exata comparada as outras estratégias de corte, com um erro médio (RMS) de 0,13 mm, com menores erros de ponto máximo e mínimo.

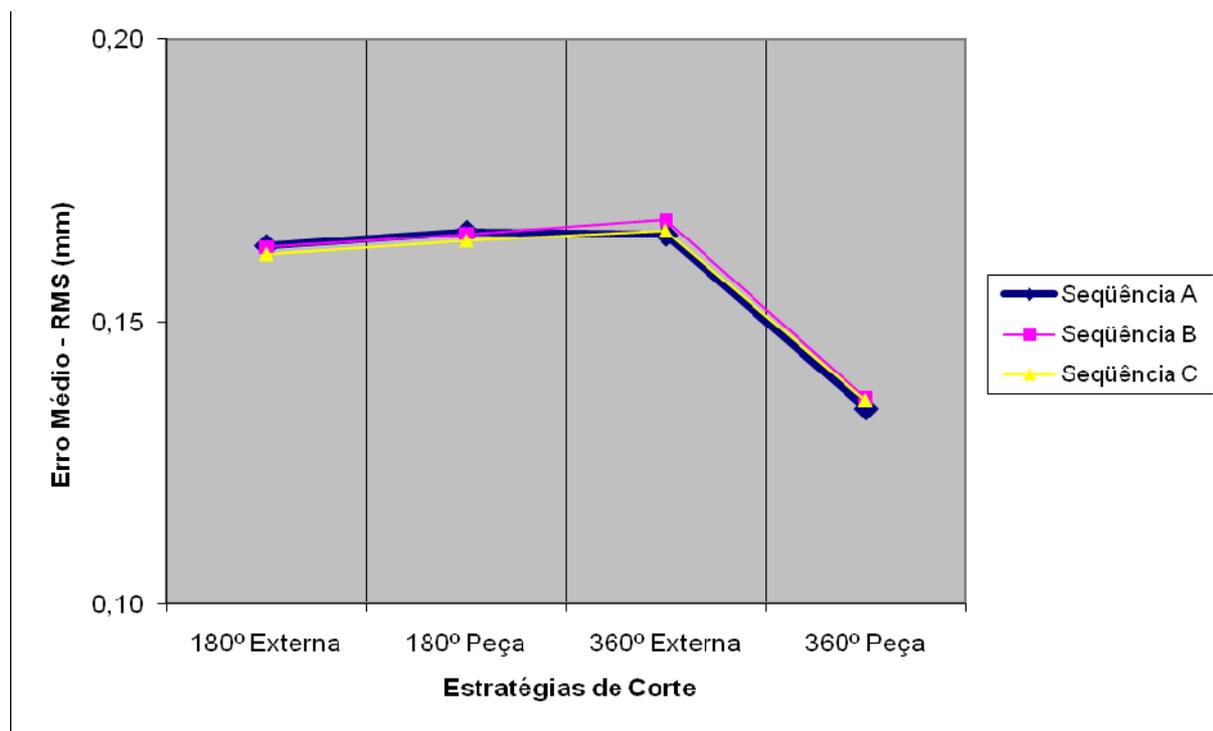


Figura 5.8: Gráfico da média dos erros (RMS)

A Figura 5.8 mostra um gráfico com os valores de erro médio representando cada estratégia de corte. Pode-se observar que as seqüências de medições estão sobrepostas, confirmando a repetitividade das medições efetuadas. Também se pode observar a comparação entre as estratégias corte com maior exatidão 360° Peça seguida pelas estratégias 180° Externa, 180° Peça e 360° Externa respectivamente.

6. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Conforme proposto neste trabalho, foram analisadas algumas estratégias de corte para fresamento com 5 eixos considerando os critérios de tempo de usinagem, qualidade superficial, que inclui a rugosidade da superfície e aspecto da superfície, e exatidão geométrica.

Na análise das estratégias de corte, a escolha da superfície guia (*Drive Surface*) apresentou grande influência em todos os critérios de análise.

Na análise do tempo de usinagem, a estratégia de corte *360° Externa* apresentou o menor tempo de usinagem com 70,21 minutos, seguida pela estratégia *180° Externa* com 70,59 minutos. Essas estratégias utilizaram uma superfície guia (*Drive Surface*) externa à geometria do corpo de prova para a geração da trajetória da ferramenta, essa superfície guia (cilindro) proporcionou uma trajetória de ferramenta com menor movimentação nos eixos de rotação da máquina-ferramenta que são os eixos com menor velocidade (4 eixos simultâneos + 1 eixo posicionador).

As estratégias de corte *360° Peça* e *180° Peça* com tempos de usinagem de 98,33 minutos e 101,43 minutos, respectivamente, obtiveram os maiores tempos de usinagem devido a maior movimentação dos eixos de rotação da máquina-ferramenta (usinagem com 5 eixos simultâneos) ocasionado pela escolha da superfície do corpo de prova, uma superfície complexa, como superfície guia (*Drive Surface*) para a geração da trajetória da ferramenta.

Também se pôde observar que a estratégia de corte *360° Externa* obteve o menor valor de rugosidade superficial e o melhor aspecto da textura superficial, seguido pela estratégia *180° Externa* com características de qualidade semelhantes.

A estratégia *360° Peça* e *180° Peça*, respectivamente, obtiveram maiores valores de rugosidade e piores texturas superficiais, pois essas estratégias são dependentes da qualidade superficial do modelo geométrico CAD a ser usinado, e que neste caso, o modelo geométrico à ser usinado possuía algumas deformações em sua superfície.

Pôde-se observar que movimento de Zig-Zag (movimento de corte concordante e discordante ao sentido do avanço da ferramenta), contido na estratégia *180° Externa*, proporcionou uma qualidade superficial inferior comparada com a estratégia *360° Externa* que possui características semelhantes. Já a estratégia *180° Peça*, devido aos movimentos de Zig-Zag obteve uma qualidade superficial superior comparada com a estratégia *360° Peça* que possui características semelhantes. A estratégia *180° Externa* obteve melhor qualidade superficial comparada a estratégia *180° Peça*.

Através dos resultados dos experimentos, conclui-se que utilização de uma superfície guia externa ao modelo geométrico a ser usinado para a geração da trajetória da ferramenta se mostrou bastante promissora, pois proporcionou melhor qualidade superficial com um menor tempo de usinagem devido a simplicidade da superfície guia adotada, neste caso um cilindro.

Em relação a exatidão geométrica entre os corpos de prova o modelo geométrico CAD, a estratégia de corte *360° Peça* se mostrou mais exata comparada as outras estratégias de corte, com um erro médio (RMS) de 0,13 mm, com menores erros de ponto máximo e mínimo. As demais estratégias obtiveram resultados semelhantes, mantiveram o erro médio (RMS) em 0,16 mm variando apenas seus valores em milésimos de milímetro.

Portanto, através dos resultados de medição geométrica dos corpos de prova, conclui-se que a estratégia *360° Peça* obteve melhor exatidão geométrica por utilizar a superfície do modelo geométrico à ser usinado como superfície guia para a geração da trajetória da ferramenta. As demais estratégias obtiveram exatidão geométrica inferior devido à utilização de movimentos Zig-Zag e utilização de uma superfície externa como superfície guia para a geração da trajetória da ferramenta.

A Tabela 6.1 mostra de forma geral os resultados obtidos na usinagem de cada estratégia de corte:

Tabela 6.1 Resultado Geral.

Critérios	Pior ←————→ Melhor			
	Tempo de usinagem	180° Peça	360° Peça	180° Externa
Rugosidade Ra Média	360° Peça	180° Peça	180° Externa	360° Externa
Aspecto superficial	360° Peça	180° Peça	180° Externa	360° Externa
Exatidão Geométrica	360° Externa	180° Peça	180° Externa	360° Peça

Devido a influência da superfície do modelo geométrico CAD sobre a qualidade superficial de peças usinadas, sugere-se para trabalhos futuros, a utilização de um modelo geométrico CAD com qualidade superior ao modelo geométrico utilizado neste trabalho, visando estratégias de corte que produzam uma melhor qualidade superficial da peça usinada e um melhor tempo de usinagem.

Sugere-se a utilização de outras formas geométricas, externas ao modelo CAD, para a geração da trajetória da ferramenta no fresamento com 5 eixos, visando uma análise de sua influência sobre a qualidade superficial e tempo de usinagem de uma peça.

Também, sugere-se a utilização de diferentes tipos de interpolação da trajetória da ferramenta no fresamento com 5 eixos, verificando suas influências na usinagem de superfícies complexas.

7. Bibliografia referenciada

- [1] WATANABE, B. Como alcançar economia no fresamento cinco eixos, Usinagem Brasil. Disponível em: <<http://www.usinagem-brasil.com.br/materias.asp?c=5/4/2008%2011:44:32>>, Acesso em 18 jun. 2008.
- [2] HERRIN, G. E. History of 5-axis machining. Modern Machine Shop, Edição de Fevereiro, 1995.
- [3] WANG, Y. J.; DONG, Z.; VICKERS, G. W. A 3D curvature gouge detection and elimination method for 5-axis CNC milling of curved surfaces. Int J Adv Manuf Technol, 33,:368–378, 2007.
- [4] TOENSMEIER, P. A. Five-axis machining is a key requirement for high-precision molds, Moldmaking Technology, Edição: Dezembro, 2006
- [5] ELBER, G.; COHEN; E. A unified approach to verification in 5-axis freeform milling environments. Computer-Aided Design, 31, 795–804, 1999.
- [6] BOHEZ, E. L. J. Systematic geometric rigid body error identification of 5-axis milling machines. Computer-Aided Design, 39, 229–244, 2007.
- [7] BAPTISTA, R., ANTUNE SIMÕES, J.F. Three and Five axes millin of sculptured surfaces, Material Processing Technology,103, 398-403, 2000.
- [8] GRAY, P., BEDI, S. Comparson of 5-axis and 3-axis finish machining of hidroforming die inserts, Advanced Manufacturing Technolgy, 17, 562-569, 2001.
- [9] GOMES, J. O., SILVA, A. S. A., SOUZA, G. O., Desenvolvimentos necessários para o fresamento em 5 eixos simultâneos, 3º Encontro da cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, São Paulo-SP, 10 a 12 de agosto de 2005.
- [10] CHIOU, C. J.; LEE, Y. S., A shape-generating approach for multi-axis machining G-buffer models. Computer Aided Design, 31, 761-776, 1999.
- [11] ROTH, D.; BEDI, S.; ISMAIL, F.; MANN, S. Surface swept by a toroidal cutter during 5-axis machining. Computer Aided Design, 33,57-63, 2001.
- [12] SILVA, A. S. A., Desenvolvimento Integrado CAD/CAM de Componentes para turbina a Gás. 2006, 133f. Dissertação de Mestrado – Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos - SP.
- [13] WANG, Q.H., LI, J.R., ZHOU, R.R., Graphics-assisted approach to rapid collision detection for multi-axis machining, Int J Adv Manuf Technol, 30, 853-863, 2006.

- [14] LAUWERS, B., DEJONGLE, P., KRUTH, J.P. Optimal and collision free tool posture in five-axis machining through the tight integration of tool path and machine simulation, *Computer Aided Design*, 35, 421-432, 2003.
- [15] TUTUNEA-FATAN, O. R.; FENG, H. Y. Configuration analysis of five-axis machine tools using a generic kinematic model. *International Journal of Machine Tools & Manufacture Designs, Recherche & Application*, 4, 1235-1243, 2004.
- [16] ZELINSKY, P. Four types of five-axis machining centers, *Modern Machine Shop*, Disponível em <<http://www.mmsonline.com/articles/039904.html>>. Acesso em 18 jun. 2008.
- [17] JUNG, Y. H.; LEE, D. W.; KIM, J. S.; MOK, H. S. NC post-processor for 5-axis milling machine of table-rotating/tilting type. *Journal of Materials Processing Technology*,. 130-131, 641-646, 2002.
- [18] SIEMENS AG. SINUMERIK 810D/840D MANUAL, TOOL AND MOLD MAKING. GERMANY: SIEMENS AG, 2004.
- [19] CNC AUTO-MOTION, Disponível em <<http://www.cncmotion.com/titancanada3.jpg>>, Acesso em 2 jul. 2008.
- [20] MODERN TOOL LTD. Disponível em:
<<http://www.moderntool.com/new%20pics/Modern%205%20axis%20head.jpg>>, Acesso em 2 jul. 2008.
- [21] MCMAHON, C.; BROWNE, J. CAD/CAM from Principles to Practice. UK, Suffolk: Addison-Esley, 1993. 508 p. ISBN 0-201-56502-1.
- [22] WU, M. C.; LIU, C. R. Analysis on machined feature recognition technique based on B-rep. *Computer Aided Design*, 28, 603-616, 1996.
- [23] BEDWORTH, D.D.; HENDERSON, M.R.; WOLPE, P.M. *Computer Integrated Design and manufacturing*. USA, New York: McGraw-Hill, 1991. ISBN 0-07-100846-2.
- [24] COSTANTINI, P. Curve and surface construction using variable degree polynomial splines. *Computer Aided Geometric Design*, 17, 419-446, 2000.
- [25] PATRIKALAKIS, N.M.; MAEKAWA, T. *Shape Interrogation for Computer Aided Design and Manufacturing*. USA, New York: Springer, 2002. ISBN 3-540-42454-7.
- [26] 3T RPD LTD, *Surface versus Solid Modelling*. Disponível em <<http://www.3trpd.co.uk/students/outcome2/surface-vs-solid-modelling.htm>> Acesso em 18 jun. 2008.

- [27] HENRIQUES, J. R.: Contribuição para a Otimização da Troca de dados Geométricos entre Sistemas CAD Utilizando Processadores STEP AP 214. Dissertação. Universidade Metodista de Piracicaba, Março 2004.
- [28] DÜRR, H.; SCHÜNEMANN, R.; SCHULZE, J. Cadeia de processo baseada em NURBS. *Máquinas e Metais*, São Paulo, v. 33, n. 415, p. 18-27, ago. 2000.
- [29] CHIOU, C. J.; LEE, Y. S. A machining potencial field approach to tool path generation for multi-axis sculptured surface machining. *Computer Aided Design*, 34, 357-371, 2002.
- [30] CHOI, B.K.; JERARD, R.B. *Sculptured Surface Machining - Theory and applications*. Netherlands, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. 368 p. ISBN 0-412-78020-8.
- [31] LEE, S. G.; YANG, S. D. CNC Tool-Path Planning for High-Speed High-Resolution Machining Using a New Tool-Path Calculation Algorithm. *Int J Adv Manuf Technol*, 20, 326–333, 2002.
- [32] DRAGOMATZ, D.; MANN, S. A classified bibliography of literature on NC milling path generation. *Computer-Aided Design*, 29, 239-247, 1997.
- [33] FENG, H. Y.; TENG, Z. Iso-planar piecewise linear NC tool path generation from discrete measured data points. *Computer-Aided Design*, 37, 55–64, 2005.
- [34] KIM, S. J.; YANG, M. Y. Triangular mesh offset for generalized cutter. *Computer-Aided Design*, 37, 999–1014, 2005.
- [35] YANG, D. C. H.; CHUANG, J. J.; HAN, Z.; DING, S. Boundary-conformed toolpath generation for trimmed free-form surfaces via Coons reparametrization. *Journal of Materials Processing Technology*, 138, 138–144, 2003.
- [36] JUNG, J. Y. NC tool path generation for 5-axis machining of free formed surfaces. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 16, 115–127, 2005
- [37] DING, S.; MANNAN, M. A.; POO, A. N.; YANG, D.; HAN, Z. Adaptive iso-planar tool path generation for machining of free-form surfaces. *Computer-Aided Design*, 35, 141-153, 2003.
- [38] TOH, C. K. A study off effects of cutter path strategies and orientations in milling. *Journal of Materials Processing Technology*, 152, 346–356, 2004.
- [39] GRAY, P. BEDI, S. Rolling ball method for 5-axis surface machining. *Computer-Aided Design*, 35, 347-357, 2003.

- [40] WARKENTIN, A.; ISMAIL, F.; BEDI, S. Comparison between multi-point and other 5-axis tool positioning strategies. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40, 185–208, 2000.
- [41] BEDI, S.; MANN, S. Flank milling with flat end milling cuttes. *Computer-Aided Design*, 35, 293-300, 2003.
- [42] LEE, Y. S.; KOC, B. Ellipse-offset approach and inclined zig-zag method for multi-axis roughing of ruled surface pockets. *Computer-Aided Design*,. 30, 957–971, 1998
- [43] SOUZA, A. F. Análise das interpolações de trajetórias de ferramenta na usinagem HSC (High Speed Cutting) em superfícies complexas. Dissertação (Mestrado) - Universidade Metodista de Piracicaba, 2001.
- [44] SCHÜTZER, K. Usinagem em Altíssimas Velocidades. São Paulo: Editora Érica, 214. 2003.
- [45] HELLENO, A. L. Investigação de Métodos de Interpolação para Trajetória da Ferramenta na Usinagem de Moldes e Matizes com Alta Velocidade. Dissertação. Universidade Metodista de Piracicaba, Março 2004.
- [46] TIKHON, M.; KO, T. J.; LEE, S. H.; KIM, H. S. NURBS interpolator for constant material removal rate in open NC machine tools. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44, 237–245, 2004
- [47] LO, C.C. CNC machine tool surface interpolator for ball end milling of free form surfaces. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40, 307-326, 2000.
- [48] SINUMERIK 840D/840DI/810D/FM-NC. Programming Guide Advanced. 10 ed. 2000.
- [49] MOREIRA, J. Tecnologia CNC para usinagem a alta velocidade. *Máquina e Metais*, São Paulo, v. 39, n. 446, p. 148-159, mar. 2003.
- [50] CHENG, M.Y; TSAI, M.C.; KUO, J.C. Real time NURBS command generators for cnc servo controllers. *International journal of Machine tools & manufacture*, v. 42, p. 801-813, 2002.
- [51] ERKORKMAZ, K.; ALTINTAS, Y. High Speed CNC system design. PartI: jerk limited trajectory deneration and quintic spline interpolation. *International journal of Machine tools & manufacture*, v. 41, p. 1323-1345, 2001.
- [52] ZELINSKI, P. Understanding NURBS interpolation. Disponível em <<http://www.mmsonline.com/articles/079901.html>> Acesso em 18 jun. 2008.

- [53] LANGERON, J. M.; DUC, E.; LARTIGUE, C.; BOURDET, P. A new format for 5-axis tool path computation, using Bspline curves. *Computer-Aided Design* 36, 1219–1229, 2004.
- [54] YONGZHANG, W.; XIONGBO, M.; LIANGJI, C.; ZHENYU, H. Realization methodology of a 5-axis Spline Interpolator in an open CNC system. *Chinese Journal of Aeronautics*, 20, 362-369, 2007.
- [55].BOHEZ, E. L. J.; MINH, N. T. H.; KIATSRITHANAKORN, B.; NATASUKON, P. The stencil buffer sweep plane algorithm for 5-axis CNC tool path verification. *Computer-Aided Design*, 35, 1129–1142, 2003.
- [56] PARK, J. W.; SHIN, Y. H.; CHUNG, Y. C. Hybrid cutting simulation via discrete vector model. *Computer-Aided Design*, 37, 419–430, 2005
- [57] SU, C.J., LIN, F., YE, L. A new collision detection method for CSG-represented objects in virtual manufacturing, *Computers in Industry*, 40, 1-13, 1999.
- [58] ZHU, X., WANG, Y., FU, H. A 3-D simulation system for milling machining based on STEP-NC, *Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Dalian, China, June 21-23, 2006.
- [59] ONG, S. K., JIANG, L., NEE, A. Y. C. An internet-based virtual CNC milling system, *Int J Adv Manuf Technol*, 20, 20-30, 2002.
- [60] ALTINTAS, Y. Virtual high performance milling, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 56, 81-84, 2007.
- [61] AFFOUARD, A.; DUC, E.; LARTIGUE, C.; LANGERON, J. M.; BOURDET, P. Avoiding 5-axis singularities using tool path deformation. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44, 415–425, 2004.
- [62] PÖRNBACHER, C. et. al. Integração de processos de simulação otimiza cadeia CAD/CAM. *Máquinas e Metais*, Editora Aranda, nº 507, 38-49, 2008.
- [63] BOHEZ, E. L. J. Compensating for systematic errors in 5-axis NC machining. *Computer-Aided Design*, [S.l.]: Elsevier, v. 34, p. 391-403, 2002.
- [64] REDONNET, J. M.; RUBIO, W.; MONIES, F.; DESSEIN, G. Optimising Tool Positioning for End-Mill Machining of Free-Form Surfaces on 5-Axis Machines for both Semi-Finishing and Finishing. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 16,383–391, 2000.
- [65] LAUWERS, B.; LEFEBVRE, P. Five-axis Rough milling strategies for complex shaped cavities based on morphing technology. *Cirp Annals-Manufacturing Technology*, 55 – 1, 59-62, 2006.

- [66] NBR 8404: Indicação do estado de superfícies em desenhos técnicos. Rio de Janeiro, ABNT, 10, 1984
- [67] LUCENA, H. N. Geração de estratégias de medição de superfícies complexas em sistema CAD para máquinas de medir por coordenadas. Dissertação de Mestrado, Universidade Metodista de Piracicaba (UNIMEP), 2009.
- [68] MONTGOMERY. D.C. Design and Analysis of Experiments. Willey & Sons, 6 ed., 680, 2005.
- [69] RUFINO, E. O. Curvaturas Média e Gaussiana De Superfícies Quádricas, Monografia de Pós-Graduação, Universidade Federal De Roraima, 2006.
- [70] ISO/TAG 4/WG 3. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, 20-03.
- [71] IQA – Instituto da Qualidade Automotiva. Análise dos Sistemas de Medição MAS – Manual de Referência, 2002.