

MÁRCIO DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DO ERRO DE FORMA NO FRESAMENTO
CNC: APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE
INTERPOLAÇÃO DA TRAJETÓRIA DA
FERRAMENTA**

JARAGUÁ DO SUL, 2013

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA
E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS JARAGUÁ DO SUL - GERALDO WERNINGHAUS
CURSO SUPERIOR DE TECNÓLOGO EM FABRICAÇÃO
MECÂNICA**

MARCIO DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DO ERRO DE FORMA NO FRESAMENTO
CNC: APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE
INTERPOLAÇÃO DA TRAJETÓRIA DA
FERRAMENTA**

Trabalho de conclusão de curso
submetido ao Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de
Santa Catarina como parte dos
requisitos de obtenção do título de
Tecnólogo em Fabricação
Mecânica.

Professor Orientador:
Delcio Luís Demarchi, Esp.

JARAGUÁ DO SUL, 2013

O48a

Oliveira, Márcio de

Análise do erro de forma no fresamento CNC: Aplicação de métodos de interpolação da trajetória da ferramenta / Márcio de Oliveira; orientador Delcio Luís Demarchi. – Jaraguá do Sul: IFSC, 2013.

102 f.: il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo) - Instituto Federal de Santa Catarina. Tecnólogo em Fabricação Mecânica. Inclui bibliografia.

1. CAD/CAM. 2. Trajetória da Ferramenta. 3. Erro geométrico de forma. I. Demarchi, Delcio Luís. II. Instituto Federal de Santa Catarina III. Título.

CDD 671.35

Sistema de Bibliotecas Integradas do IFSC
Biblioteca - Campus Jaraguá do Sul – Geraldo Werninghaus
Catalogado por: Khrisna Vivianne da Silva CRB 14/1229

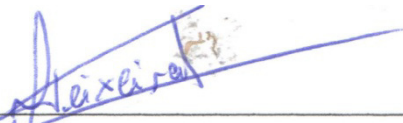
**ANÁLISE DO ERRO DE FORMA NO FRESAMENTO
CNC: APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE
INTERPOLAÇÃO DA TRAJETÓRIA DA
FERRAMENTA**

MÁRCIO DE OLIVEIRA

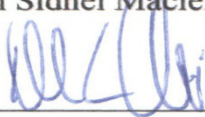
Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Tecnólogo em Fabricação Mecânica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do curso Tecnólogo em Fabricação Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Jaraguá do Sul, 12 de dezembro de 2013.

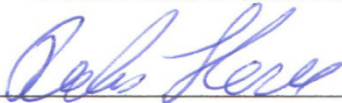
Banca Examinadora:



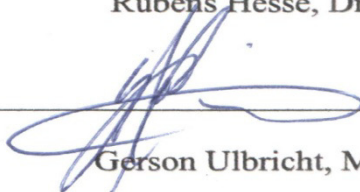
Edson Sidnei Maciel Teixeira, Me.



Delcio Luís Demarchi, Esp.



Rubens Hesse, Dr.



Gerson Ulbricht, Me

Este trabalho é dedicado a Jessica K. Gomes, à minha Mãe e toda a minha família.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por estar com saúde física e mental para realização deste desafio.

À Jessica K. Gomes, por compreender os momentos de ausência enquanto me dediquei a este trabalho e apoiar sempre, de modo paciente e incondicional. Com muito amor e reconhecimento.

Ao Professor Delcio Luís Demarchi do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina pela coordenação, auxílio e apoio durante a execução deste trabalho.

Ao Professor Edson Sidnei Maciel Teixeira do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina pela coordenação geral deste trabalho.

Ao Técnico de Laboratório Adriano Albino Machado do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina pelo apoio durante a execução dos experimentos de usinagem.

À empresa Hame Tecnometal pelo fornecimento da material, ferramental e equipamento de medições empregadas nos experimentos.

Aos professores de todo o curso que colaboraram de forma direta e indiretamente com o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os colegas de curso em especial ao Mauro, Elisandro, Tcharles, Motta, Jonas e Maicon, pela ajuda, incentivo e companheirismo.

Aos meus pais e irmãos em especial à minha mãe, a quem devo muito do que sou hoje, por ter conseguido chegar até aqui.

Muito Obrigado!!

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo.”

(Albert Einstein)

RESUMO

Com estabilidade econômica favorável para investimento, o setor de produção tem buscado aumentar sua capacidade de produção adquirindo máquinas-ferramenta de alta tecnologia. O fresamento CNC vem se destacando. Neste cenário acrescenta-se a isto uma modernização das formas geométricas atribuídas aos produtos, causando a geração de geometrias complexas e o aumento dos requisitos de projeto industrial, utilizando formas harmônicas e arredondadas para a apresentação de um produto. Assim, com a finalidade de aprimorar a usinagem destas formas complexas este trabalho apresenta um estudo para quantificar o erro geométrico de forma no fresamento CNC via ciclo CAD/CAM e CNC. O trabalho compara os dois principais métodos de programação em sistemas CAM de interpolação da trajetória da ferramenta: a interpolação da trajetória da ferramenta linear e a interpolação da trajetória da ferramenta linear/circular. Foram analisando os erros geométricos de forma, comparando a peça usinada com o modelo CAD. Nas análises práticas realizadas em um centro de usinagem, os resultados indicam que a escolha adequada do método de interpolação e a variação do sentindo de corte podem interferir no erro geométrico de forma.

Palavras-chave: CAD/CAM. Trajetória da Ferramenta. Erro geométrico de forma.

ABSTRACT

With favorable economic stability for investment, the manufacturing sector has sought to increase its production capacity by acquiring machine tools of high technology. The CNC milling has been outstanding. This scenario adds to this a modernization of geometric shapes attributed to products , causing the generation of complex geometries and increasing requirements of industrial design , using harmonics and rounded for presentation of a product. Thus, in order to enhance the machining these complex shapes this work presents a study to quantify the geometric form error in CNC milling via CAD / CAM and CNC cycle. The paper compares the two main methods of programming CAM systems interpolation of the tool path: interpolation of the trajectory of the linear tool and interpolation of the trajectory of the linear/circular tool. Geometric errors of form were analyzed by comparing the machined part with the CAD model. In practical analyzes performed on a machining center, the results indicate that the proper choice of interpolation method and the variation of feeling cut may interfere with the geometric form error.

Keywords: CAM/CAD. Trajectory Tool. Geometric form error.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fresamento concordante e discordante.....	28
Figura 2 - Tipos de fresas.....	29
Figura 3 - Avanço por dente.....	30
Figura 4 - Profundidade de corte ap e ae.....	31
Figura 5 - Movimentos de interpolação linear.....	36
Figura 6 - Movimento de interpolação circular.....	37
Figura 7 - Exemplo da regra da mão direita em centros de usinagem...	38
Figura 8 - Localização do ponto zero no fresamento.....	38
Figura 9 - Fluxograma de programação.....	39
Figura 10 - Funções de programação.....	40
Figura 11 - Algumas funções M.....	42
Figura 12 - Fases do ciclo CAD/CAM/CNC.....	43
Figura 13 - Edição de um ponto da superfície.....	44
Figura 14 - Trajetória da ferramenta em função da tolerância CAM....	47
Figura 15 - Tolerância de trajetória de usinagem.....	47
Figura 16 - Bloco de matéria prima.....	48
Figura 17 - Ilustração do sobremetal.....	49
Figura 18 - Estratégias de usinagem desbaste.....	49
Figura 19 - Estratégias de corte para o acabamento.....	50
Figura 20 - Desbaste por ferramenta de topo plana e esférica.....	51
Figura 21 - Ponto de contato de uma ferramenta esférica.....	52
Figura 22 - Interpolações de trajetórias.....	54
Figura 23 - Trajetória da ferramenta calculada por um sistema CAM..	54
Figura 24 - Cálculo das trajetórias de ferramenta.....	55
Figura 25 - Trajetória por interpolação linear da ferramenta.....	56
Figura 26 - Velocidade de avanço na interpolação linear.....	57
Figura 27 - Representação da interpolação linear/circular.....	57
Figura 28 – Resumo dos símbolos e características toleradas.....	59
Figura 29 - Tolerância de Forma de uma Superfície.....	59
Figura 30 - Centro de usinagem utilizado nos ensaio.....	60
Figura 31 - <i>Pre-setter</i> e fresa esférica.....	61
Figura 32 - Modelo geométrico desenvolvido pela NCG.....	62
Figura 33 - Corpo de prova ensaio de erro de forma.....	62
Figura 34 – Disposição dos corpos de prova.....	63
Figura 35 – Máquina de medir por coordenada.....	64
Figura 36 - Esquema de medição.....	64
Figura 37 - Estratégia e sequência de usinagem do estudo preliminar..	66
Figura 38 - Estratégia e sequência de usinagem do estudo definitivo...	67

Figura 39 - Corpo de prova usinado analise preliminar	69
Figura 40 - Desvios geométricos x Modelo CAD	70
Figura 41 - Desvios geométricos analise preliminar	71
Figura 42 - Corpo de prova do estudo definitivo	72
Figura 43 - Desvios x Modelo CAD trajetória linear	73
Figura 44 - Desvios geométricos trajetória linear	75
Figura 45 - Desvios x Modelo CAD trajetória linear/circular.....	76
Figura 46 - Desvios geométricos trajetória linear/circular	78
Figura 47 - Desvios x Modelo CAD Trajetórias ascendente	80
Figura 48 - Desvios geométricos trajetória ascendente.....	80
Figura 49 - Gráfico do maior desvio geométrico de forma por região..	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do alumínio ABNT/ASTM6262.....	34
Tabela 2 - Lista de funções G.....	41
Tabela 3 - Identificação dos corpos de prova.....	63
Tabela 4 - Indicação dos corpos de prova estudo preliminar	65
Tabela 5 - Parâmetros de corte do estudo preliminar	66
Tabela 6 - Parâmetros de corte estudo definitivo	68
Tabela 7 - Síntese do maior desvio geométrico de forma por região	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ae - Largura de corte

ap - Profundidade de corte

ASTM - American Society for Testing and Materials

CAD – Computer Aided Design/Drafting

CAM - Computer Aided Manufacturing

CBA - Companhia Brasileira de Alumínio

CC - Cutter Contact

CIMM - Centro de Informação Metal Mecânica

CN – Controle numérico (ou NC numerical control)

CNC - Controle Numérico Computadorizado

CL - Cutter Location ou Cutter Location Data File

D - Diâmetro da Fresa (mm)

F - Avanço (mm/min)

fz - Avanço por dente

IFSC - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina Catarina

NCG - Associação alemã NC-Gesellschaft

N - RPM (rotações por minuto)

TiSiN- Nitreto de silício e titânio

Vc - Velocidade de corte (m/min)

z - Numero de dentes ou aresta de cortes da fresa

π - PI (constante)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	23
1.1	Justificativa.....	25
1.2	Objetivos	25
1.2.1	Objetivo Geral.....	25
1.2.2	Objetivos Específicos	25
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	26
2.1	Fresamento	27
2.1.1	Tipos de fresamento.....	27
2.1.2	Fresa.....	28
2.2	Parâmetros de Usinagem.....	29
2.2.1	Parâmetros geométricos do fresamento	29
2.2.2	Parâmetros de velocidade do fresamento.....	31
2.2.3	Fatores determinantes para o fresamento.....	33
2.3	Usinabilidade.....	33
2.3.1	Alumínio.....	33
2.4	Usinagem CNC.....	34
2.4.1	Comandos para movimentação e interpolação.....	35
2.4.2	Programação CNC.....	37
2.5	Ciclo CAD/CAM/CNC.....	42
2.6	Sistemas CAD.....	44
2.7	Sistema CAM.....	45
2.7.1	Informações para CAM	45
2.7.2	Tolerância CAM	46
2.7.3	Estratégia de usinagem	48
2.8	Interpolação da Trajetória da Ferramenta	52
2.8.1	Trajétória da ferramenta por interpolação linear.....	55
2.8.2	Trajétória da ferramenta por interpolação linear/circular	57
2.9	Erro de Forma no Fresamento.....	58
3	METODOLOGIA.....	60
3.1	Materiais e Equipamentos.....	60
3.2	Geometria do Corpo de Prova	61
3.3	Metodologia de Inspeção	64
3.4	Descrição Das Operações.....	65
3.4.1	Estudo preliminar.....	65
3.4.2	Estudo definitivo.....	67
4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	69

4.1 Estudo Preliminar.....	69
4.2 Estudo Definitivo	72
4.2.1 Corpo de prova trajetória linear.....	73
4.2.2 Corpo de prova trajetória linear/circular.....	75
4.2.3 Corpo de prova sentido de corte ascendente.....	78
4.2.4 Síntese dos resultados.....	81
5 CONCLUSÃO.....	83
REFERÊNCIAS.....	85
APÊNDICES	89
APÊNDICE A – Programa parcial linear.....	91
APÊNDICE B – Programa parcial linear/circular	93
APÊNDICE C – Programa parcial linear ascendente	95
APÊNDICE D – Programa parcial linear/circular ascendente.....	97
APÊNDICE E – Desenho do corpo de prova.....	99

1 INTRODUÇÃO

Com a estabilidade econômica favorável e com grandes ofertas de crédito no mercado, o setor de produtivo tem buscado aumentar sua capacidade de produção, adquirindo máquinas-ferramenta de alta tecnologia. A usinagem CNC (controle numérico computadorizado), mais especificamente o processo de fresamento e uma parte fundamental do processo de fabricação.

Acrescenta-se a esta procura de novas tecnologias uma modernização das formas geométricas atribuídas aos produtos. Segundo Helleno (2004), a utilização de formas harmônicas para a apresentação de um produto causa o aumento dos requisitos de projeto industrial. O desenvolvimento das tecnologias e software para o modelamento de superfícies complexas e a redução dos custos de processamento, fez com que o uso de produtos contendo superfícies complexas aumentasse.

Estas superfícies complexas podem ser encontradas em um simples mouse de microcomputador até vários componentes de um automóvel e aeronaves. Assim as dificuldades encontradas envolvendo a usinagem destas formas geométricas vão desde um pequeno raio, passando pela variação de volume de material a ser removido até a constante alteração do ponto de contato entre a ferramenta/peça, devido às diversas alterações de curvatura da superfície, implicando diretamente em desvios geométricos de forma.

No processo de fresamento CNC, os desvios de forma entre a geometria projetada e a peça usinada podem ser determinados por diferentes fontes como: características do processo de corte, flexão da ferramenta decorrentes da força de usinagem, trajetória da ferramenta, dentre outros.

Assim o tema deste trabalho é a análise do erro geométrico de forma no fresamento CNC. Desta forma, este trabalho visa responder a seguinte pergunta: qual o valor dos erros geométricos de forma no processo de fabricação de uma geometria/peça complexa utilizando a usinagem CNC? Ao se propor uma pesquisa na área da usinagem de CNC, optou-se como critério de delimitação de pesquisa abordar estritamente seus aspectos específicos de usinagem CNC com diferentes métodos de interpolação da trajetória da ferramenta mais especificamente a interpolação da trajetória da ferramenta linear e a interpolação da trajetória da ferramenta linear/circular.

A relevância do trabalho pode ser considerada indispensável, pois o conhecimento dos fatores que afetam o erro de forma do produto/peça

usinado pelo processo de fresamento justifica o alto investimento na aquisição de máquinas com elevada precisão. (FERREIRA, 2013)

Souza (2001) realizou um estudo comparando os erros geométricos de forma entre o contorno usinado com interpolação linear e interpolação linear/circular. No estudo ele comparou o erro de forma em relação ao modelo CAD em usinagem com altas velocidades. Porém devido a falta, na época, de meios de medição confiáveis do erro geométrico de forma, o estudo não foi conclusivo. Em outra pesquisa Helleno (2004), realizou um estudo comparando as diversas trajetórias da ferramenta com altas velocidades, mas os erros de forma foram muito elevados. Diante das dificuldades descritas acima a importância deste trabalho se torna indispensável para a adequada escolha da interpolação da trajetória da ferramenta.

Sendo assim, a pesquisa está estruturada em acordo com a Resolução CEPE/IFSC N°0119 - Normas: Trabalhos Acadêmicos, (2011) do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina – IFSC e dividida em sete capítulos sendo que:

- a) **capítulo 1** – Introdução – Este capítulo apresenta uma introdução e contextualização do trabalho.
- b) **capítulo 2** – Revisão da Literatura – Neste capítulo apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre os principais assuntos estudados neste trabalho envolvendo o fresamento, parâmetros de usinagens, usinabilidade, usinagem CNC, ciclo CAD/CAM e as interpolação da trajetória das ferramentas.
- c) **capítulo 3** – Metodologia - Neste capítulo estão descritos a metodologia e as análises realizadas neste trabalho, para atingir os objetivos propostos.
- d) **capítulos 4** – Apresentação dos Resultados - Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos das análises realizadas nos corpos de prova.
- e) **capítulo 5** – Conclusão - Neste capítulo estão descritas as conclusões obtidas através dos ensaios de usinagem e medição dos corpos de prova.
- f) **capítulo 6** – Referências - Este capítulo contém, em ordem alfabética, todas as referências deste trabalho.
- g) **capítulo 7** – Apêndices - Ao final deste trabalho encontram-se os apêndices, contendo parte da

programação de acabamento e as informações mais importantes para esclarecimento e documentação.

1.1 Justificativa

Com a quantidade de informações proveniente dos mais diferentes segmentos da indústria, tais como fabricante de ferramentas e máquinas, os processistas, engenheiros, ou programadores CNC necessitam de informações que auxiliem na tomada de decisões para redução de custo de fabricação. (BAPTISTA, 2000)

A usinagem CNC é um dos processos de fabricação mais importantes na indústria e a necessidade de melhoria torna-se constante. Com isso os conhecimentos dos fatores que afetam o erro de forma do produto/peça usinado pelo processo de fresamento justificam o alto investimento na aquisição de máquinas com elevada precisão. (FERREIRA, 2013)

A fabricação pelo processo de fresamento com programação via computador introduz um desvio no erro de forma. Além da trajetória das ferramentas possuírem importantes parcelas nestes desvios no caso de geometrias complexas. (FERREIRA, 2013)

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo geral quantificar os erros de forma no processo de fabricação de uma geometria/peça utilizando a usinagem CNC.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) desenvolver um corpo de prova com formas geométricas em uma plataforma CAD;
- b) desenvolver a usinagem no CAM aplicando métodos de interpolação para trajetória da ferramenta: interpolação linear e interpolação linear/circular;
- c) analisar os erros geométricos dos corpos de provas usinados comparado com modelo CAD;

2 REVISÃO DA LITERATURA

O estudo das operações dos metais divide-se em operações de usinagem e conformação

Sendo que a usinagem tem por definição:

Como operações de usinagem entendemos aquelas que , ao conferir à peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens, produzem cavaco. Definimos cavaco, a porção de material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular. (FERRARESI, 2003)

A usinagem é um dos processos mais utilizados na indústria mundial e dependem das variáveis das máquinas operatrizes, ferramentas e acessórios. Sendo de grande importância a escolha destas variáveis, pois existe atualmente uma grande variedade de ofertas de formas, tipos e tamanhos de máquinas, ferramentas e métodos de programação. (BARRIOS; PIVETTA; YOSHIKAWA, 2011)

Neste contexto de modernização as exigências dos projetos industriais vêm aumentando no decorrer do tempo e cada vez mais as formas harmônicas para a apresentação de um produto estão introduzidas no mercado, assim fazendo com que o uso de produtos com geometria complexa se torne constante. (HELLENO, 2004)

Sendo possível a usinagem destas formas complexas somente com o auxílio de máquinas ferramentas controladas por comando numérico computadorizado, os CNC. Sendo assim, à medida que as condições de projetos alteram-se as máquinas tornaram-se mais precisas e versáteis.

Mas, nem sempre foi assim, antes da aplicação do comando numérico nas máquinas CNC o processo era realizado manualmente por um artesão e a usinagem somente sofrera alterações a partir da década 50 e 60 com a evolução das máquinas e do computador. Após o desenvolvimento dos sistemas CAD e posteriormente os sistemas CAM que a usinagem sofrera grande avanços tecnológicos. Assim o desenvolvimento dos sistemas CAD, CAM e CNC foram ferramentas fundamentais para a transformação do processo de fabricação e da utilização de superfícies complexas, sendo na atualidade um requisito

fundamental nas empresas e base para qualquer tecnologia a ser aplicada no setor industrial. (HELLENO, 2004)

Dentre as operações de usinagem que utilizam os sistemas CAD/CAM e CNC destaca-se o fresamento, um dos processos fundamentais para execução da maioria dos produtos.

2.1 Fresamento

Por definição o fresamento é o "[...] processo de usinagem no qual a remoção de material da peça a ser realizada de modo intermitente, pelo movimento da ferramenta, geralmente multicortante [...]". (STEMMER, 2005, p. 141) Processo mecânico de usinagem para com a finalidade de se obter superfícies quaisquer com o auxílio da ferramenta fresa, onde a fresa gira e a peça ou a ferramenta se desloca em uma trajetória pré-estabelecida. (FERRARESI, 2003)

A máquina ferramenta que produz a operação de fresamento é denominada Fresadora. O processo de fresamento é empregado por diferentes empresas dos mais variados segmentos tais como: ferramentaria, fabricantes de componentes aeroespaciais, montadoras de veículos, e setor de autopeças. (BARRIOS; PIVETTA; YOSHIKAWA, 2011)

A operação de usinagem por fresamento, utiliza a ferramenta fresa para fazer a retirada do sobremetal de uma peça, na forma de cavaco. Possui como objetivo obter superfícies planas, retilíneas ou prismáticas, simples ou complexas, com a forma, dimensão, tolerância e acabamento desejados. (BARRIOS; PIVETTA; YOSHIKAWA, 2011)

2.1.1 Tipos de fresamento

A classificação das operações de fresamento em relação à disposição dos dentes da fresa segundo Barrios, Pivetta e Yoshikawa (2011) são:

- a) **fresamento Frontal** é a operação de usinagem onde os dentes da fresa estão na região frontal da ferramenta, e o eixo da fresa esta perpendicular a superfície usinada;
- b) **fresamento tangencial** é a operação de usinagem onde os dentes da fresa estão dispostos na região cilíndrica da

ferramenta. Onde o eixo da fresa esta paralela a superfície usinada.

E no fresamento tangencial segundo Stemmer, (2005) pode ser dividido em fresamento discordante e concordante:

- a) **fresamento concordante** ou para baixo, o sentido dos movimentos de avanço e corte tem praticamente o mesmo sentido, tendo no inicio a espessura máxima do cavaco;
- b) **fresamento discordante** ou para cima, utilizados nas máquinas convencionais, O movimento de corte é no sentido contrário ao do movimento de avanço. O corte inicia-se com a espessura mínima do cavaco causando o desgaste prematuro da aresta de corte por abrasão.

A Figura 1 demonstra os dois tipos de fresamentos tangencial.

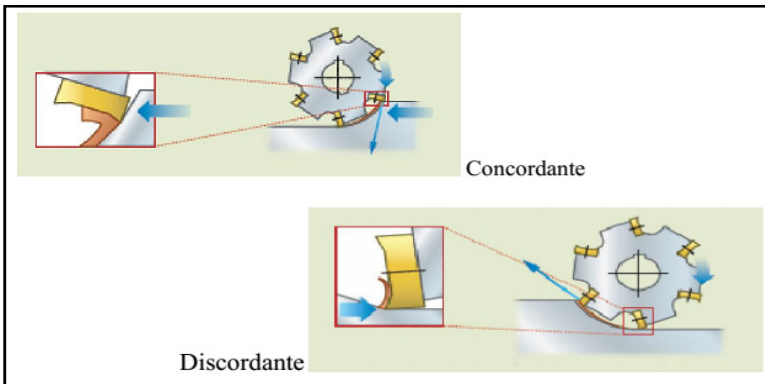


Figura 1 - Fresamento concordante e discordante
Fonte: (BARRIOS; PIVETTA; YOSHIKAWA, 2011)

2.1.2 Fresa

As fresas são ferramentas de usinagem rotativas com múltiplos gumes de corte (em casos isolados com um só) localizados ao redor do eixo, removendo o material da peça de forma intermitente. As fresas podem ser classificadas quanto à estrutura ou construção, quanto à forma geométrica, quanto a sua montagem, quanto ao método de fresagem e aplicações especiais. (STEMMER, 2005)

A classificação das fresas pode ser por vários critérios, entre eles a construção que podem ser: inteiriça, com dentes soldada e fresa de dentes postiços. (BARRIOS; PIVETTA; YOSHIKAWA, 2011)

As fresas inteiriça, são ferramentas fabricadas inteiramente do mesmo material usualmente fabricada de aço rápido e de metal duro com ou sem revestimento. Fresas com dentes soldados são ferramentas com o material de base fabricado de um material mais simples e o gume de corte de uma material mais resistente geralmente o metal duro.

Existem ainda as fresa de dentes postiços. Estas ferramentas geralmente são chamadas de cabeçote de fresamento, onde os dentes são as pastilhas, a fixação geralmente é por parafusos, sendo que os dentes podem ser reposicionados. (BARRIOS; PIVETTA; YOSHIKAWA, 2011)

A Figura 2 ilustra os tipos de fresa classificados em relação a sua construção.

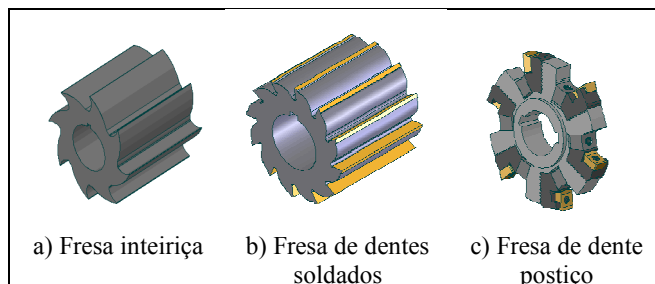


Figura 2 - Tipos de fresas
Fonte: (CIMM, 2013)

2.2 Parâmetros de Usinagem

Os parâmetros de usinagem são as informações que devem ser ajustados na máquina para realizar a usinagem. Foram divididos em: parâmetros geométricos, parâmetros de velocidade e fatores determinantes para o fresamento.

2.2.1 Parâmetros geométricos do fresamento

Os principais parâmetros geométricos de usinagem no fresamento são: penetração de trabalho, o avanço, o avanço por dente, penetração passiva. Ambos os parâmetros serão detalhados mais a frente.

Um dos conceitos importantes é sobre o plano de trabalho, assim:

O plano de trabalho é o plano que contém as direções de corte e de avanço (passando pelo ponto de referencia da aresta cortante). Neste plano se realizam, portanto, todos os movimentos que tomam parte da formação do cavaco. (FERRARESI, 2003, p. 26)

O avanço (f) é o movimento de avanço por volta ou curso em relação ao plano de trabalho. Enquanto que o avanço por dente (f_z) é o movimento de avanço pelo número de dente ou arestas cortantes em relação ao plano de trabalho (STEMMER, 2007), tem-se assim:

$$f_z = f/z \quad (1)$$

Onde:

z = é o número de dentes ou aresta de cortes

f = avanço da fresa, por rotação

f_z = avanço por dente

A Figura 3 ilustra o avanço por dente em relação ao avanço.

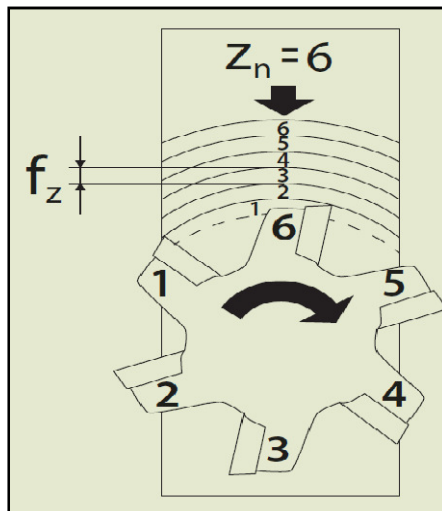


Figura 3 - Avanço por dente

Fonte: (BARRIOS; PIVETTA; YOSHIKAWA, 2011)

A penetração passiva (a_p) é a profundidade de corte da aresta principal perpendicular ao plano de trabalho. Penetração de trabalho (a_e) é a largura de corte que a ferramenta penetra na peça no sentido do avanço. (STEMMER, 2007). A Figura 4 ilustra estes parâmetros geométricos do fresamento.

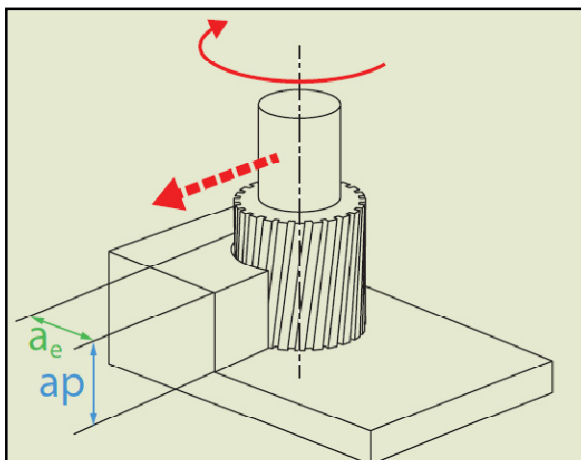


Figura 4 - Profundidade de corte a_p e a_e
 Fonte: (BARRIOS; PIVETTA; YOSHIKAWA, 2011)

2.2.2 Parâmetros de velocidade do fresamento

Entre os principais parâmetros de usinagem referentes a velocidade estão: velocidade de corte e a velocidade de avanço.

Segundo Souza e Ulbrich (2009) a velocidade de corte é a velocidade periférica da ferramenta de corte com relação ao diâmetro e a rotação programados. Enquanto que Ferraresi (2003, p.5) define velocidade de corte: “[...] é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante, segundo a direção e sentido de corte.”

A escolha da velocidade de corte depende de alguns fatores tais como: material da peça, material da ferramenta, formato da peça, refrigeração de corte, fixação da peças, máquina. Geralmente o valor de velocidade de corte é sugerido pelos fabricantes de ferramentas em faixas de valores obtidos por experimentos. (BARRIOS; PIVETTA; YOSHIKAWA, 2011)

A velocidade de corte é dada pela formula:

$$V_c = \frac{\pi * D * N}{1000} \quad (2)$$

Onde:

V_c = Velocidade de corte (m/min)

π = PI (constante)

D = Diâmetro da Fresa (mm)

N = RPM (rotações por minuto)

Logo se os fornecedores de ferramentas fornecem o valor da velocidade de corte podemos calcular a RPM com a fórmula abaixo:

$$N = \frac{V_c * 1000}{\pi * D} \quad (3)$$

Souza e Ulbrich (2009, p.199) definem velocidades de avanço como:

[...] Esta é velocidade de deslocamento da ferramenta em relação a matéria-prima e está relacionada com o numero de arestas da ferramenta de corte (n_a), o avanço por aresta (f_z) e a rotação da ferramenta(n).

A velocidade de avanço (V_f) pode ser expressa pela rotação da ferramenta pelo avanço por arestas e pelo número de arestas de corte, conforme a formula a seguir:

$$V_f = N * f_z * z \quad (4)$$

Onde:

V_f = velocidade de avanço (mm/min)

N = RPM (rotações por minuto)

f_z = avanço por dente (mm)

z = é o numero de dentes ou aresta de cortes

Em referência a formação do cavaco, Ferraresi (2003) diz que é o material removido pela ferramenta para que ocorra o processo de usinagem. Sua forma geométrica é regular ou irregular. A ferramenta em

contato com o material (peça), sob determinados valores de parâmetros de velocidade de corte, profundidade e avanço, proporcionam as fases da formação do cavaco: recalque, deformação plástica, ruptura parcial ou completa e o escorregamento. (BARRIOS; PIVETTA; YOSHIKAWA, 2011)

2.2.3 Fatores determinantes para o fresamento

Os fatores determinantes para o fresamento segundo Stemmer (2005) são:

- a) **características da peça a ser usinada:** é a influência das características da forma da peça, da precisão exigida, do material e das imperfeições do mesmo;
- b) **condições de trabalho:** refrigeração e lubrificação, profundidade de corte (ap), largura de corte (ae), velocidade de avanço e velocidade de corte;
- c) **fresa:** diâmetro da fresa, diâmetro da haste, números de dentes, ângulo de saída e altura da fresa.

2.3 Usinabilidade

Segundo Stemmer (2007) "A propriedade dos materiais de se deixarem trabalhar com ferramentas de corte denomina-se usinabilidade."

Assim, usinabilidade pode ser definida como uma grandeza tecnológica, expressa por um valor numérico comparativo (índice ou porcentagem), ou conjunto de propriedades de usinagem em relação ao material padrão. (FERRARESI, 2003)

O comportamento dos diversos materiais na usinagem ocorre de maneira distinta, alguns materiais são fáceis de serem trabalhados e outros possuem muitas dificuldades de usinagem. (STEMMER, 2007) Os materiais utilizados neste trabalho é o alumínio ABNT/ASTM6262.

2.3.1 Alumínio

Comparado com os metais ferrosos o alumínio é de fácil usinagem. Pode ser usinado com altas velocidades de corte e avanço, possui pressão específica de corte baixa e grande produção de cavacos e com alto coeficiente de dilatação térmica. (FERRARESI, 2003)

O alumínio e suas ligas possuem como principal característica a resistência a corrosão, elevada condutividade térmica e elétrica com densidade relativa baixa ($2,7\text{g/cm}^3$). O alumínio é de fácil conformação, ótima usinabilidade e ductilidade. A principal limitação é a sua baixa temperatura de fusão (660°C). Os principais elementos de liga incluem o cobre, o magnésio, o silício, o manganês e o zinco. (CALLISTER; RETHWISCH, 2013)

O alumínio é amplamente utilizado na indústria de transportes, atendendo aos segmentos de carrocerias de ônibus, automóveis, furgão para caminhões, embarcações e transportes em geral. Para fins automotivos possui o benefício de ser um material reciclável, por ser mais leve reduz o consumo de combustível e de pneus nos veículos ajudando na qualidade do meio ambiente. (CBA, 2012)

A Tabela 1 representa as especificações da composição química do alumínio liga ABNT / ASTM 6262

Tabela 1 - Composição química do alumínio ABNT/ASTM6262

Liga ASTM/ ABNT	Composição Química (%)								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
6262	0,4		0,15		0,80	0,04			
	-	0,7	-	0,15	-	-	0,25	0,15	Restante
	0,8		0,40		1,20	0,14			

Fonte: (ALFA ALUMÍNIO, 2010)

2.4 Usinagem CNC

Antes da usinagem através de máquinas com comando numérico, a produção era feita por operações manuais, levando a baixa produtividade em muitos casos e com muita variedade de peças. Eram utilizadas máquinas dedicadas e fabricadas para um determinado tipo de peça utilizada em altas produções. Essa forma de usinagem estendeu-se por muito tempo após a criação do CNC. E atualmente ainda existem algumas aplicações. (BARRIOS; PIVETTA; YOSHIKAWA, 2011)

Por volta de 1950 surgiu nos Estados Unidos o comando numérico. Em uma fresadora de três eixos foi executada uma adaptação eletrônica e mecânica na máquina para usinar uma peça de geometria complexa para os aviões e helicópteros. No Brasil os CNC chegaram por volta do final dos anos 1960. Aproximadamente em 1980 um grande avanço surgiu tornando as máquinas computadorizadas cada vez mais

compactas e com alta capacidade. (BARRIOS; PIVETTA; YOSHIKAWA, 2011)

Atualmente as máquinas-ferramenta para o fresamento e torneamento são as mais conhecidas na aplicação CNC, mas outros equipamentos também são controlados por estes sistemas como: máquinas de medição, máquinas para montagem, para corte a laser, para soldagem. Em resumo, as máquinas iniciais CN (ou NC *numerical control*) eram acionadas e controladas por coordenadas numéricas. Após a introdução do CNC (comando numérico computadorizado) quem acionava e controlava eram os computadores. (SOUZA; ULBRICH, 2009)

Os benefícios obtidos pelo uso de máquinas-ferramenta CNC são entre outros: fabricação de peças com geometrias complexas com mais rapidez precisão e melhor acabamento, reduzindo os custos; melhor flexibilidade, possibilitando lotes pequenos médios e seriados. (BARRIOS; PIVETTA; YOSHIKAWA, 2011)

Existem vários tipos de equipamentos com diferentes nomenclaturas. Os centros de usinagens CNC são equipamentos sofisticados com maior precisão de movimento e posicionamento, estes equipamentos possuem um dispositivo denominado magazine, onde estão localizadas as ferramentas agilizando e otimizado as trocas de ferramentas.

2.4.1 Comandos para movimentação e interpolação

No início da aplicação de máquinas CNC a usinagem era ponto a ponto, ou seja, a máquina parte de uma posição inicial para uma posição programada sem considerar a trajetória. Com a evolução das tecnologias desenvolveu-se técnicas de trajetórias tridimensionais, utilizando a interpolação entre os eixos. (SOUZA; ULBRICH, 2009)

A matemática define interpolação como a estimativa funcional, dada as médias dos valores conhecidos que estão dispostos ao redor. Exatamente o que acontece na trajetória de movimento do CNC. Na maquina CNC é função do interpolador calcular os valores entre os dois pontos da trajetória, fragmentando a trajetórias em vários segmentos. Assim, quanto mais números de impulsos pela unidade de tempo, menor será o segmento e maior precisão terá o movimento. Existem dois tipos básicos de interpolação: a interpolação linear e a Interpolação circular. (SOUZA; ULBRICH, 2009)

Na interpolação linear, exemplificando, na geração de uma trajetória retilínea na mesma direção como na Figura 5 onde a ferramenta inicia o movimento 01 movendo-se 10mm no eixo $x+$ através de um programa CNC, com a informação das coordenadas de $x=10$. Com a informação do programa CNC a máquina realiza o cálculo da interpolação para trajetória.

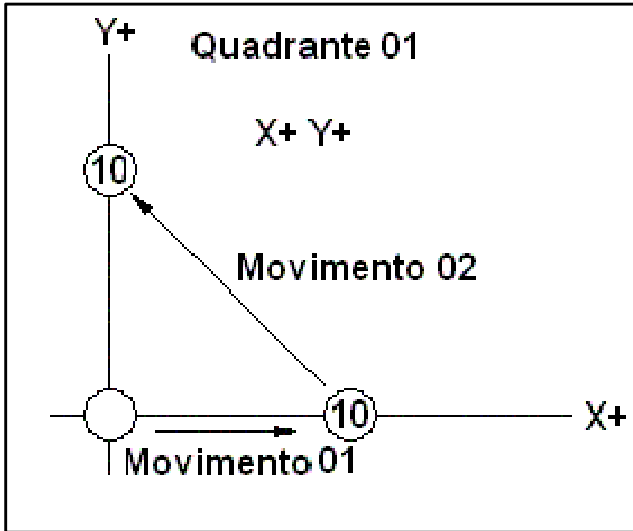


Figura 5 - Movimentos de interpolação linear
Fonte: (MUNDO CNC, 2008)

No exemplo acima a máquina se movimentou apenas no sentido do eixo x . Quando a trajetória possui uma inclinação de 45° no plano xy , ambos os eixos terão que funcionar em sincronismo na mesma velocidade. A composição dos eixos forma uma resultante de avanço em um ponto específico da trajetória e são obtidas do teorema de Pitágoras. A Figura 5 exemplifica este movimento, realizado no movimento 02 onde a ferramenta partiu de $x=10$ $y=0$ para $x=0$ $y=10$ movendo ambos os eixos em sincronismo.

Na interpolação circular, para gerar um arco são necessários três pontos, assim o programa CNC deve conter o ponto de início, o ponto final e o centro do círculo. Com estas informações o CNC calcula matematicamente a trajetória circular da ferramenta. A Figura 6

demonstra esta trajetória onde o número "1" indica o centro do círculo, o número "2" o início no círculo e o número "3" o fim do círculo.

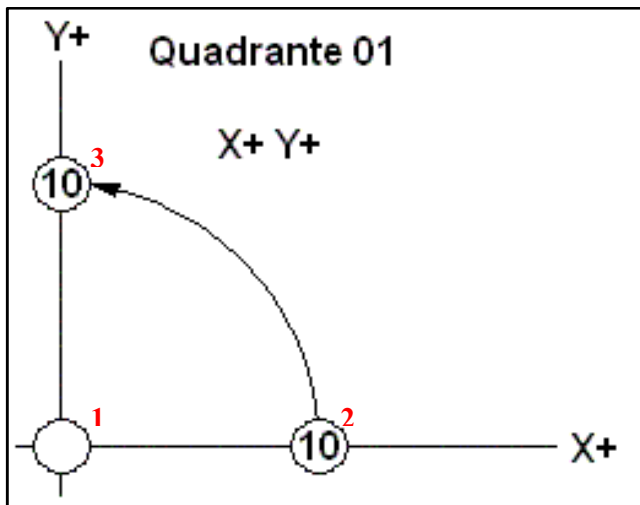


Figura 6 - Movimento de interpolação circular
Fonte: Adaptado (MUNDO CNC, 2008)

2.4.2 Programação CNC

A programação de usinagem de uma máquina CNC é exclusiva de cada modelo, o que difere são o tipo e quantidade de operações que as máquinas realizam. As coordenadas de movimentação seguem o sistema de cartesiano de coordenadas, geralmente com três eixos lineares perpendiculares entre si, existindo ainda os eixos rotativos em cada eixo linear, totalizando seis eixos de programação. Em geral o eixo Z representa a profundidade. (BARRIOS; PIVETTA; YOSHIKAWA, 2011)

Estes eixos podem ser representados pela regra da mão direita, e a Figura 7 ilustra esta regra.

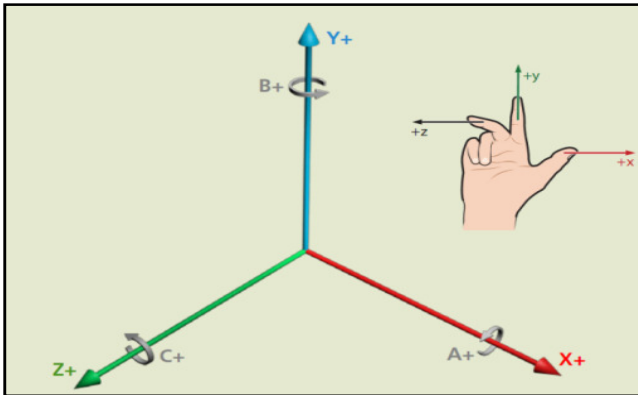


Figura 7 - Exemplo da regra da mão direita em centros de usinagem
 Fonte: (BARRIOS; PIVETTA; YOSHIKAWA, 2011)

Para realizar a programação o programador/operador informa o ponto zero da peça e os pontos de referências (nos centros de usinagem o ponto zero é o cruzamento dos eixos x, y e z perpendicular entre si). A Figura 8 demonstra um exemplo de posição do ponto zero no fresamento.

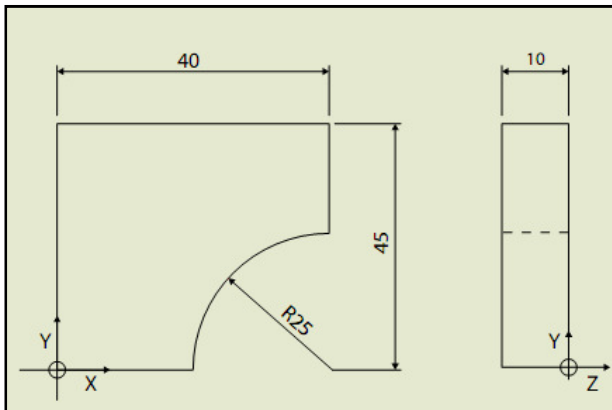


Figura 8 - Localização do ponto zero no fresamento
 Fonte: (BARRIOS; PIVETTA; YOSHIKAWA, 2011)

O programa CNC é uma série de blocos contendo funções de comando, registrados na memória, os quais informam o CNC, onde e como executar uma determinada operação. E blocos são agrupamentos

de funções de comando e posicionamento para a execução passo a passo do programa. A Figura 9 ilustra a estrutura e o fluxograma, de modo geral, de um programa CNC.

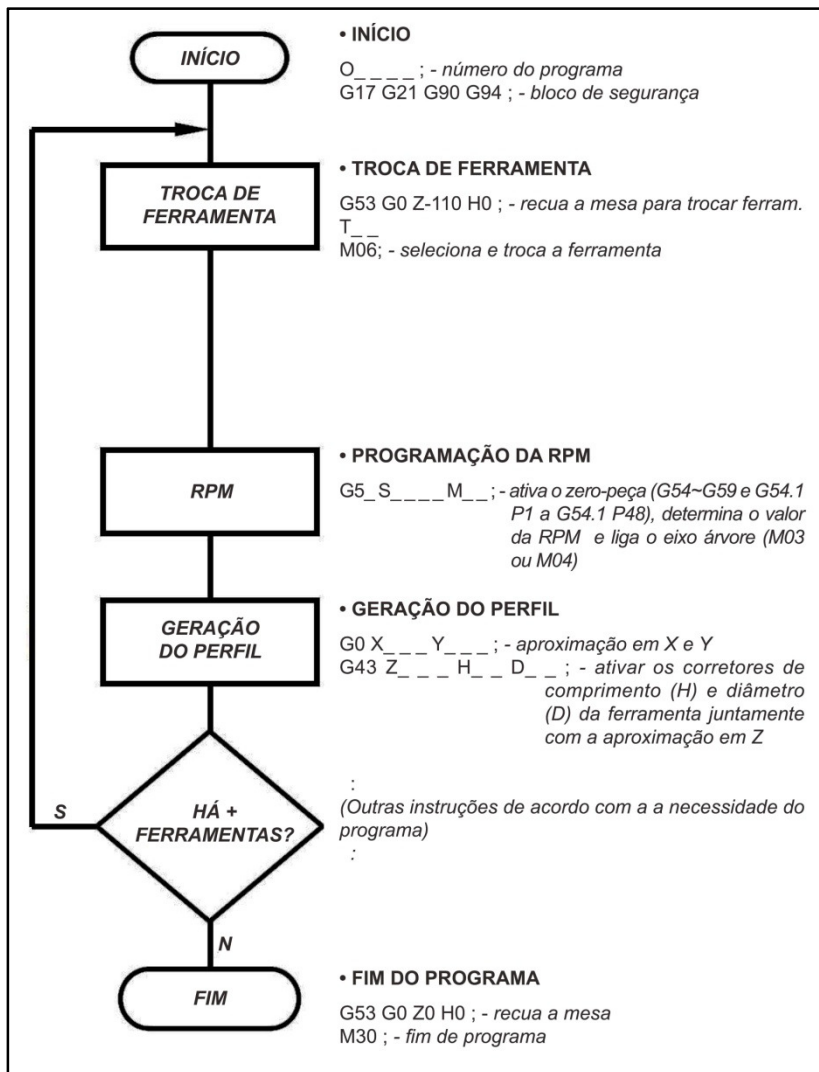


Figura 9 - Fluxograma de programação

Fonte: (ROMI, 2012, p. 92)

A Figura 10 ilustra as funções de programação dos programas CNC com o seu caractere e seu significado correspondente.

Caractere	Significado
% e O	Número do programa
N	Número da linha (bloco)
G	Função preparatória
X	Coordenada para movimento no eixo X
Y	Coordenada para movimento no eixo Y
Z	Coordenada para movimento no eixo Z
I	Distância incremental paralela ao eixo X (interpolação circular)
J	Distância incremental paralela ao eixo Y (interpolação circular)
K	Distância incremental paralela ao eixo Z (interpolação circular)
R	Raio da ferramenta / Recuo da ferramenta no ciclo de desbaste – torno
M	Função miscelânea
H	Altura da ferramenta / Posição de dados da ferramenta
D	Posição nos dados de ferramenta com o valor do raio da fresa para compensar
T	Número da ferramenta
S	Rotação do eixo-árvore / Velocidade de corte
F	Avanço da ferramenta (mm/min ou mm/rpm)
U	Profundidade de corte em X no raio / Material em X para acabamento – torno
W	Material deixado em Z para acabamento – torno
P	Número de um subprograma
; ou #	Caractere que aparece em todos os blocos: fim de bloco

Figura 10 - Funções de programação

Fonte: Adaptado (BARRIOS; PIVETTA; YOSHIKAWA, 2011)

Para realizar a programação as funções “G” (preparatórias) são as funções que mais repetem em um programa CNC, com a finalidade de realizar as operações tanto de movimentação como de reconhecimento de medidas. (BARRIOS; PIVETTA; YOSHIKAWA, 2011)

A Tabela 2 descreve as principais funções “G” utilizadas na programação CNC.

Tabela 2 - Lista de funções G

Código G	Função
G00	Posicionamento rápido
G01	Interpolação linear
G02	Interpolação circular no sentido horário (CW)
G03	Interpolação circular no sentido anti-horário (CCW)
G04	Temporização (Dwell)
G17	Seleção do plano XY
G18	Seleção do plano ZX
G19	Seleção do plano YZ
G20	Programação em sistema Inglês (Polegadas)
G21	Programação em sistema Internacional (Métrico)
G28	Retorna a posição do Zero máquina
G40	Cancelamento da compensação do diâmetro da ferramenta
G41	Compensação do diâmetro da ferramenta (Esquerda)
G42	Compensação do diâmetro da ferramenta (Direita)
G43	Compensação do comprimento da ferramenta (Positivo)
G44	Compensação do comprimento da ferramenta (Negativo)
G45 a G52	Compensações de comprimentos das ferramentas
G53	Cancelamento das configurações de posicionamento fora do zero fixo
G54 – G59	Zeragem dos eixos fora do zero fixo (01)
G70	Programa em Polegadas
G71	Programa em metros
G80	Cancelamento dos ciclos fixos
G90	Posicionamento absoluto
G91	Posicionamento incremental
G92	Zeragem de eixos (mandatário sobre os G54...)
G94	Avanço dado em minutos
G95	Avanço por revolução
G96	Velocidade de corte constante
G97	Rotação do fuso dado em RPM

Fonte: Adaptado de (MUNDO CNC, 2008)

Outras das funções importantes na programação são as Funções M (miscelâneas) que possuem a função de ligar e desligar os dispositivos, como travar ou destravar um eixo, ligar ou desligar o óleo refrigerante.

Mas cabe destacar que esta nomenclatura tanto das funções G como das funções M pode variar dependendo do fabricante da máquina CNC. (MUNDO CNC, 2008)

A Figura 11 descreve algumas funções M utilizadas na programação CNC

M00 – Parada programada
M01 – Parada opcional
M03 – Ativa a rotação do eixo-árvore no sentido horário
M04 – Ativa a rotação do eixo-árvore no sentido anti-horário
M05 – Desliga a rotação do eixo-árvore
M06 – Troca automática de ferramentas em caso de fresadoras
M08 – Liga o fluido de corte
M09 – Desliga o fluido de corte
M30 – Finaliza o programa
M98 – Chama o subprograma
M99 – Encerra o subprograma e volta ao programa principal

Figura 11 - Algumas funções M

Fonte: (BARRIOS; PIVETTA; YOSHIKAWA, 2011)

2.5 Ciclo CAD/CAM/CNC

Um método de realizar a programação de um CNC é através do auxílio de software, que geralmente são utilizados para usinagem de peças complexas. Neste contexto destaca-se no auxílio das etapas de fabricação o ciclo CAD/CAM/CNC

Segundo Souza e Ulbrich (2009) os sistemas que se destacam no auxílio as etapas de fabricação são:

- a) CAD (*Computer Aided Design/Drafting*): Software de projeto empregado no desenvolvimento de produtos e projetos, modelando as formas geométricas das peças no computador;

- b) CAM (*Computer Aided Manufacturing*): Software para fabricação, comumente utilizado na programação de máquinas CNC, que calculam as trajetórias da ferramenta e simula a movimentação da máquina.

O ciclo CAD/CAM/CNC na manufatura é realizado com o modelo geométrico gerado no CAD, transferido para o CAM para realização dos cálculos de trajetória da ferramenta. Neste momento o programador insere os dados tecnológicos tais como: matéria prima parâmetros de usinagem e estratégias de usinagem. (HELLENO, 2004)

Assim os sistemas CAM geram arquivos neutros para as trajetórias da ferramenta. Estes arquivos não se destinam a qualquer máquina específica, mas simplesmente contém comandos genéricos tais como alterar ferramenta ou ligar a refrigeração, e contem os dados de coordenadas cartesianas da trajetória da ferramenta. Estes arquivos neutros são conhecidos como *Cutter Location Data File* (CL). (SCHULTZ, 1998)

Este arquivo reconhecido apenas pelo sistema CAM, então com um módulo especial adicionado ao sistema CAM, o pós-processador, transforma o arquivo nativo em programa NC em linguagem ISO6983. (HELLENO, 2004;ISO, 2009)

A Figura 12 ilustra as fases do ciclo CAD/CAM/CNC.

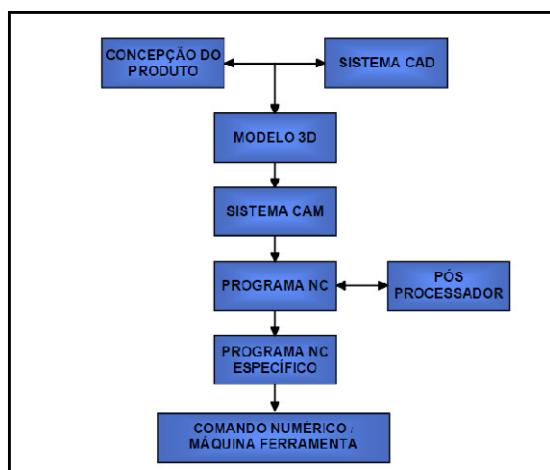


Figura 12 - Fases do ciclo CAD/CAM/CNC

Fonte: (HELLENO, 2004)

2.6 Sistemas CAD

Os sistemas CAD são softwares gráficos para geração de projetos nas mais variadas áreas tais como engenharia elétrica, mecânica e civil. (ARIAS, 2009)

Atualmente a maioria dos sistemas CAD representa realisticamente a peça tridimensional. Assim eliminam-se os erros causados pela utilização de múltiplas vistas, melhorando a interpretação dos desenhos. Um dos pontos fortes desta representação tridimensional é o auxílio nas etapas de projeto e manufatura. Os sistemas CAD podem ser classificados como: CAD modeladores de sólidos e CAD modeladores de superfície. (SOUZA, 2001)

Na fabricação de peças com geometria complexa é frequente o uso dos sistemas CAD modeladores de superfície. A Figura 13 representa uma geometria sendo editada, em um sistema CAD modelador de superfície.

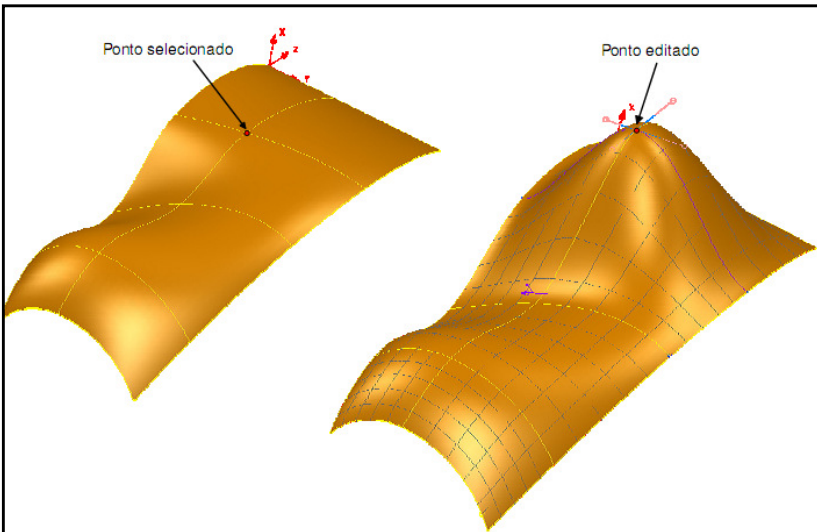


Figura 13 - Edição de um ponto da superfície
Fonte: (SOUZA, 2001)

2.7 Sistema CAM

Em 1990 com o desenvolvimento do hardware e software possibilitou grandes avanços para os sistemas CAM em computadores. Erros de trajetórias eram comuns, pois as trajetórias não eram precisas e invadiam a peça, danificando a ferramenta e máquina. Os cálculos de trajetórias demoravam até oito horas para serem feitos. Atualmente tanto a programação quanto a simulação estão cada vez mais rápidas possibilitando estudar diversas trajetórias para a mesma peça. (SOUZA, 2004)

Com o aprimoramento da tecnologia CAD/CAM tornou-se possível a fabricação de peças com formas geométricas complexas.

Para a geração de programas NC utilizando-se um de sistema CAM, necessita-se de um modelo geométrico tridimensional da superfície a ser usinada, o qual será utilizado para os cálculos das trajetórias de ferramenta. Este modelo geométrico da peça ou do ferramental (moldes e matrizes, para injeção ou estampo) a ser fabricado, devem ser modelados em um sistema CAD que seja capaz de representar o objeto realisticamente em três dimensões, através de um modelo sólido ou de superfícies. (SOUZA, 2001, p. 24)

Segundo Souza e Ulbrich (2009) as funções principais dos sistemas CAM são de desenvolver três atividades: Calcular as trajetórias da ferramenta, realizar a simulação e gerar os programas para os CNC.

2.7.1 Informações para CAM

Segundo Souza e Ulbrich (2009) para o CAM realizar os cálculos de trajetórias deve-se fornecer dados de entradas, estes dados são classificados em: informações iniciais e informações complementares.

As informações iniciais são as informações essenciais que qualquer software CAM exige. E são definidas por Souza e Ulbrich (2009) como:

- a) **geometria da Peça:** todas as peças trabalhadas no CAM devem ser modeladas no sistema CAD (exceto aplicações específicas);

- b) **definição da ferramenta de corte:** os sistemas atuais de CAM fornecem uma grande variedade de ferramentas para o fresamento. Assim sua forma geométrica e o diâmetro são utilizados no cálculo da trajetória;
- c) **definição da região de usinagem:** Deve-se informar ao CAM se a peça será usinada por completa ou somente algumas regiões. Para identificar estas regiões dependerá principalmente da operação de usinagem.

As informações Complementares segundo Souza e Ulbrich (2009) são:

- a) **estratégias de usinagem:** são os formatos geométricos topológicos que a ferramenta deve seguir para executar a usinagem;
- b) **parâmetros de corte:** a profundidade e a largura de corte (ap e ae), rotação da ferramenta (RPM), velocidade de avanço. Estes parâmetros devem ser introduzidos pelo usuário no CAM;
- c) **movimentação da ferramenta:** são os movimentos para realizar o corte, onde há contato com o material e o avanço é o programado, movimentos de avanço rápido onde a ferramenta não toca no material, movimentos de aproximação onde após realizar o avanço rápido a ferramenta realiza um avanço de aproximação para não danificar a peça. E por ultimo o movimento de retração que é a retirada da ferramenta suave.

2.7.2 Tolerância CAM

Para realizar o cálculo da trajetória da ferramenta no sistema CAM, o usuário deve fornecer ao sistema CAM uma faixa de tolerância, sendo que a trajetória da ferramenta estará contida dentro desta faixa. (HELLENO, 2004)

A Figura 14 ilustra uma trajetória de ferramenta pela interpolação linear aplicando diferentes faixas de tolerância para um mesmo modelo.

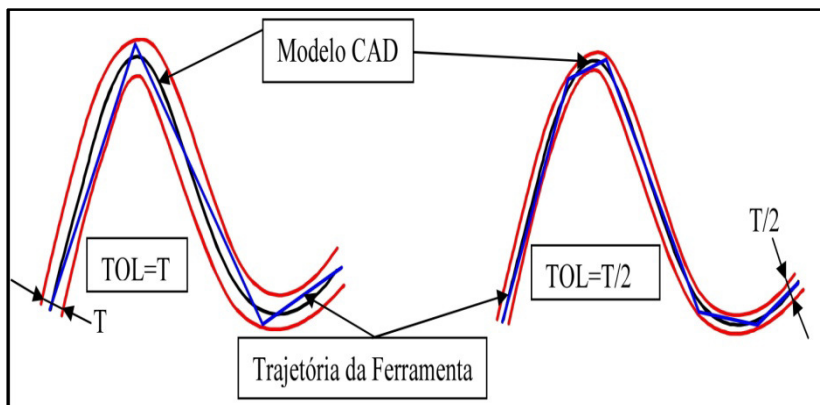


Figura 14 - Trajetória da ferramenta em função da tolerância CAM

Fonte: Adaptado (HELLENO, 2004)

Analisando a Figura 14, a diminuição da faixa de tolerância, no exemplo pela metade, implicará diretamente na exatidão da peça. Além disso, quanto maior a faixa de tolerância mais liberdade terá o CAM para calcular a trajetória, com isto gera perda na exatidão da peça.

A Figura 15 ilustra uma trajetória linear dentro da faixa de tolerâncias sobre um modelo geométrico.

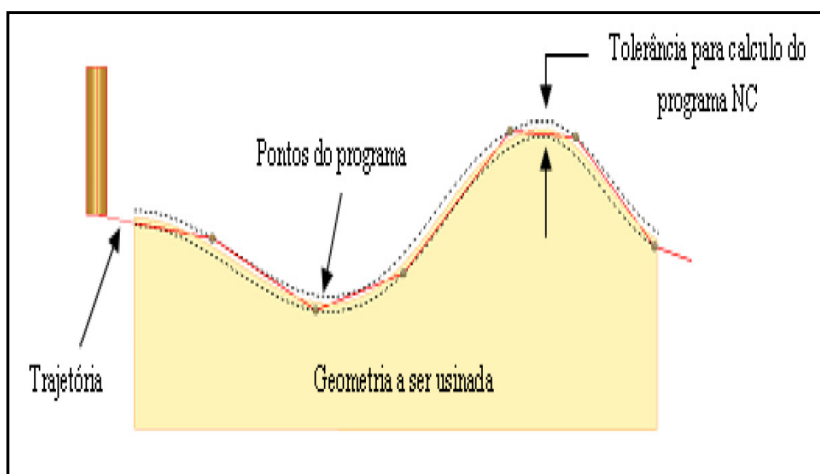


Figura 15 - Tolerância de trajetória de usinagem

Fonte: (SOUZA; COELHO, 2003)

2.7.3 Estratégia de usinagem

Nas operações de fresamento as estratégias podem ser classificadas em: desbaste, pré-acabamento e acabamento. E para cada uma existem diferentes técnicas de programação. (SOUZA; ULBRICH, 2009) Segundo Helleno (2004) estas técnicas são muito importantes, pois irá refletir no resultado final da peça quanto: à qualidade superficial, exatidão geométrica e o tempo de usinagem.

A operação de desbaste tem como função usinar o material bruto até próximo a geometria desejada, sendo responsável pela maior parte da remoção do material usinado. (HELLENO, 2004)

Assim, a operação de usinagem de desbaste via sistema CAM, necessita do modelo gerado no CAD e também da definição do material bruto. Este material bruto pode ser um bloco prismático (informando via plataforma CAM das dimensões do bloco) ou uma geometria realizada no CAD (muito utilizada em peças pré-usinadas ou fundidas). (SOUZA e ULBRICH, 2009)

A Figura 16 ilustra as forma dos materiais brutos para usinagem gerada no CAD/CAM.

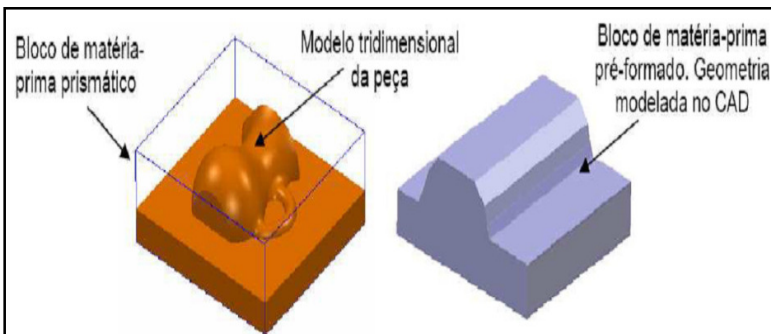


Figura 16 - Bloco de matéria prima
Fonte: Adaptado (SOUZA; ULBRICH, 2009)

Além do material bruto o usuário tem que definir o sobremetal, para posterior retirada no pré acabamento e acabamento. Segundo Helleno (2004), a usinagem convencional possui pouca variação de sobremetal e esta variação é absorvida pelo processo, enquanto que os produtos com geometria complexa resultam em valores de sobremetal com grandes variações dimensionais e com grande desvio em relação ao

sobremetal teórico. A Figura 17 ilustra o sobremetal teórico e o sobremetal real após o desbaste.

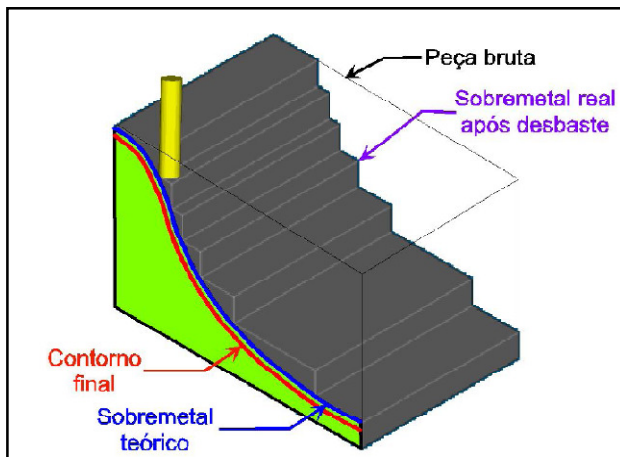


Figura 17 - Ilustração do sobremetal
Fonte: (SCHÜTZER;STANIK; SOUZA, 2001)

Como poder ser visto na Figura 17 com a operação de desbaste resulta numa geometria em forma de degraus que será removido em operações posteriores de pré-acabamento. Na realização do desbaste, para otimização do processo a maioria dos sistemas CAM oferece estratégias de desbaste no próprio software. A Figura 18 ilustra algumas destas estratégias.

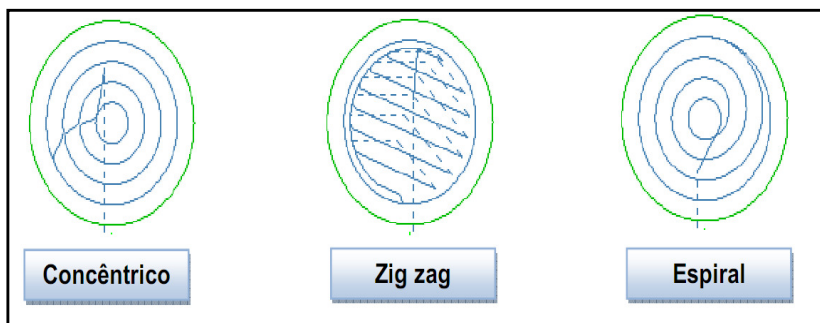


Figura 18 - Estratégias de usinagem desbaste
Fonte: (SKA, 2009)

Após a operação de desbaste será necessário remover os degraus da operação de desbaste este processo é denominado pré-acabamento. Esta operação tem por finalidade tornar o sobremetal real mais próximo do teórico e são divididas em duas operações: operação de remoção dos degraus e operação para alívio de cantos. (SOUZA;ULBRICH, 2009)

E por fim a operação de acabamento que possui por finalidade remover o sobremetal das operações de desbaste e pré-acabamento. Na operação de acabamento o CAM dispõe de diversas estratégias de usinagem que são de grande importância, sendo que em cada estratégia o CAM realiza o cálculo de maneira diferente. E o conhecimento prático se torna indispensável neste momento. (ARIAS, 2009)

Com grande variedade de possibilidade para o usuário a escolha da estratégia de usinagem de acabamento representa grande influência sobre a qualidade, tempo e desgaste da ferramenta. (WEINERT; GUNTERMANN, 2000) Principalmente quando a usinagem é de superfícies complexas, onde o par ferramenta/peça não é o único a influenciar na qualidade do processo. (SOUZA, 2001) A Figura 19 ilustra os dois tipos de estratégias de acabamento mais utilizadas, a de passes paralelos e a em offset.

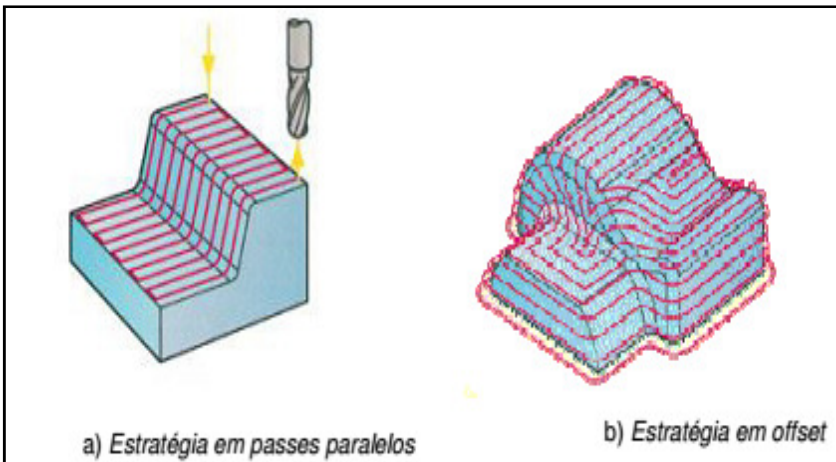


Figura 19 - Estratégias de corte para o acabamento
Fonte: (SOUZA, 2001)

Ao realizar uma avaliação das operações de fresamento de formas complexas é interessante estudar as condições de contato ferramenta-

peça e as dificuldades de aproximações realizadas para gerar este processo de usinagem. (SOUZA, 2004) A Figura 20a demonstra o contorno de uma peça com geometria complexa, com diferentes geometrias, e o bloco de matéria-prima, para sua confecção. A Figura 20b ilustra o material restante após a operação de desbaste com uma fresa de topo plana segundo uma estratégia de desbaste de passes verticais constante. A Figura 20c mostra o desbaste com uma ferramenta de ponta esférica nas mesmas condições de usinagem, com a mesma estratégia.

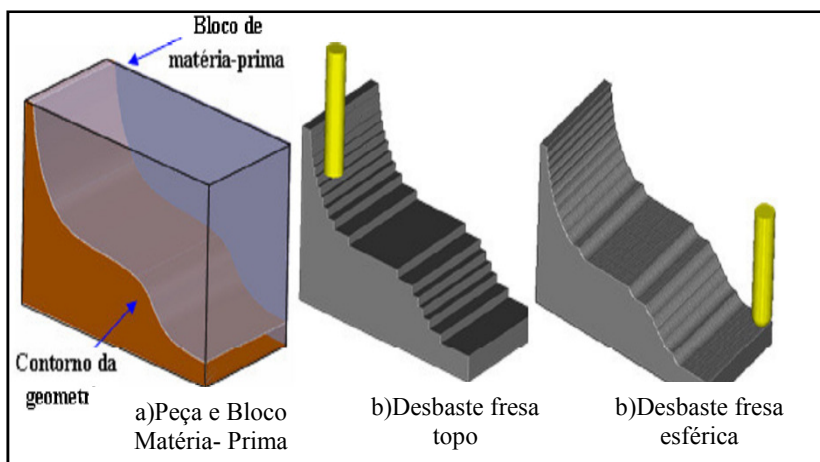


Figura 20 - Desbaste por ferramenta de topo plana e esférica
Fonte: (SOUZA, 2004)

Conforme pode ser observado na Figura 20 a ferramenta de ponta esférica conseguiu usinar a peça mais próximo da superfície real, conseguindo aproximar o sobremetal teórico do sobremetal real. Assim geralmente nas operações de usinagem de acabamento e pré-acabamento são utilizadas as ferramentas de ponta esférica, mas este tipo de ferramenta possui características próprias entre a ferramenta e a peça, variando o ponto de contato da ferramenta e seu diâmetro de corte, características de fundamental influência na usinagem. (SOUZA, 2004)

A Figura 21 mostra, de forma ilustrativa, a variação do ponto de contato em diferentes situações de uma peça usinada em relação ao sentido de corte. A seta indica o sentido do avanço.

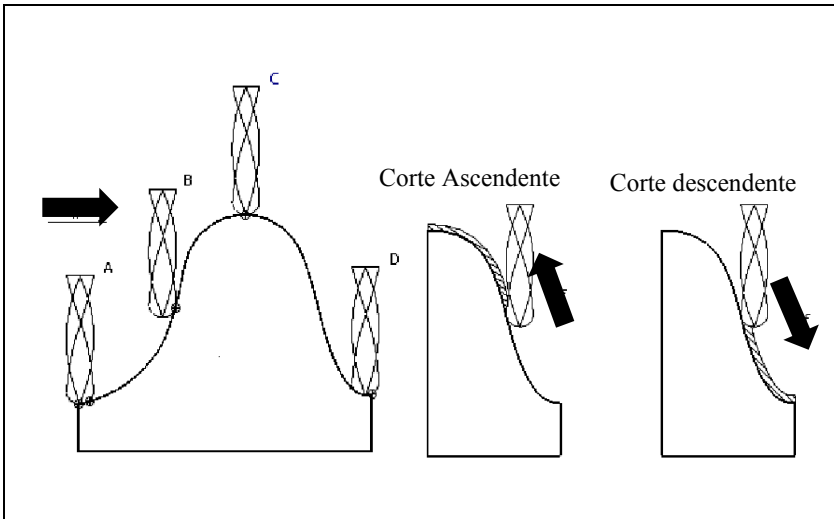


Figura 21 - Ponto de contato de uma ferramenta esférica
 Fonte: Adaptado (SOUZA, 2004)

Observando a Figura 21 no sentido ascendente nota-se que a ferramenta corta com o diâmetro nominal enquanto que no sentido descendente usa a parte esférica podendo utilizar o centro da ferramenta com velocidade de corte zero. (SOUZA, 2004)

Souza (2004) realizou um estudo obtido através de simulações com o CAD, onde ele evidenciou que ao realizar a usinagem com sentido de corte ascendente o raio de contato variava entre 2,9 e 2,3mm e no sentido de corte descendente o raio efetivo varia entre 1,9 e 0,5mm (esférica de 6mm e sobremetal teórico de 0,2mm). Podendo observar a variação do diâmetro de contato da ferramenta com a peça, na usinagem de formas complexas. Esta característica pode dentro do processo de usinagem gerar instabilidade, pois as maiorias dos cálculos tecnológicos do fresamento são a partir do diâmetro de contato entre a peça e a ferramenta.

2.8 Interpolação da Trajetória da Ferramenta

No início, mesmo quando os sistemas CAD/CAM queriam definir uma trajetória em curva, usavam-se os segmentos de reta, a interpolação linear, para descrever esta trajetória (será abordado com mais enfoque a frente), obrigando as empresas a trabalhar mediante aproximação da

superfície ao invés de trabalhar com a superfície real. Mas com o aprimoramento da máquina-ferramenta e aparição de formas geométricas mais complexas surgiu a necessidade de estudar mais opções de trajetórias. (BEARD, 1997)

Assim para realizar a trajetória da ferramenta:

Os programas NC são gerados a partir dos arquivos CL, e devem conter comandos possíveis de serem interpretados pelo CNC. Para descrever um percurso complexo de ferramenta, existem métodos de interpolações, que fazem uso de comandos conhecidos pelo CNC (G01, G02, G03), o que se torna possível descrever um percurso de ferramenta. (SOUZA, 2001, p. 39)

Mas existem outras metodologias, que os usuários dos sistemas CAM podem utilizar para a interpolação da trajetória da ferramenta e cada método destes possui características próprias ao programa, com isto influenciando diretamente no resultado final do produto/peça. Dentre as metodologias existentes segundo Helleno (2004), destacam-se:

- a) interpolação polinomial (spline),
- b) interpolação linear,
- c) interpolação linear/circular,
- d) interpolação NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline),
- e) interpolação COMPCURV
- f) interpolação polinomial obtida através do software SPEEDMILL

A Figura 22 ilustra os tipos de trajetórias que serão avaliadas neste trabalho a interpolação linear e a interpolação linear/circular.

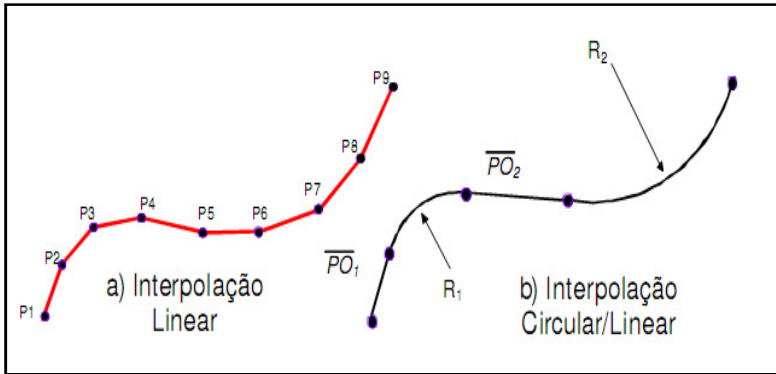


Figura 22 - Interpolações de trajetórias
 Fonte: Adaptado (SCHÜTZER; SOUZA, 2000)

Na trajetória gerada pelos sistemas CAM, inicialmente são calculados os pontos de contato com a ferramenta (*Cutter Contact (CC)*) sobre a geometria do modelo CAD. Empregando-se o método de compensação, o sistema calcula a posição central da ferramenta (*Cutter Location (CL)*), e esse pontos (CL) são os descritos no programa CNC. (ARIAS, 2009)

A Figura 23 ilustra a trajetória da ferramenta calculada no sistema CAM e os pontos CL e CC.

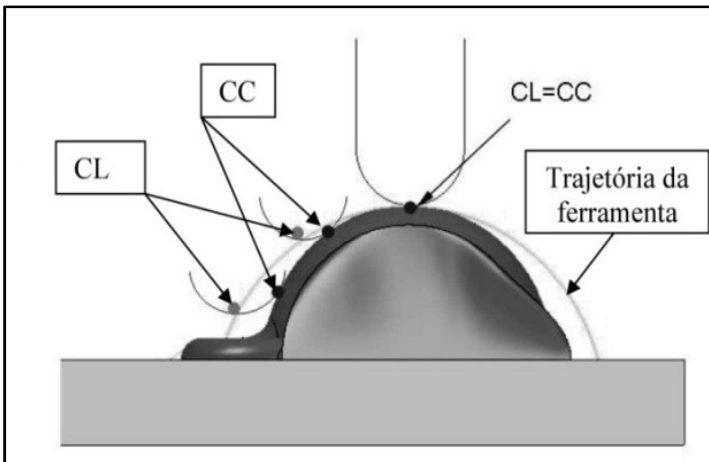


Figura 23 - Trajetória da ferramenta calculada por um sistema CAM
 Fonte: Adaptado (ARIAS; SOUZA, 2008)

Assim os programas gerados pelos CAD no método tradicional descrevem uma trajetória de uma superfície complexa em uma interpolação linear com segmentos de retas. O sistema CAM calcula a trajetória que a ferramenta vai percorrer dentro de uma faixa de tolerância, nota-se que o ponto CC é o que deve estar dentro desta faixa de tolerância e não o ponto CL, como mostra a Figura 24.

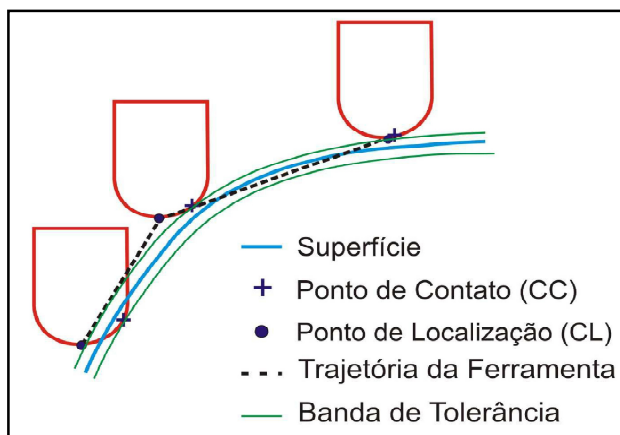


Figura 24 - Cálculo das trajetórias de ferramenta.

Fonte: (ARIAS; SOUZA, 2008)

Ferreira (2013) realizou um estudo sobre a influência das etapas de fabricação no erro geométrico sugerindo um método de quantificar cada erro na cadeia de produção de uma peça com superfície complexa. Ele sugere a interpolação circular para superfícies com formas simples e interpolação linear para usinagem de superfícies complexas. Os resultados obtidos por Ferreira (2013) foram de 6% e 8% de influência da interpolação circular e interpolação linear, respectivamente, sobre o desvio geométrico de forma. Atingindo um erro de 0,177 e 0,155mm na interpolação circular e interpolação linear respectivamente.

2.8.1 Trajetória da ferramenta por interpolação linear

A interpolação linear em um sistema CAM calcula a trajetória da ferramenta pela interpolação de segmentos de retas que se adaptam a faixa de tolerâncias e são representados pelo comando G01. A

representação por segmentos de retas torna a esta interpolação a mais simples por isso a mais utilizada nas indústrias atualmente. (HELLENO, 2004; SOUZA, 2001, 2004)

A Figura 22 a ilustra este tipo de trajetória de ferramenta descrita por segmentos de retas. Os pontos representam o início e o fim dos segmentos de retas. Enquanto que a Figura 25 ilustra a trajetória por interpolação linear da ferramenta dentro das faixas de tolerâncias.

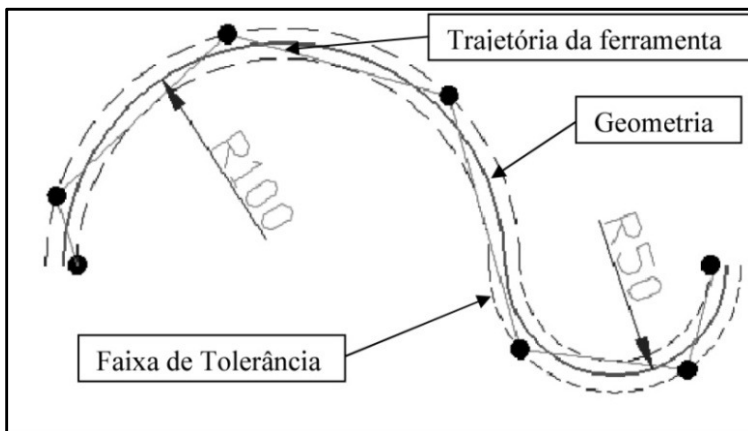


Figura 25 - Trajetória por interpolação linear da ferramenta

Fonte: Adaptado (SOUZA; COELHO, 2007)

Os programas NC que são gerados com esta interpolação são os mesmos do arquivo CL, esta metodologia tem a vantagem de ser mais simples, mas possui desvantagens tais como: programas muito extensos, baixa qualidade de acabamento e grande volume de informações para o CNC processar. (SOUZA, 2001)

Souza (2001) realizou um estudo sobre a velocidade de avanço, onde constatou que na interpolação linear da trajetória da ferramenta a velocidade de avanço variou no decorrer da usinagem. A Figura 26 ilustra as velocidades de avanço medidas no ensaio onde se observa que somente em duas regiões o avanço foi igual ao programado de 2000mm/min, nas outras regiões ficou inferior a programada.

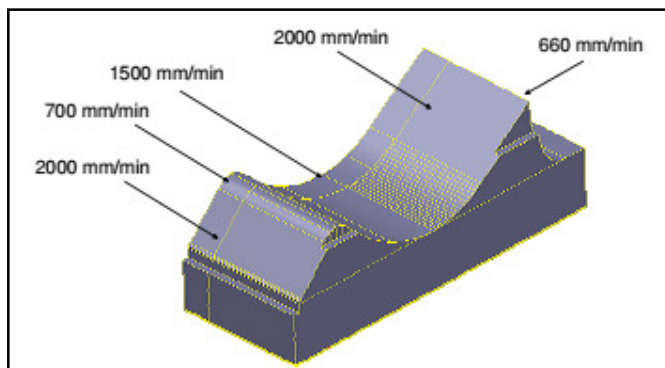


Figura 26 - Velocidade de avanço na interpolação linear
Fonte: (SOUZA, 2001)

2.8.2 Trajetória da ferramenta por interpolação linear/circular

Na interpolação linear/circular o método consiste na utilização tanto da interpolação linear (segmentos de retas) como da interpolação circular (segmentos de arcos) para representar a trajetória complexa de ferramenta. Gerando programas NC contendo comandos G01, G02 e G03. (HELLENO, 2004; SOUZA, 2001, 2004)

A Figura 27 ilustra a trajetória da ferramenta utilizando a interpolação linear/circular.

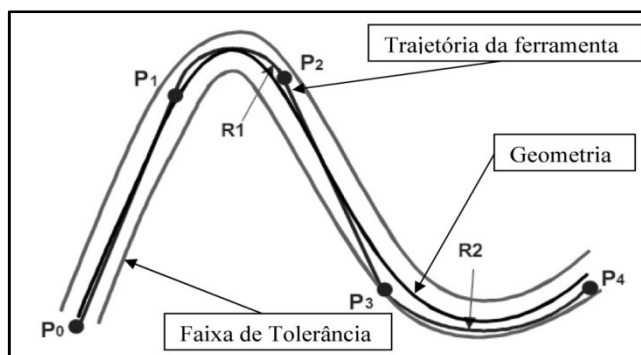


Figura 27 - Representação da interpolação linear/circular
Fonte: Adaptado (HELLENO, 2004)

Souza (2001) realizou um estudo para analisar o erro entre o contorno usinado e o modelo CAD em usinagem com altas velocidades,

mas, no entanto o mesmo não foi conclusivo. Nesta análise foi comparado os erros de forma gerada por interpolação linear e outra por interpolação linear/circular chegando a um desvio médio de 0,02mm para interpolação linear e 0,05mm para interpolação linear/circular. Concluindo que a interpolação linear/circular obteve maior velocidade de avanço garantindo a exatidão dos contornos qualidade superficial, proporcionando programas NC menores.

Em outro estudo Helleno, (2004) realizou ensaios práticos comparando as trajetórias da ferramenta com altas velocidades, com tolerâncias CAM de 0,05 e 0,005mm onde apresentou desvios de exatidão em relação ao modelo CAD de 0,22 e 0,2mm com tolerância CAM de 0,05mm para interpolação linear e interpolação Circular respectivamente. E com tolerâncias CAM 0,005mm chegou a desvios de 0,08 e -0,18mm para interpolação Linear e interpolação Circular respectivamente.

2.9 Erro de Forma no Fresamento

Em alguns casos, quando é realizada a usinagem de peças com elevada precisão, as tolerâncias dimensionais não são suficientes para garantir qualidade do produto para trabalhos posteriores, ou seja, as tolerâncias dimensionais não controlam os desvios de forma de uma peça. Atualmente com o auxílio das novas tecnologias é possível comparar a peça usinada como modelo CAD. (FERREIRA, 2013)

Os desvios geométricos são definidos através de erro de forma e posição e estão padronizados conforme a norma NBR6409. Onde define que a tolerância geométrica de um elemento (Ex. ponto, linha, superfície ou plano de simetria) define o campo dentro do qual a posição do elemento deve estar contida. A Figura 28 ilustra de forma resumida os símbolos das características toleradas.

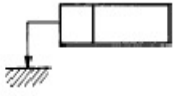





Característica tolerada		Símbolo	
Para elementos isolados 	Forma:	Retitude	—
		Planeza	
		Circularidade	
		Cilindricidade	
Para elementos isolados ou associados		Perfil de linha qualquer	
		Perfil de superfície qualquer	

Figura 28 – Resumo dos símbolos e características toleradas

Fonte: Adaptado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997, p. 11)

Neste trabalho serão discutidas as tolerâncias de forma de Superfície qualquer.

Tolerância de forma de uma Superfície qualquer é quando “O campo de tolerância é limitado por duas superfícies geradas por esfera de diâmetro “ t ”, cujos centros situam-se sobre a superfície geométrica teórica.” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997)

A Figura 29 ilustra a tolerância de forma de uma superfície qualquer.

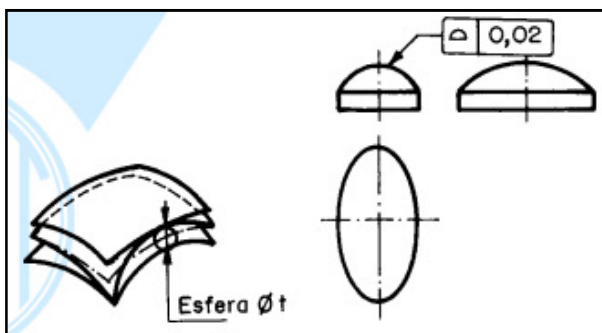


Figura 29 - Tolerância de Forma de uma Superfície

Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997, p.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão descritos os materiais e equipamentos, a geometria do corpo de prova, a metodologia de Inspeção, os programas e os parâmetros utilizados na confecção dos corpos de prova.

A usinagem foi realizada nas dependências do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina campus Jaraguá do Sul - Geraldo Werninghaus. Após a usinagem dos corpos de prova, foram realizadas as medições comparadas os corpos de prova com o modelo matemático.

3.1 Materiais e Equipamentos

Os materiais empregados na usinagem dos corpos de provas foram o alumínio ABNT/ASTM6262 amplamente utilizado na indústria.

A usinagem experimental foi realizada em um centro de usinagem vertical Romi Discoveri, modelo D600, equipado com o comando Fanuc Oi-MC. A Figura 30 ilustra o centro de usinagem utilizado nos ensaios.



Figura 30 - Centro de usinagem utilizado nos ensaio
Fonte: (AUTOR, 2013)

Para gerar os modelamentos CAD e os programas NC dos corpos de prova foram utilizados os programas CAD/CAM: Solidworks 2008SP2.1 e o Edgecam 2012R2 respectivamente.

Para usinagem dos corpos de provas foi utilizado para o desbaste um cabeçote com pastilhas de diâmetro 25mm. Para pré acabamento foi utilizado uma fresa esférica de diâmetro de 10mm de metal duro com duas arestas de corte. Para o acabamento foi utilizado uma fresa esférica com duas arestas de corte de diâmetro de 12mm de metal duro com revestimento TiSiN (nitreto de silício e titânio). A ferramenta utilizada para acabamento é recomendada para usinagens geral desde o desbaste até o acabamento, podendo ser utilizada na usinagem do alumínio (SULTOOLS, 2013; PANTIGER, 2006). Para determinar o comprimento da ferramenta foi utilizado o *pre-setter* representado pela Figura 31, nesta figura também esta ilustrada a ferramenta utilizada para realização do acabamento dos corpos de provas.

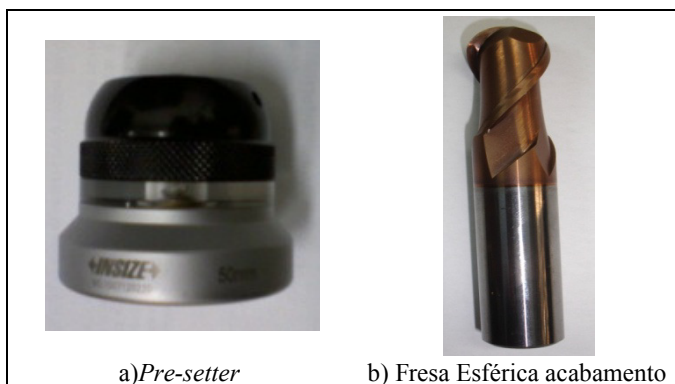


Figura 31 - *Pre-setter* e fresa esférica

Fonte: (AUTOR, 2013)

3.2 Geometria do Corpo de Prova

Para realizar a avaliação do erro de forma utilizou-se o corpo de prova com geometrias críticas, contendo superfícies com geometria complexa. A geometria utilizada neste estudo faz parte de um modelo geométrico utilizado pela associação alemã *NC-Gesellschaft* (NCG) (NCG, 2000) para homologação de centros de usinagem. A Figura 32 ilustra o modelo da NCG e destaca a região onde foi baseado o corpo de prova para os ensaios.

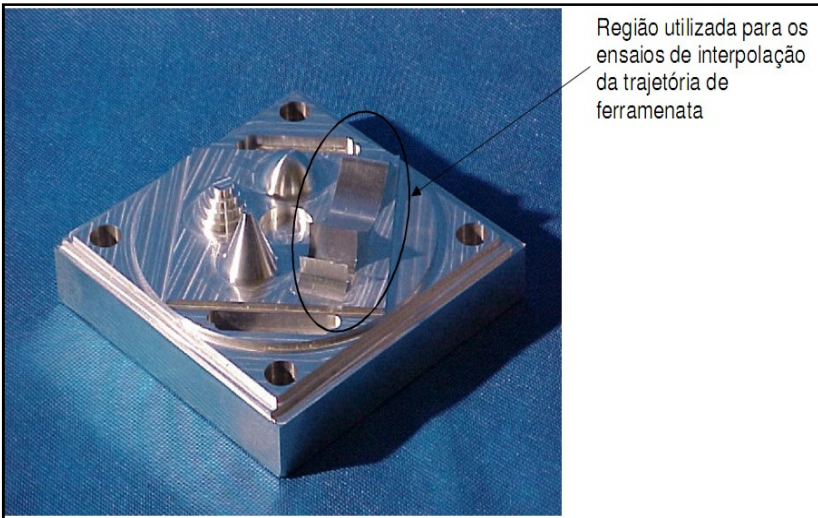


Figura 32 - Modelo geométrico desenvolvido pela NCG
Fonte: (HELLENO, 2004)

A região destacada na Figura 32 está ilustrada com mais detalhes na Figura 33, onde o modelamento do corpo de prova utilizado está representando as superfícies de referência utilizadas para as posteriores análises que serão realizadas.

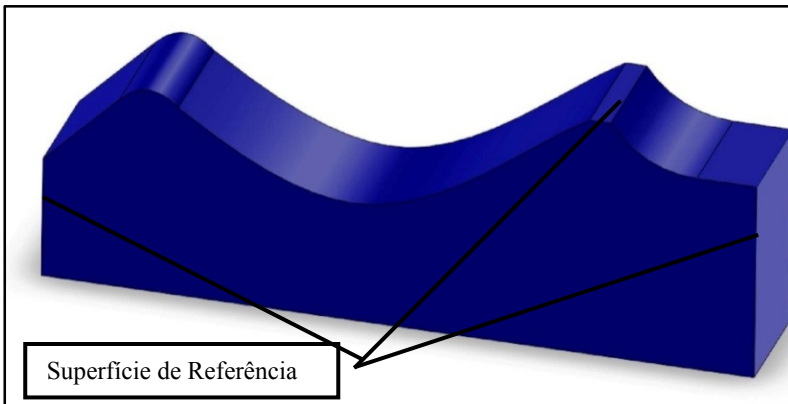


Figura 33 - Corpo de prova ensaio de erro de forma
Fonte: (AUTOR, 2013)

Para alcançar os objetivos proposto foram desenvolvido dois corpos de provas um com interpolação linear e outro com interpolação linear/circular replicado três vezes cada um, para efeitos de validação e comparação dos resultados, totalizando seis corpos de prova para estudo do erro de forma. Após a realização do estudo preliminar inseriu-se mais dois corpos de prova mudando o sentido de corte para que a ferramenta remova material apenas no sentido de corte ascendente. A Figura 34 ilustra como foi à disposição dos corpos de provas para realização dos ensaios.

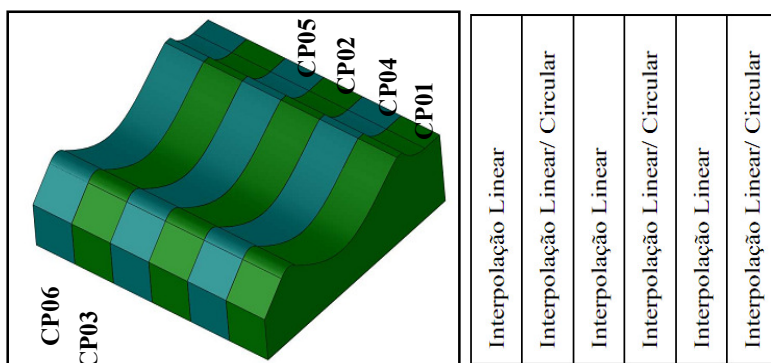


Figura 34 – Disposição dos corpos de prova
Fonte: (AUTOR, 2013)

Para melhorar a identificação a Tabela 3 descreve a codificação utilizada no ensaio com a forma de programação e o sentido de corte de cada corpo de prova.

Tabela 3 - Identificação dos corpos de prova

Corpo de Prova	Forma de Programação	Sentido de Corte
CP01	Interpolação Linear	Fresamento descendente/ ascendente
CP02	Interpolação Linear	
CP03	Interpolação Linear	
CP04	Interpolação Linear/Circular	
CP05	Interpolação Linear/Circular	
CP06	Interpolação Linear/Circular	
CP07	Interpolação Linear	Fresamento ascendente
CP08	Interpolação Linear/Circular	Fresamento ascendente

Fonte: (AUTOR, 2013)

3.3 Metodologia de Inspeção

As análises do desvio de forma dos corpos de prova foram realizadas com o auxílio da máquina de medir por coordenada *Mitutoyo Cristal Plus* modelo CP7106 ilustrada na Figura 35.



Figura 35 – Máquina de medir por coordenada
Fonte: (AUTOR, 2013)

Para as análises do erro de forma o corpo de prova foi comparado com o modelo CAD e o valor analisado é a distância perpendicular entre os pontos medidos em relação à geometria CAD que são resultantes da soma vetorial dos desvios geométricos dos eixos X e Z, medidos com 2mm de distância entre eles conforme ilustra Figura 36.

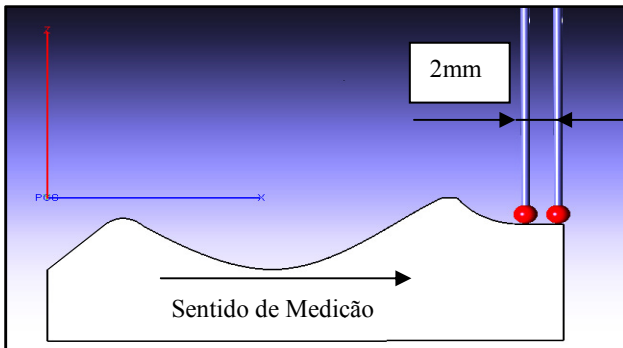


Figura 36 - Esquema de medição
Fonte: (AUTOR, 2013)

O modelo geométrico gerado no CAD é transferido para o software da máquina de medir por coordenadas. Através deste modelo o software de medição irá comparar as coordenadas teóricas com as coordenadas medidas do corpo de prova usinado. Assim a medição será por varredura de pontos em intervalos de 2 mm ao longo de sua geometria.

3.4 Descrição Das Operações

3.4.1 Estudo preliminar

Para elaboração final do experimento decidiu-se elaborar um estudo preliminar para simular e detectar algum imprevisto na execução da análise definitiva. Para tanto se utilizou o mesmo corpo de prova executando uma usinagem com trajetória de interpolação da ferramenta linear e outra linear/circular. A Tabela 4 ilustra a configuração dos corpos de provas para estudo preliminar.

Tabela 4 - Indicação dos corpos de prova estudo preliminar

Corpo de Prova	Forma de Programação	Sentido de Corte
CPA	Interpolação Linear	Fresamento descendente/ ascendente
CPB	Interpolação Linear/Circular	

Fonte: (AUTOR, 2013)

Para realização do estudo preliminar seguiu se a sequência de usinagem: desbaste com cabeçote de diâmetro 25 mm, pré-acabamento com fresa esférica de diâmetro de 10 mm e acabamento com fresa esférica de 12 mm. A Figura 37 ilustra a sequência de usinagem para estudo preliminar.

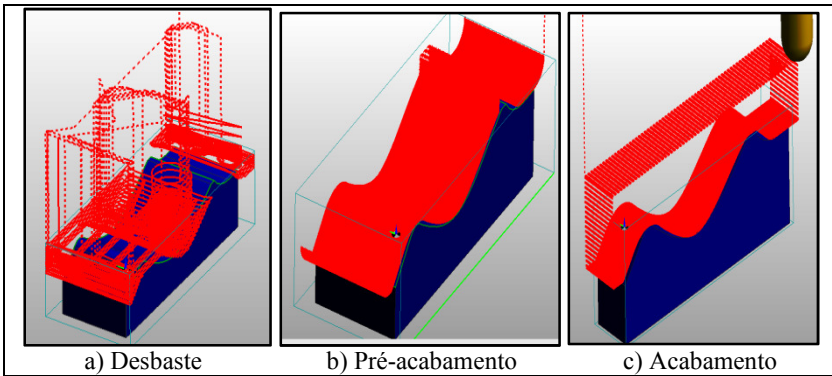


Figura 37 - Estratégia e sequência de usinagem do estudo preliminar
Fonte: (AUTOR, 2013)

Os parâmetros tecnológicos estão apresentados na Tabela 5 e foram baseados em catálogos de fornecedores de ferramentas.

Tabela 5 - Parâmetros de corte do estudo preliminar

Operação	Desbaste Geral	Pré-Acabamento	Acabamento Interpolação Linear	Acabamento Interpolação Linear/ Circular
Parâmetros				
RPM	2800	4000	5500	5500
F [mm/min]	2500	1500	1600	1600
Ap [mm]	1	0,3*	0,3	0,3
Ae [mm]	12,5	0,036	0,036	0,036
Sobre Metal	0,3	0,3	0,0	0,0
Tolerância CAM	0,01	0,01	0,01	0,01
Estratégias de Usinagem	Otimizada Zig-zag	Passes paralelos	Passes paralelos	Passes paralelos
Sentido de Corte	Concordante	Concordante	Concordante	Concordante
Ferramenta	Cabeçote com pastilhas $\varnothing 25$	Esférica de $\varnothing 10$ de metal duro	Esférica de $\varnothing 12$ de metal duro com revestimento TiSiN	Esférica de $\varnothing 12$ de metal duro com revestimento TiSiN

*O Ap é o teórico, pois o desbaste resultou em uma geometria em forma de degraus.

Fonte: (AUTOR, 2013)

3.4.2 Estudo definitivo

Na usinagem dos corpos de prova do estudo definitivo foram empregadas as operações de desbaste e acabamento. Estas estratégias foram definidas após a execução do estudo preliminar. O desbaste foi realizado bem próximo do perfil final, para propiciar remoção do sobre metal constante para o acabamento, a Figura 38a simula conforme foi realizado a usinagem de desbaste. Para o acabamento foi adotado duas estratégias de usinagem como mencionado anteriormente, a primeira (Figura 38b) realizará com sentido de corte tanto ascendente como descendente realizando a usinagem nos corpos de prova CP1 a CP06, variando apenas a forma de programação (interpolação da trajetória da ferramenta linear e linear/circular). Enquanto a segunda estratégia de usinagem, conforme ilustra a Figura 38c foi realizada a usinagem apenas no sentido de corte ascendente para os CP07 e CP08 variando apenas a forma de programação (interpolação da trajetória da ferramenta linear e linear/circular). A Figura 38 ilustra estas estratégias de usinagens.

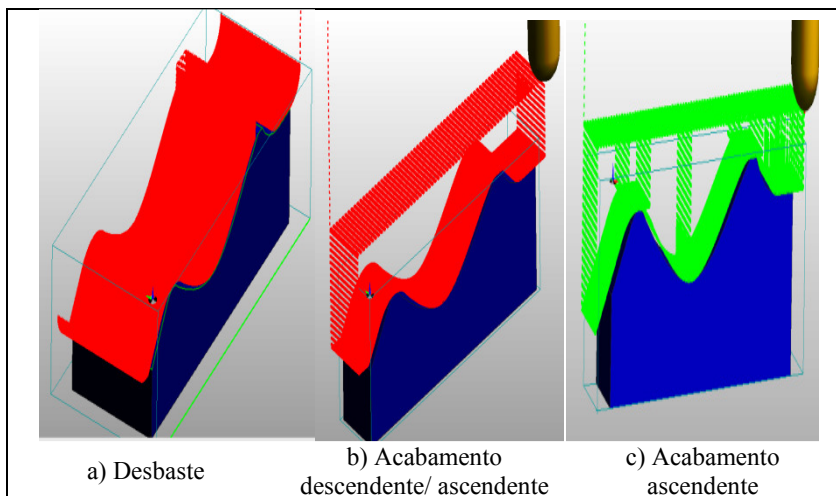


Figura 38 - Estratégia e sequência de usinagem do estudo definitivo

Fonte: (AUTOR, 2013)

Os parâmetros tecnológicos foram mantidos os mesmos, variando somente a forma de programação da trajetória da ferramenta. Como o objetivo é avaliar o erro de forma final na usinagem será realizado um

desbaste geral de todos os corpos de prova e o acabamento conforme Figura 34.

A Tabela 6 apresenta os parâmetros tecnológicos da usinagem dos corpos de provas para as operações de desbaste e acabamento do estudo definitivo baseados em catálogos de fornecedores de ferramentas e experiência adquirida com a execução do estudo preliminar.

Tabela 6 - Parâmetros de corte estudo definitivo

Operação Parâmetros	Desbaste Geral	Acabamento Interpolação Linear	Interpolação Linear/Circular
RPM	4000	5500	5500
F [mm/min]	1400	1750	1750
Ap [mm]	15	0,3	0,3
Ae [mm]	0,15	0,036	0,036
Sobre Metal	0,3	0,0	0,0
Tolerância CAM	0,01	0,01	0,01
Estratégias de Usinagem	Passes paralelos	Passes paralelos	Passes paralelos
Sentido de Corte	Concordante	Concordante	Concordante
Ferramenta	Esférica de $\varnothing 10$ de metal duro	Esférica de $\varnothing 12$ de metal duro com revestimento TiSiN	Esférica de $\varnothing 12$ de metal duro com revestimento TiSiN

Fonte: (AUTOR, 2013)

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1 Estudo Preliminar

O corpo de prova usinado neste experimento está ilustrado na Figura 39.

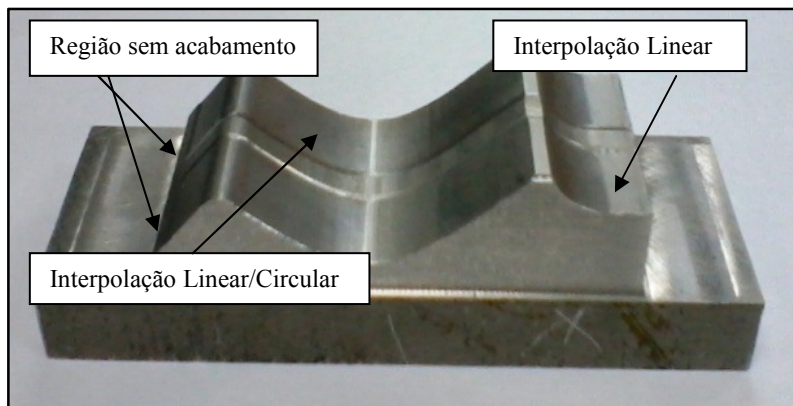


Figura 39 - Corpo de prova usinado análise preliminar
Fonte: (AUTOR, 2013)

A realização do estudo preliminar teve como objetivo detectar alguma influência que posteriormente na execução da análise definitiva, pudesse vir a interferir. As Figura 40 e Figura 41 ilustram os desvios encontrados em relação ao modelo. Utilizando-se da experiência adquirida na execução e dos dados obtidos das medições encontradas do corpo de prova do estudo preliminar é possível destacar:

- a) nas regiões 1 e 5 ambas as trajetórias obtiveram resultados dentro da faixa de tolerância imposta no sistema CAM;
- b) na região 2 foi onde houve a maior incidência de erros em ambas as trajetórias;
- c) na região 3 as trajetórias se mantiveram variando em dentro e fora da faixa de tolerância, mas com desvios abaixo dos 0,02mm;
- d) na região 4 as duas trajetórias obtiveram desvios acima da faixa de tolerâncias;

- e) como a análise da excussão dos corpos de prova não visa obter qual trajetória é mais rápida, para a execução da análise definitiva optou-se em juntar o desbaste e o pré-acabamento em uma operação utilizando uma ferramenta que possibilite que o sobre-metal seja bem próximo ao perfil final para propiciar remoção do sobre-metal constante;
- f) no início da região 1 a ferramenta de acabamento de ambas as trajetórias não retirou material devido ao erro de programação.
- g) para realização do estudo definitivo foram alterados alguns dados tecnológicos e ambos estão descritos no item 3.4;
- h) detectou-se que os maiores desvios foram nas regiões 2 e 4, ambas as regiões a ferramenta realiza a usinagem com sentido de corte descendente ocasionando instabilidade na usinagem conforme literaturas pesquisadas. Optou-se em realizar a usinagem de mais dois corpos de prova com ambas as trajetórias com o sentido de corte ascendente.

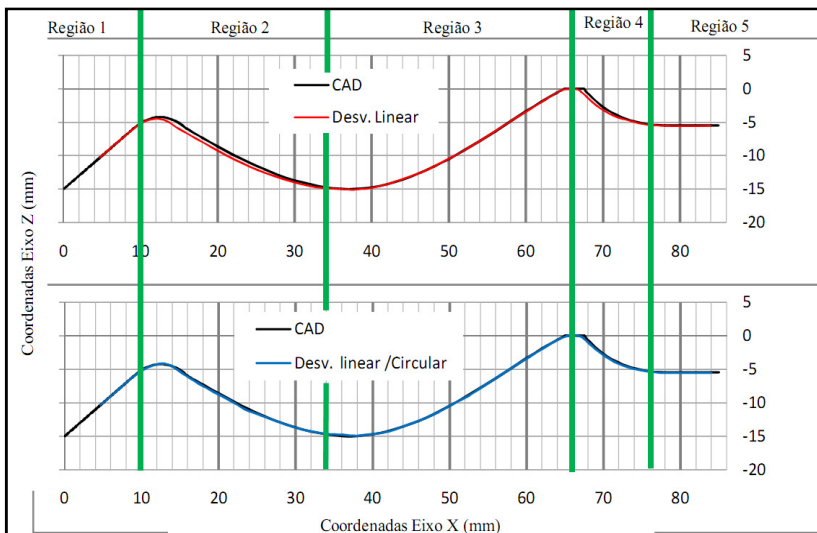


Figura 40 - Desvios geométricos x Modelo CAD

Fonte: (AUTOR, 2013)

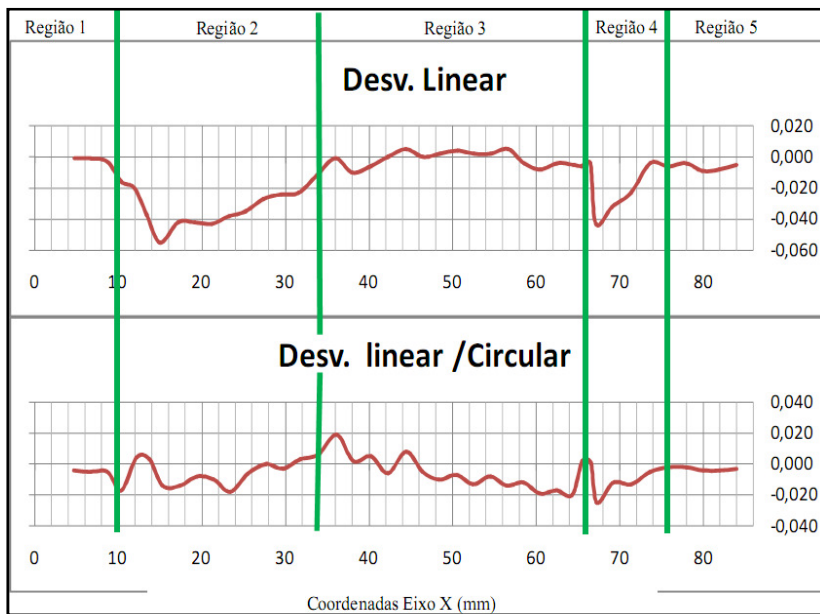


Figura 41 - Desvios geométricos análise preliminar
Fonte: (AUTOR, 2013)

4.2 Estudo Definitivo

A Figura 42 ilustra o corpo de prova usinado para estudo definitivo da trajetória da ferramenta.

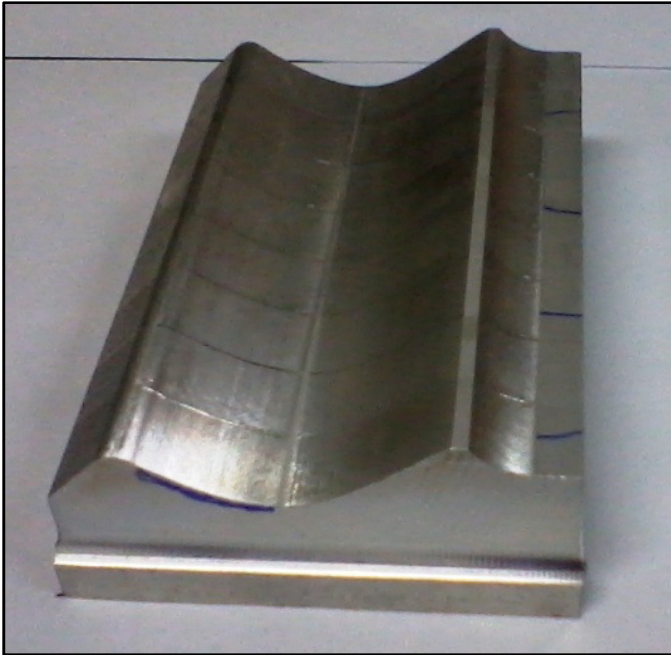


Figura 42 - Corpo de prova do estudo definitivo
Fonte: (AUTOR, 2013)

Para analisar os erros de forma de uma superfície em relação ao modelo CAD os resultados foram divididos pela estratégia de trajetória da ferramenta e descritos a seguir

Os valores dos erros de forma são a resultante vetorial dos erros de forma dos eixos X e Z, obtidos através da comparação com o modelo matemático, para evidenciar o erro de forma em comparação com o modelo foi utilizado uma ampliação de dez vezes o erro de forma.

4.2.1 Corpo de prova trajetória linear

A Figura 43 ilustra os desvios geométricos em relação ao modelo CAD onde é possível destacar:

- o erro se comportou de forma similar em todos os corpos de prova;
- a região 1 e a região 5 foram as regiões que mais se mantiveram conforme o modelo CAD;
- na região 2 e na região 4 em todos os corpos de prova a usinagem invadiu o modelo, ou seja, retirando material em excesso ocasionando um erro de forma negativo em relação ao modelo CAD;

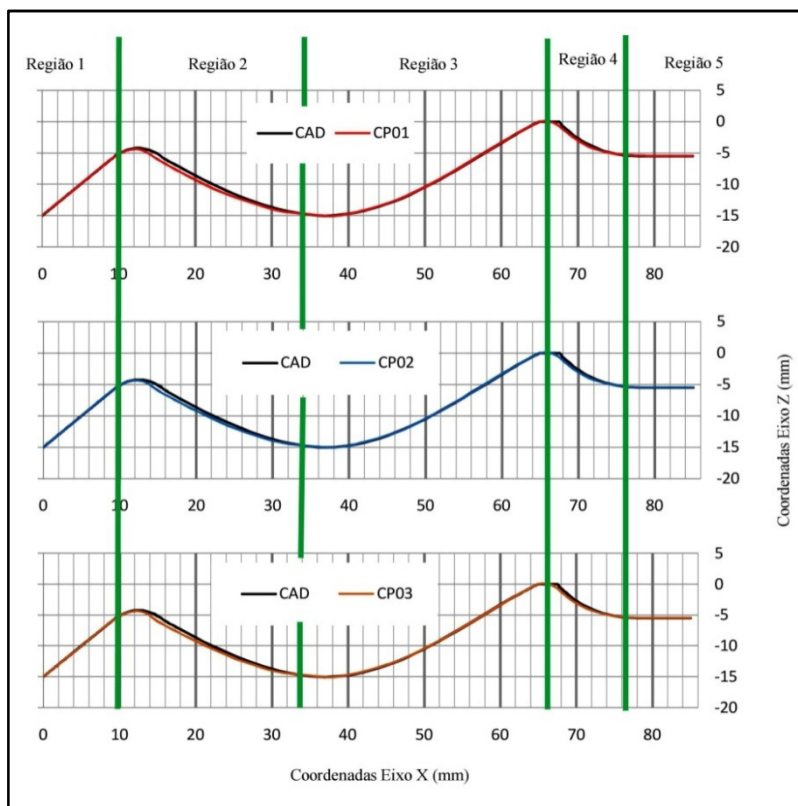


Figura 43 - Desvios x Modelo CAD trajetória linear
Fonte: (AUTOR, 2013)

A Figura 44 ilustra os desvios obtidos após a medição dos corpos de prova, através desta figura é possível observar que:

- a) na região 1, em todos os corpos de prova se mantiveram dentro da faixa de tolerância imposta ao sistema CAM para gerar a trajetórias com desvios variando de 0,000 a 0,009mm, 0,000 a 0,008mm e 0,000 a 0,008mm nos CP01, CP02 e CP03 respectivamente;
- b) na região 5, todos os corpos de prova se mantiveram dentro das faixas de tolerâncias com desvios de 0,002 a 0,006mm, 0,000 a 0,004mm e 0,000 a 0,003mm nos CP01, CP02 e CP03 respectivamente;
- c) nas regiões 1 e 5 os erros se mantiveram de forma positiva em relação ao modelo CAD, assim não invadindo o modelo CAD;
- d) na região 3 os desvios variaram entre positivo e negativo em relação ao modelo CAD com desvios entre: -0,011 a 0,016mm, -0,008 a 0,018mm e -0,007 a 0,017mm nos CP01, CP02 e CP03 respectivamente;
- e) na região 3 os desvios oscilaram entre dentro da faixa de tolerância e fora da faixa de tolerância imposta ao sistema CAM possivelmente devido a forma irregular do modelo CAD;
- f) na região 4 os desvios se mantiveram sempre de forma negativa em relação ao modelo CAD com desvios variando entre: -0,043 a 0,000mm, -0,041 a 0,000mm e -0,041 a 0,000mm nos CP01, CP02 e CP03 respectivamente;
- g) na região 2 foi onde ocorreu a maior incidência de erros de forma dos corpos de prova sempre de forma negativa em relação ao modelo CAD, com desvios de -0,057 a -0,007mm, -0,057 a -0,003mm e -0,056 a -0,003mm nos CP01, CP02 e CP03 respectivamente;
- h) as regiões 2 e 4 foram as regiões que mais tiveram erro de forma em relação ao modelo CAD possivelmente por causa do sentido de corte descendente.

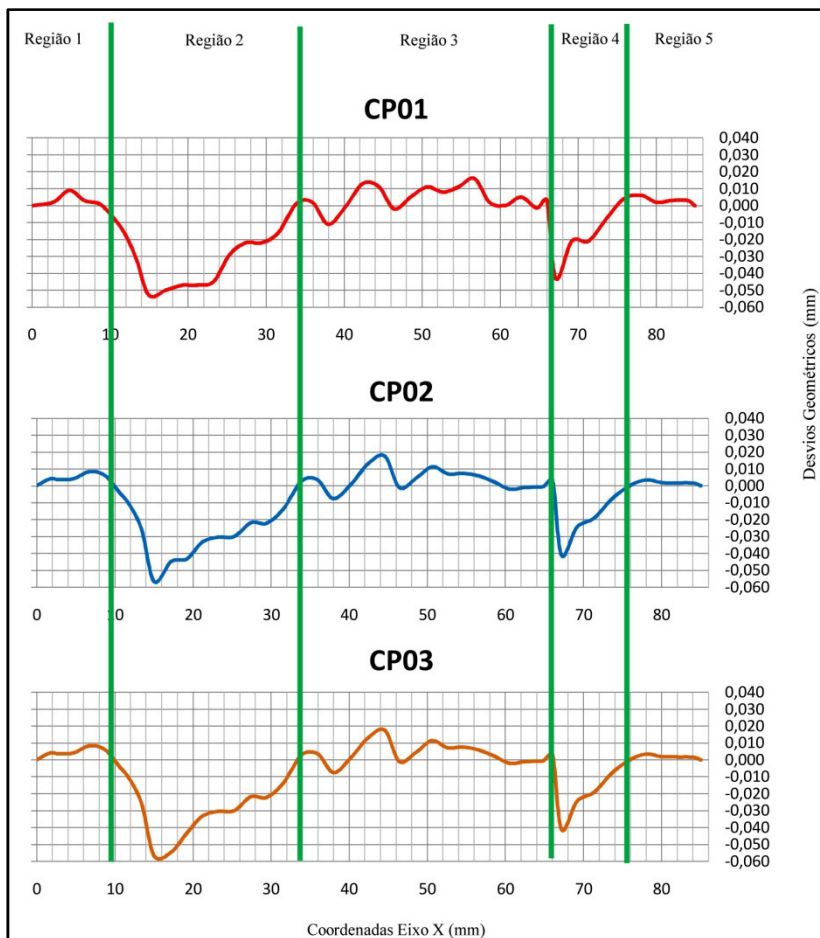


Figura 44 - Desvios geométricos trajetória linear
Fonte: (AUTOR, 2013)

4.2.2 Corpo de prova trajetória linear/circular

A Figura 45 ilustra os desvios geométricos em relação ao modelo CAD dos corpos de prova CP04, CP05 e CP06 usinados com trajetória da ferramenta linear/circular, onde é possível destacar:

- a) o erro se comportou de forma similar em todos os corpos de prova;

- b) a região 1 e a região 5 foram as regiões que mais se mantiveram conforme o modelo CAD;
- c) na região 2 e na região 4 em todos os corpos de prova a usinagem invadiu o modelo, ou seja, retirando material em excesso ocasionando um erro de forma negativo em relação ao modelo CAD;
- d) a região 3 se manteve bem próximo ao modelo CAD;

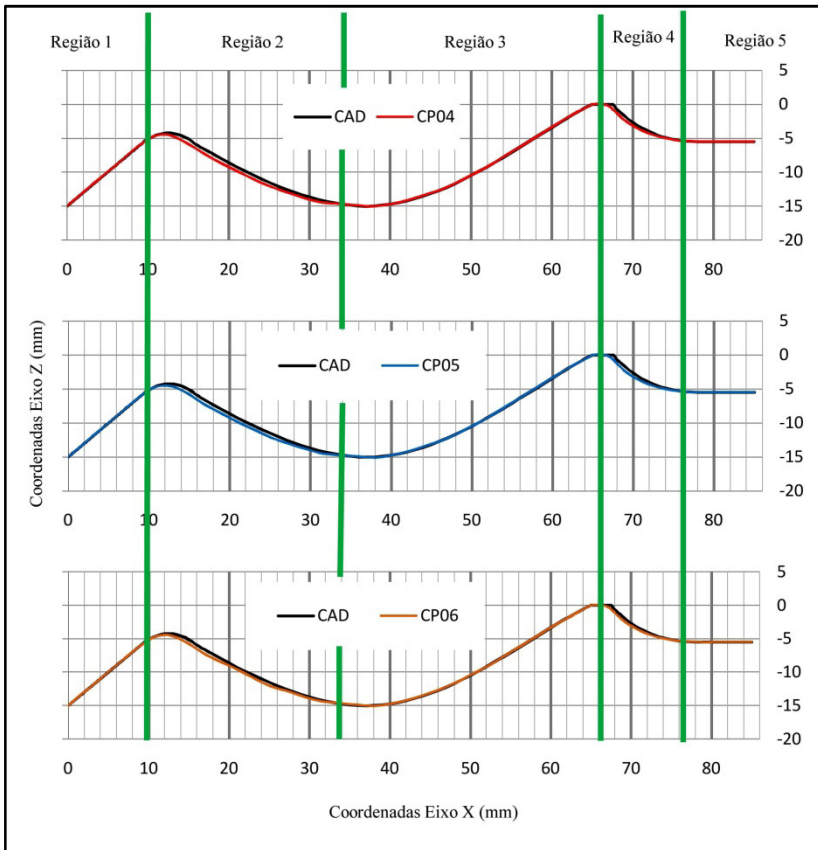


Figura 45 - Desvios x Modelo CAD trajetória linear/circular
 Fonte: (AUTOR, 2013)

A Figura 46 ilustra os desvios obtidos dos CP04, CP05 e CP06 usinados com trajetória da ferramenta linear/circular após a medição dos corpos de prova, através desta figura é possível observar que:

- a) na região 1 em todos os corpos de prova se mantiveram dentro da faixa de tolerância imposta ao sistema CAM para gerar a trajetórias com desvios variando de 0,000 a 0,009 mm, 0,000 a 0,003 mm e 0,000 a 0,003 mm nos CP04, CP05 e CP06 respectivamente;
- b) na região 5 todos os corpos de prova se mantiveram dentro das faixas de tolerâncias com desvios de 0,000 a 0,002mm, 0,000 a 0,002mm e 0,000 a 0,002mm nos CP04, CP05 e CP06 respectivamente;
- c) nas regiões 1 e 5 os erros se mantiveram de forma positiva em relação ao modelo CAD, assim não invadindo o modelo CAD;
- d) na região 3 os desvios variaram entre positivo e negativo em relação ao modelo CAD com desvios entre: -0,009 a 0,017 mm, -0,012 a 0,015mm e -0,010 a 0,010mm nos CP04, CP05 e CP06 respectivamente;
- e) o CP06 na região 3 obteve erros de forma bem próximos do limite máximo imposta ao sistema CAM, mas respeitando os limites de faixa de tolerâncias imposta ao sistema CAM;
- f) na região 3 nos CP04 e CP05 os desvios oscilaram entre dentro da faixa de tolerância e fora da faixa de tolerância imposta ao sistema CAM possivelmente devido à forma irregular do modelo CAD;
- g) na região 4 os desvios se mantiveram sempre de forma negativa em relação ao modelo CAD com desvios variando entre: -0,036 a -0,002mm, -0,035 a -0,001mm e -0,036 a 0,000mm nos CP04, CP05 e CP06 respectivamente;
- h) na região 2 foi onde ocorreu a maior incidência de erros de forma dos corpos de prova sempre de forma negativa em relação ao modelo CAD, com desvios de -0,037 a -0,001 mm, -0,039 a -0,004mm e -0,039 a -0,005 mm nos CP04, CP05 e CP06 respectivamente;
- i) as regiões 2 e 4 foram as que mais tiveram erro de forma em relação ao modelo CAD, sempre de forma negativa em relação ao modelo CAD, possivelmente por causa do sentido de corte descendente.

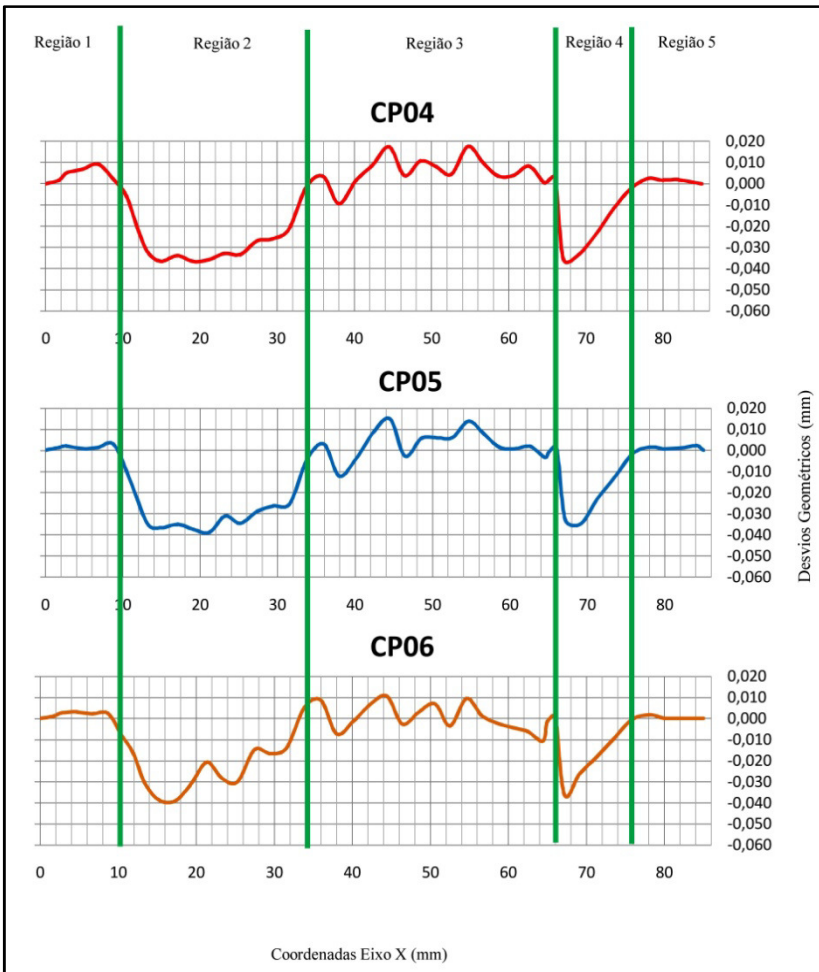


Figura 46 - Desvios geométricos trajetória linear/circular
 Fonte: (AUTOR, 2013)

4.2.3 Corpo de prova sentido de corte ascendente

As Figuras 47 e 48 ilustram os desvios geométricos em relação ao modelo CAD e os desvios geométricos em relação ao modelo CAD dos corpos de prova CP07 e CP08 usinados com trajetória da ferramenta linear e linear/circular, mas somente com sentido de corte ascendente, onde é possível destacar:

- a) a região 1 em ambos os corpos de prova se mantiveram dentro da faixa de tolerâncias imposta ao sistema CA;
- b) os desvios geométricos na região 1 foram de 0,000 a 0,003 e -0,006 a 0,000mm nos corpos de prova CP07 e CP08 respectivamente;
- c) na região 5 os corpos de prova se mantiveram dentro da faixa de tolerância com desvios de: 0,000 a -0,007mm e 0,000 a -0,004mm nos corpos de prova CP07 e CP08 respectivamente;
- d) na região 2 os desvios foram de: -0,029 a 0,014mm e -0,007 a 0,006mm nos corpos de prova CP07 e CP08 respectivamente;
- e) os CP07 e CP08 na região 3 obtiveram erros de: -0,011 a 0,014mm e -0,009 a 0,008mm respectivamente, os desvios oscilaram entre positivo e negativo em relação ao modelo CAD;
- f) na região 4 os desvios se mantiveram sempre de forma negativa, ou seja, invadindo o modelo CAD, com desvios de: -0,0029 a -0,001mm e -0,008 a -0,002mm nos corpos de prova CP07 e CP08 respectivamente;
- g) no CP07 na região 2 e na região 4 a usinagem invadiu o modelo, ou seja, retirando material em excesso ocasionando um erro de forma negativo em relação ao modelo CAD;
- h) no CP 07 nas regiões 2 e região 04 foram onde houve ocorrência de desvios mais acentuados;
- i) no CP08 na região 1 e região 5 os desvios em sua maioria se mantiveram de forma negativa em relação ao modelo CAD;
- j) no CP08 os desvios se mantiveram na maioria variando entre desvios negativos e positivos em relação ao modelo CAD;
- k) no CP08 em todas as regiões os erros de forma mantiveram-se dentro da faixa de tolerância imposta ao sistema CAM.
- l) na região 5 a ferramenta de acabamento de ambas as trajetórias riscou a peça devido ao erro de programação.

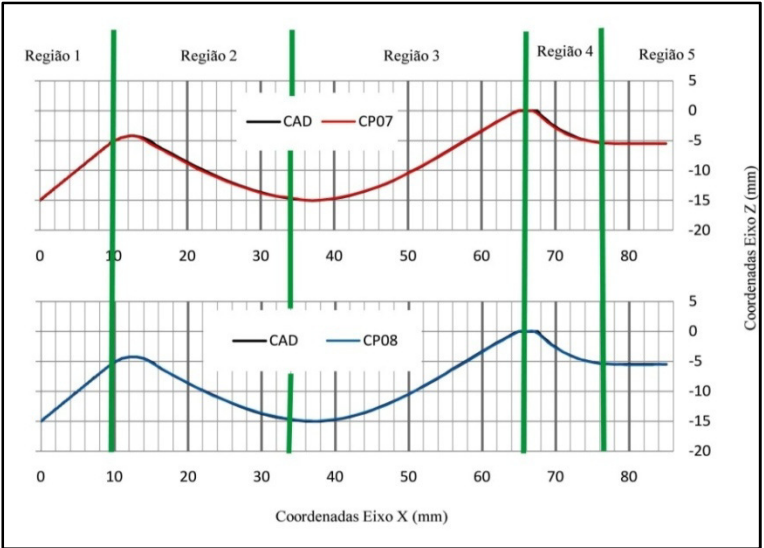


Figura 47 - Desvios x Modelo CAD Trajetórias ascendente
 Fonte: (AUTOR, 2013)

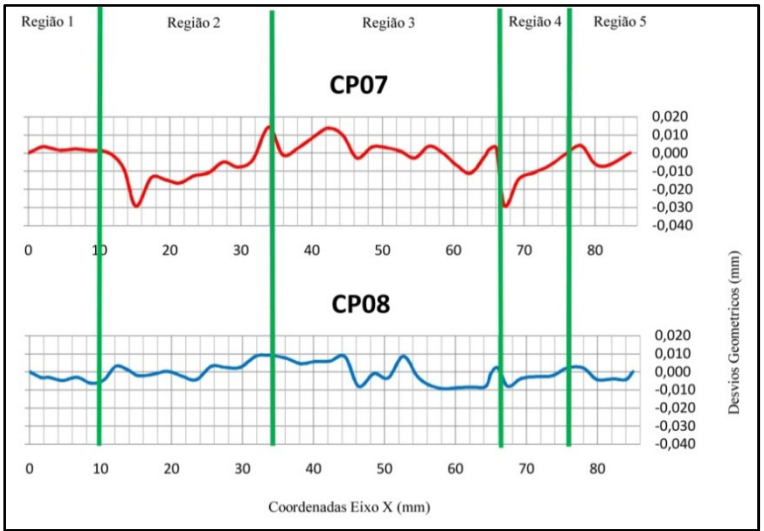


Figura 48 - Desvios geométricos trajetória ascendente
 Fonte: (AUTOR, 2013)

4.2.4 Síntese dos resultados

A Tabela 7 descreve o maior erro encontrado em cada região dos corpos de provas e a Figura 49 ilustra estes resultados em forma de gráfico comparando com a faixa de tolerância imposta ao sistema CAM onde se pode observar que:

- a) na Região 2 e região 4 os desvios de forma ocorreram sempre de forma negativa invadindo o modelo CAD;
- b) na região 1, exceto o CP08, todos os desvios de forma ocorreram de forma positiva;
- c) nas regiões 3 e 5 os maiores desvios de forma variaram de forma negativa e positiva em relação ao modelo CAD, sendo que os CP07 e CP08 foram os corpos de provas que o maior erro se comportou de forma negativa;
- d) os maiores erros de formas encontrados nas regiões foram usinados com a interpolação linear da ferramenta;
- e) com a mudança de sentido de corte resultou numa melhora significativa dos desvios de forma nas regiões 2 e 3, tanto na interpolação linear como na interpolação linear/circular;
- f) além disso, a mudança de sentido corte em geral melhorou todas as regiões;
- g) comparando os CP01, CP02 e CP03 com o CP07 ambos com mesma interpolação da trajetória da ferramenta, ou seja, interpolação da trajetória da ferramenta linear em todas as regiões houve melhora do desvio geométrico de forma, mas nas regiões 2, 3 e 4 o desvio ficou acima da faixa de tolerância imposta ao sistema CAM;
- h) na região 2, comparando o CP01, CP02 e CP03 com o CP07 o maior erro encontrado na região diminuiu de -0,057mm para -0,039mm, mas ainda fora da faixa de tolerância imposta ao sistema CAM
- i) na interpolação da trajetória linear/circular a melhora nos desvios do erro de forma na região 2 passaram de -0,039 para -0,007mm dentro da faixa de tolerância do CAM;
- j) o CP08 com interpolação da trajetória da ferramenta linear/circular com sentido de corte ascendente os desvios do erro de forma ficaram sempre dentro da faixa de tolerância do CAM;

Tabela 7 - Síntese do maior desvio geométrico de forma por região

CP	Região 1 (mm)	Região 2 (mm)	Região 3 (mm)	Região 4 (mm)	Região 5 (mm)
CP01	0,009	-0,057	0,016	-0,041	0,006
CP02	0,008	-0,057	0,018	-0,043	0,004
CP03	0,008	-0,056	0,017	-0,041	0,003
CP04	0,009	-0,037	0,017	-0,036	0,002
CP05	0,003	-0,039	0,015	-0,035	0,002
CP06	0,003	-0,039	0,010	-0,036	0,002
CP07	0,003	-0,029	-0,011	-0,015	-0,007
CP08	-0,006	-0,007	-0,009	-0,008	-0,004

Fonte: (AUTOR, 2013)

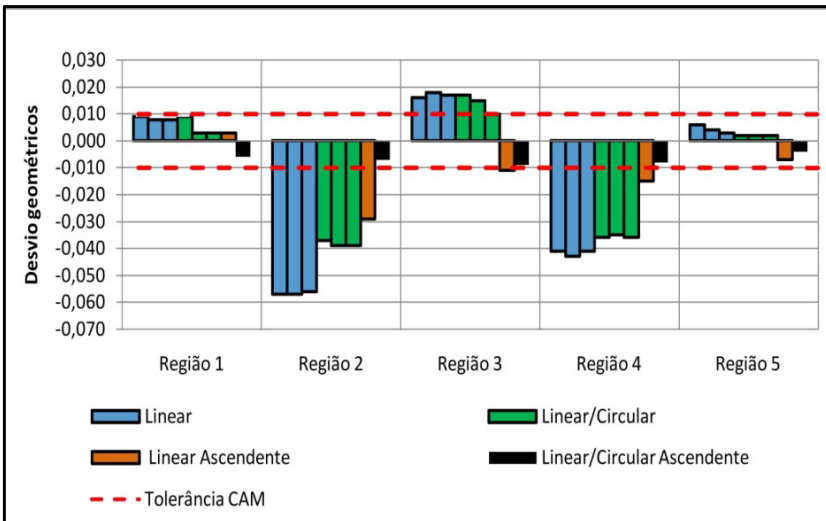


Figura 49 - Gráfico do maior desvio geométrico de forma por região

Fonte: (AUTOR, 2013)

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi abordado o tema: análise do erro geométrico de forma no fresamento CNC, aplicando métodos de programação da interpolação da ferramenta. Para tanto, foi realizado uma revisão da literatura referente ao processo de usinagem CNC apresentando os principais assuntos relevantes para este trabalho, envolvendo o fresamento, parâmetros de usinagens, usinabilidade, usinagem CNC, ciclo CAD/CAM e a interpolação da trajetória da ferramenta.

Com o objetivo geral de quantificar os erros geométricos de forma, desenvolveu-se um corpo de prova que se assemelha a uma geometria complexa, altamente utilizada na indústria, em uma plataforma CAD.

Para a usinagem dos corpos de provas foram gerados dois programas em um sistema CAM, um com interpolação da trajetória da ferramenta linear e outro linear/circular, para assim analisar os erros geométricos dos corpos de provas usinados com os dois métodos de interpolação da ferramenta, comparado com modelo CAD.

Conclui-se que a análise das metodologias de interpolação da trajetória da ferramenta linear e interpolação linear/circular, através da usinagem e medição dos corpos de prova, apontaram que a interpolação linear/circular obteve resultados de desvios geométricos de forma menor que a interpolação linear.

Assim os corpos de provas com interpolação linear/circular mesmo com variação do sentido de corte, ou seja, sentidos de corte ascendente e descendente obtiveram desvios geométricos de forma menor que se comparado com os de interpolação linear, mas em algumas regiões principalmente onde o sentido de corte foi descendente os desvios estavam fora da faixa de tolerância do sistema CAM.

Na interpolação linear/circular com sentido de corte ascendente em todas as regiões, os desvios geométricos de forma estiveram dentro da faixa de tolerância imposta ao sistema CAM. A interpolação linear com corte ascendente mostrou uma grande melhora, mas mesmo assim em algumas regiões obtiveram desvios geométricos acima da faixa de tolerância.

Outra característica importante evidenciada nos ensaios práticos é que apesar das interpolações da trajetória da ferramenta terem sido geradas com tolerância CAM de $\pm 0,01$ mm, os desvios geométricos de forma atingiram $-0,057$ e $-0,039$ mm na interpolação linear e

interpolação linear/circular respectivamente, assim com desvios até cinco vezes maior que a tolerância imposta ao sistema CAM.

Além disso, o sentido de corte ascendente e descendente influenciou nos desvios geométricos de forma. Conforme Souza (2004) relatou em estudos, as constantes variações do diâmetro de contato da ferramenta esférica com a superfície usinada podem ter contribuído para a instabilidade do processo, pois os parâmetros tecnológicos são definidos para corte com grande influência do diâmetro da ferramenta, além de tornar o um estudo mais detalhado deste assunto muito complexo.

Assim foram cumprindo todos os objetivos que tínhamos propostos, ou seja, gerar um modelo com superfícies complexas em um sistema CAD, a usinagem em plataforma CAM e quantificar os desvios geométricos de forma na usinagem CNC comparando as trajetórias de interpolação linear e a linear/circular.

Baseando-se nas conclusões e na experiência adquirida com este trabalho, sugerem-se as seguintes propostas de estudo para futuros trabalhos:

- a) avaliar os desvios geométricos de forma usinada com diferentes tolerâncias imposta ao CAM para gerar a trajetória da ferramenta.
- b) avaliar os desvios geométricos de forma usinada com diferentes interpolações de trajetória de ferramenta.
- c) analisar as características do contato ferramenta/peça, que influencia diretamente nos desvios geométricos de forma, tais como a variação do diâmetro de contato no fresamento com ferramenta esférica.
- d) analisar com mais aprofundamento o sentido de corte ascendente e descendente na usinagem de uma geometria complexa.
- e) comparar o tempo de usinagem utilizando sentido de corte ascendente e descendente na usinagem de uma geometria complexa.
- f) comparar o tempo de usinagem diversas interpolações da trajetória da ferramenta na usinagem de uma geometria complexa.

REFERÊNCIAS

ALFA ALUMÍNIO. Catálogo Técnico: Especialista Em Alumínio. **ALFA ALUMÍNIO**, 2010. Disponível em: <<http://www.alfaaluminio.com.br/downloads/catalogo.pdf>>. Acesso em: 22 set. 2013.

ARIAS, M. L. **Análise do Comportamento de Diferentes sistemas CAM na Usinagem de Superfícies Complexas Utilizando Altas Velocidades**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Macânica) - Instituto Superior Tupy. Joinville - SC, p. 101. 2009.

ARIAS, M. L.; SOUZA, A. F. Descrição matemática das funções Spline. **Máquinas e Metais**, São Paulo - SP, p. 290-311, abr. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6409**: Tolerâncias geométricas - Tolerâncias de forma, orientação, posição, batimento - Generalidades, Símbolos, definições e indicação em desenho. Rio de Janeiro: [s.n.], 1997. 19 p.

BAPTISTA, E. A. **Desenvolvimento De Um Sistema Especialista Para A Otimização Do Processo De Usinagem**. Dissertação (Mestrado Em Engenharia de Produção) - Faculdade de Engenharia Mecânica e de Produção, da Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP. Santa Bárbara d'Oeste, p. 196. 2000.

BARRIOS, D. B.; PIVETTA, L. A.; YOSHIKAWA, N. K. **Mecânica: Métodos e Processos Industrial**. São Paulo: Fundação Padre Anchieta (Coleção Técnica Interativa Serie Mecânicodo Centro Paula Souza), v. 5, 2011.

BEARD, T. Interpolating Curves. **Modern Machine Shop**, 01 out. 1997. Disponível em: <<http://www.mmsonline.com/articles/interpolating-curves#>>. Acesso em: 22 set. 2013.

CALLISTER, W. D. J.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução** - Tradução: Sergio Murilo Stamile Soares. 8º. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

CBA. Catálogo VM CBA de Perfis industriais. **COMPANHIA BRASILEIRA DE ALUMÍNIO**, 2012. Disponível em: <<http://www.vmetais.com.br/pt-BR/Negocios/Aluminio/Documents/Cat%C3%A1logo%20VM%20CBA%20de%20Perfis%20industriais%20-%20Vers%C3%A3o%20de%2020032012.pdf>>. Acesso em: 22 set. 2013.

CIMM. Portal da CIMM - Centro de Informação Metal Mecânica, 2013. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/noticia/material_didatico/4872#.UmGNuXBJNpA>. Acesso em: 18 out. 2013.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Edgar Blucher, 2003.

FERREIRA, A. M. **Estudo do Erro de Forma no fresamento de geometria complexas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Sociedade Educacional de Santa Catarina - Instituto Superior Tupy. Joinville, p. 109. 2013.

HELLENO, A. L. **Investigação de Métodos de Interpolação Para Trajetória da Ferramenta na Usinagem de Moldes e Matrizes Com Altas Velocidades**. Dissertação (Mestrado Engenharia de Produção) - Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Metodista de Piracicaba - UNIMEP. Santa Bárbara d'Oeste - SP, p. 140. 2004.

ISO. **International Organization for Standardization ISO 6983-1: Automation systems and integration - Numerical control of machines - Program format and definitions of address words - Part 1:Data format for positioning, line motion and contouring control systems**. Genebra: [s.n.], 2009.

MUNDO CNC. Site: Mundo CNC, 2008. Disponível em: <<http://www.mundo.cnc.com.br/>>. Acesso em: 22 set. 2013.

NGC. Milling Cutters and Machining Centers. Part 1. **NC GESELLSCHAFT RECOMENDATION.**, NCG 2004/Part 1, julho 2000.

PANTIGER. Site da Empresa: PANTIGER Internacional, 2006. Disponível em: <<http://www.pantiger.com.tw/pt600.asp>>. Acesso em: 29 nov. 2013.

RESOLUÇÃO CEPE/IFSC N°0119 - Normas: Trabalhos Acadêmicos. Florianópolis: Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, 2011.

ROMI. **Manual De Programação E Operação Linha ROMI D CNC FANUC 0i - MC**. Santa Bárbara D'Oeste - SP : Indústria ROMI S/A, 2012.

SCHULTZ, D. F. What's Wrong with Postprocessors? **Modern Machine Shop**, 1998. Disponível em: <<http://www.mmsonline.com/articles/what39s-wrong-with-postprocessors>>. Acesso em: 22 set. 2013.

SCHÜTZER, K.; SOUZA, A. F. Concepção do produto e fabricação utilizando a tecnologia de usinagem em altíssima velocidade de corte. In: **Anais do VI Congresso Nacional de Mecânica Aplicada e Computacional**, Aveiro - Portugal, p. 635-644, abril 2000.

SCHÜTZER, K.; STANIK, M.; SOUZA, A. F. A usinagem HSC na manufatura de moldes e matrizes. **Máquina e Metais**, São Paulo, Janeiro 2001. 92-103.

SILVA, A. C. D.; AVANZI, C. **Mecânica: Tecnologia Dos Materiais**. São Paulo: Fundação Padre Anchieta (Coleção Técnica Interativa Serie Mecânica do Centro Paula Souza), v. 2, 2011.

SKA. Material Didático Para Treinamento Edgecam, São Leopoldo - RS, 2009.

SOUZA, A. F. D. **Análise das interpolações de trajetórias de ferramenta na usinagem HSC (High Speed Cutting) em superfícies complexas**. Dissertação (Mestrado Engenharia de Produção) - Faculdade de Engenharia Mecânica e de Produção, da Universidade Metodista de Piracicaba - UNIME. Santa Bárbara d'Oeste - SP, p. 89. 2001.

SOUZA, A. F. D. **"Contribuição ao fresamento de Geometrias Complexas Aplicando a Tecnologia de Usinagem com Altas Velocidade**. Tese (Doutorado Em Engenharia Mecânica) -USP - Universidade de São paulo. Faculdade de Engenharia Mecânica, Escola de engenharia de São Carlos. São Carlos - SP, p. 171. 2004.

SOUZA, A. F. D.; COELHO, R. T. Tecnologia CAD/CAM - Definições e estado da arte visando auxiliar sua implantação em um ambiente fabril. **In: Anais do XXII - ENEGEP - Encontro Nacional de Engenheiros de Produção**, OuroPreto - MG, 2003.

SOUZA, A. F. D.; COELHO, R. T. Experimental investigation of feed rate limitations on high milling aimed at industrial applications. **Int. Jou. Adv. Manufacturing Technology**, - DOI 10.1007/s00170-006-0445-2, 2007.

SOUZA, A. F. D.; ULBRICH, C. B. L. **Engenharia Integrada Por Computador e Sistemas CAD/CAM/CNC - Princípios e Aplicação**. São Paulo: Artiber, 2009.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte I**. 7º. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2007.

STEMMER, G. E. **Ferramentas de Corte II: Brocas, Alargadores, Ferramenta de Roscar, Fresas, Brochas, Rebolos e Abrasivos**. 3º. ed. Florianopolis: Editora da UFSC, 2005.

SULTOOLS. Site da Empresa KC Comércio de Ferramentas de Corte Ltda (SULTOOLS). **Catálogo de Fresas**, 2013. Disponível em: <<http://www.sultools.com.br/produtos.html>>. Acesso em: 29 nov. 2013.

WEINERT, K.; GUNTERMANN, G. Usinagem de superfícies complexas. **Máquinas**, São Paulo, Ano.36 n. 415 2000. p. 18-27.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Programa parcial linear

%

O0001

(-IFSC - INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA-)

(-ALUNO: MARCIO DE OLIVEIRA-)

(-NOME DO PROGRAMA: TRAJETÓRIA INTERPOLAÇÃO LINEAR -)

(-DATA: 22/10/13-)

N5 G17 G21 G40 G90 G94

N10 G53 G0 Z-109 H0 G49 M9 M5

N15 G05.1 Q0

N20 T7 (-12.0 MM DIA ESFÉRICA-)

N25 M6

N30 G05.1 Q1 R1

N35 G90 G54 S5500 M3

N40 G0 X-7.418 Y14.987

N45 G43 Z5 H7

N50 Z-19.932 M8

N55 G94 G1 X-3.882 Z-16.397 F1750

N60 X4.797 Z-7.718

N65 X5.144 Z-7.393

N70 X5.463 Z-7.099

N75 X5.792 Z-6.816

N80 X6.13 Z-6.544

N85 X6.478 Z-6.285

N90 X6.835 Z-6.038

[...]

N715 X74.285 Z-4.421

N720 X74.592 Z-4.612

N725 X74.909 Z-4.785

N730 X75.235 Z-4.94

N735 X75.569 Z-5.077

N740 X75.91 Z-5.196

N745 X76.257 Z-5.296

N750 X76.609 Z-5.376

N755 X76.965 Z-5.437

N760 X77.324 Z-5.478

N765 X77.685 Z-5.499

N770 X78.046 Z-5.5

N775 X84.989

N780 X89.989

N785 G0 Z5

[...]

APÊNDICE B – Programa parcial linear/Circular

%

O0001

(-IFSC - INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA-)

(-ALUNO: MARCIO DE OLIVEIRA -)

(-NOME DO PROGRAMA: TRAJETÓRIA INTERPOLAÇÃO LINEAR /CIRCULAR-)

(-DATA: 22/10/13-)

N5 G17 G21 G40 G90 G94

N10 G53 G0 Z-109 H0 G49 M9 M5

N15 G05.1 Q0

N20 T7 (-12.0 MM DIA ESFÉRICA -)

N25 M6

N30 G05.1 Q1 R1

N35 G90 G54 S5500 M3

N40 G0 X-7.418 Y14.987

N45 G43 Z5 H7

N50 Z-19.932 M8

N55 G94 G1 X-3.882 Z-16.397 F1750

N60 X4.797 Z-7.718

N65 G18 G3 X7.97 Z-5.37 I9.16 K-9.059

N70 X14.276 Z-4.418 I4.547 K-8.764

N75 X19.025 Z-6.667 I-2.2 K-10.788

N80 G1 X19.381 Z-6.962

N85 X19.724 Z-7.272

N90 G2 X26.32 Z-11.43 I50.479 K72.769

N95 X31.528 Z-13.879 I18.215 K31.957

N100 X36.507 Z-14.981 I6.209 K16.262

N105 X40.791 Z-14.349 I0.513 K11.369

N110 X44.719 Z-12.634 I-7.126 K21.678

N115 X49.579 Z-9.584 I-25.608 K46.195

N120 X55.828 Z-4.993 I-178.774 K249.876

N125 G1 X57.911 Z-3.473

N130 G3 X62.059 Z-0.77 I32.493 K-45.319

N135 X64.941 Z0 I2.942 K-5.236

N140 G1 X65.548

N145 X67.631 Z-0.001

N150 G3 X72.492 Z-2.661 I-0.137 K-6.023

N155 G2 X78.046 Z-5.5 I5.395 K3.704

N160 G1 X84.989

N165 X89.989

N170 G0 Z

[...]

APÊNDICE C – Programa parcial linear ascendente

%

O0001

(-IFSC - INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA-)

(-ALUNO: MARCIO-)

(-NOME DO PROGRAMA: TRAJETÓRIA INTERPOLAÇÃO LINEAR ASCENDENTE -)

(-DATA: 23/10/13-)

N5 G17 G21 G40 G90 G94

N10 G53 G0 Z-109 H0 G49 M9 M5

N15 G05.1 Q0

N20 T7 (-12.0 MM DIA ESFÉRICA -)

N25 M6

N30 G05.1 Q1 R1

N35 G90 G54 S5500 M3

N40 G0 X-7.418 Y14.987

N45 G43 Z5 H7

N50 Z-19.932 M8

N55 G94 G1 X-3.882 Z-16.397 F1750

N60 X4.797 Z-7.718

N65 X5.144 Z-7.393

N70 X5.463 Z-7.099

N75 X5.792 Z-6.816

[...]

N1645 X70.236 Z-0.66

N1650 X69.93 Z-0.515

N1655 X69.617 Z-0.386

N1660 X69.297 Z-0.276

N1665 X68.971 Z-0.184

N1670 X68.64 Z-0.11

N1675 X68.306 Z-0.055

N1680 X67.97 Z-0.019

N1685 X67.631 Z-0.001

N1690 X65.549 Z0

N1695 X60.549 Z0.003

N1700 G0 Z5

N1705 X78.046

N1710 Z-0.5

N1715 G1 Z-5.5 F1000

N1720 X84.989 F1750

N1725 X89.989

N1730 G0 Z5

[...]

APÊNDICE D – Programa parcial linear/Circular ascendente

%

O0001

(-IFSC - INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA-)

(-ALUNO: MARCIO-)

(-NOME DO PROGRAMA: TRAJETÓRIA INTERPOLAÇÃO
LINEAR/CIRCULAR ASCENDENTE-)

(-DATA: 23/10/13-)

N5 G17 G21 G40 G90 G94

N10 G53 G0 Z-109 H0 G49 M9 M5

N15 G05.1 Q0

N20 T7 (-12.0 MM DIA ESFÉRICA -)

N25 M6

N30 G05.1 Q1 R1

N35 G90 G54 S5500 M3

N40 G0 X-7.418 Y14.987

N45 G43 Z5 H7

N50 Z-19.932 M8

N55 G94 G1 X-3.882 Z-16.397 F1750

N60 X4.797 Z-7.718

N65 G18 G3 X7.97 Z-5.37 I9.16 K-9.059

N70 X12.631 Z-4.256 I4.61 K-8.982

N75 G1 X17.631 Z-4.208

N80 G0 Z5

N85 X36.975

N90 Z-9.993

N95 G1 Z-14.993 F1000

[...]

N210 Z-0.5

N215 G1 Z-5.517 F1000

N220 X78.046 Z-5.5 F1750

N225 G3 X72.492 Z-2.661 I-0.159 K6.543

N230 G2 X67.631 Z-0.001 I-4.998 K-3.363

N235 G1 X65.548 Z0

N240 X60.548 Z0.003

N245 G0 Z5

N250 X78.046

N255 Z-0.5

N260 G1 Z-5.5 F1000

N265 X84.989 F1750

N270 X89.989

N275 G0 Z5

[...]

APÊNDICE E – Desenho do corpo de prova

