

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ESTRATÉGIA DE USINAGEM NO
PROCESSO DE FRESAMENTO DE SUPERFÍCIE COMPLEXA EM
CENTRO DE USINAGEM CINCO EIXOS**

DANIEL PION ANTONIO

ORIENTADOR: PROF. DR. ANDRÉ LUÍS HELLENO

SANTA BÁRBARA D'OESTE

2019

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ESTRATÉGIA DE USINAGEM NO
PROCESSO DE FRESAMENTO DE SUPERFÍCIE COMPLEXA EM
CENTRO DE USINAGEM CINCO EIXOS**

DANIEL PION ANTONIO

ORIENTADOR: PROF. DR. ANDRÉ LUÍS HELLENO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

SANTA BÁRBARA D'OESTE

2019

ANTONIO, Daniel Pion. **Análise da influência da estratégia de usinagem no processo de fresamento de superfície complexa em centro de usinagem cinco eixos**. 2019. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste - SP.

RESUMO

A crescente utilização de produtos que são representados geometricamente por curvas e superfícies complexas tem transformado as exigências sobre os processos de fabricação. A otimização de tecnologias, como o fresamento em cinco eixos, auxilia nesses desafios, uma vez que é capaz de obter melhores índices de desempenho (custo, tempo, qualidade), quando comparado à tecnologia de fresamento em três eixos. Entretanto, diversos estudos relacionados a algumas características já bastante conhecidas para o fresamento em três eixos, não foram suficientemente exploradas para o processo em cinco eixos. Dentre estas, a estratégia de usinagem e a interpolação da trajetória da ferramenta são pontos que podem afetar diretamente os índices de desempenho já mencionados. Diante disso, este trabalho teve por objetivo, analisar características de aplicação de diferentes estratégias de usinagem no processo de fresamento em centro de usinagem cinco eixos. Para isto, foram feitos experimentos considerando diferentes estratégias de usinagem, os quais evidenciaram as influências das estratégias utilizadas, com relação ao tempo de usinagem, desempenho dinâmico da máquina e exatidão geométrica dos itens produzidos. Os resultados evidenciaram a superioridade das estratégias de usinagem em 3+2 Eixos, quando comparada com a usinagem Cinco Eixos em relação ao tempo de usinagem, entretanto em relação à exatidão geométrica o processo de manufatura Cinco Eixos apresentou menores oscilações.

PALAVRAS-CHAVE: Superfícies Complexas; Usinagem Cinco Eixos; Estratégias de Usinagem; Desempenho de Usinagem.

ANTONIO, Daniel Pion. **Influence analysis of the machining strategy on the process of surface milling in five axis machining center**. 2019. 138 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste - SP.

ABSTRACT

The increasing use of products geometrically represented by curves and complex surfaces has been transforming the manufacturing processes demands. The improvement of technologies, such as five-axis milling, assists in these challenges, as it is able to achieve better performance indices (cost, time, quality) when compared to three-axis milling technology. However, several studies related to some features, already known for three-axis milling, have not been so exploited for the five-axis process. Among these aspects, the machining strategy and the tool trajectory interpolation are points that can directly affect the performance indexes already mentioned. Accordingly, this work aims to analyze the application features of different machining strategies on the milling process in five axis machining center. In order to do so, experiments were performed considering different machining strategies, which highlighted the influences of the strategies used, regarding the machining time, dynamic machine performance and geometric accuracy of produced items. The results evidenced the machining strategies superiority in 3 + 2 Axes, when compared to Five Axes Machining in relation to the machining time, however in relation to the geometric accuracy, the Five Axis manufacturing process presented smaller oscillations.

KEYWORDS: *Freeform Surfaces; Five Axis Machining; Machining Strategies; Machining Performance.*

SUMÁRIO

RESUMO	III
ABSTRACT	IV
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	X
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XI
LISTA DE NOTAÇÕES E SÍMBOLOS	XII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	4
1.2. OBJETIVOS.....	6
1.3. MÉTODO DE PESQUISA.....	7
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO	8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1. PARÂMETROS DE USINAGEM.....	14
2.2. CADEIA CAD/CAM/CNC	23
2.3. MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO DA TRAJETÓRIA DA FERRAMENTA	25
2.3.1. INTERPOLAÇÃO LINEAR	34
2.3.2. INTERPOLAÇÃO INDIRETA POR RECURSOS DE OTIMIZAÇÃO DO CNC	39
2.3.2.1. INTERPOLAÇÃO SPLINE	41
3. MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1. CORPO DE PROVA	47
3.2. FERRAMENTAS DE CORTE	48
3.3. MÁQUINA-FERRAMENTA	49
3.4. ENSAIOS EXPERIMENTAIS	51
3.4.1. EXATIDÃO GEOMÉTRICA.....	51
3.4.2. TEMPO DE USINAGEM	53
3.4.3. VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE AVANÇO.....	53
4. DESENVOLVIMENTO DOS ENSAIOS	55
4.1. DESCRIÇÃO DAS OPERAÇÕES	56

4.1.1.	DESBASTE	58
4.1.2.	PRÉ-ACABAMENTO.....	59
4.1.3.	ACABAMENTO.....	60
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
5.1.	ANÁLISE DO MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO LINEAR.....	64
5.2.	ANÁLISE DA EXATIDÃO GEOMÉTRICA	66
5.3.	ANÁLISE DO TEMPO DE USINAGEM	70
5.4.	ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE AVANÇO	72
5.4.1.	VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE AVANÇO – LINEAR (3+2 EIXOS)	76
5.4.2.	VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE AVANÇO – LINEAR + “CYCLE 832” (3+2 EIXOS) 78	
5.4.3.	VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE AVANÇO – LINEAR + “CYCLE 832” - CINCO EIXOS 80	
5.5.	ANÁLISE DE CORRELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS AVALIADOS.....	82
6.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	86
6.1.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	88
7.	REFERÊNCIAS	90
	APÊNDICE A - PROGRAMA DE MONITORAMENTO DA VELOCIDADE DE AVANÇO	102
	APÊNDICE B - PROGRAMA DA TRAJETÓRIA LINEAR - X = 5 MM.....	105
	APÊNDICE C - PROGRAMA DA TRAJETÓRIA LINEAR - X = 15 MM.....	108
	APÊNDICE D - PROGRAMA DA TRAJETÓRIA LINEAR - X = 25 MM.....	112
	APÊNDICE E - PROGRAMA DA TRAJETÓRIA “CYCLE 832” - X = 5 MM	116
	APÊNDICE F - PROGRAMA DA TRAJETÓRIA “CYCLE 832” - X = 15 MM.....	119
	APÊNDICE G - PROGRAMA DA TRAJETÓRIA “CYCLE 832” - X = 25 MM	123
	APÊNDICE H - PROGRAMA DA TRAJETÓRIA CINCO EIXOS - X = 5 MM.....	127
	APÊNDICE I - PROGRAMA DA TRAJETÓRIA CINCO EIXOS - X = 15 MM	133
	APÊNDICE J - PROGRAMA DA TRAJETÓRIA CINCO EIXOS - X = 25 MM.....	136

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – CONFIGURAÇÃO CINEMÁTICA - MÁQUINA CINCO EIXOS (X, Y, Z – B,C) ...	12
FIGURA 2 – MOVIMENTOS DE USINAGEM – FRESAMENTO	15
FIGURA 3 – REPRESENTAÇÃO DOS PASSOS DE AVANÇO DA TRAJETÓRIA DA FERRAMENTA.....	16
FIGURA 4 – ORIENTAÇÃO DE CORTE	17
FIGURA 5 – RELAÇÃO ENTRE PONTO CC E CL	18
FIGURA 6 – POSICIONAMENTO DA FERRAMENTA	20
FIGURA 7 – SISTEMA DE COORDENADAS PARA A GERAÇÃO DA TRAJETÓRIA DA FERRAMENTA.....	21
FIGURA 8 – FAIXA EFETIVA DE CORTE	22
FIGURA 9 – REGIÃO DE USINAGEM (A); LARGURA DA FAIXA DE USINAGEM (B)	23
FIGURA 10 – FONTES DE ERROS DA ETAPA CAD – CAM	25
FIGURA 11 – EXEMPLO DE DIFERENTES CAMINHOS DA FERRAMENTA	27
FIGURA 12 – MÉTODOS DE GERAÇÃO DA TRAJETÓRIA	28
FIGURA 13 – PONTOS CC AO LONGO DA TRAJETÓRIA	31
FIGURA 14 – ETAPAS DA GERAÇÃO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL E PÓS-PROCESSAMENTO	32
FIGURA 15 – MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO DA TRAJETÓRIA DA FERRAMENTA	33
FIGURA 16 – MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO LINEAR.....	35
FIGURA 17 – INTERFERÊNCIA DA FERRAMENTA INDUZIDA PELA INCLINAÇÃO SUPERFICIAL	37
FIGURA 18 – CRIAÇÃO DE CURVAS COM O AUXÍLIO DE "DUCKS".....	41
FIGURA 19 – MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO B-SPLINE.....	43
FIGURA 20 – (A) CURVA B-SPLINE DE GRAU 9; (B) CURVA B-SPLINE DE GRAU 2	45
FIGURA 21 – ETAPAS DA FASE EXPERIMENTAL	47
FIGURA 22 – DIMENSÕES BÁSICAS DO CORPO DE PROVA EM MILÍMETRO (MM)	48
FIGURA 23 – INSERTO INTERCAMBIÁVEL - R390-11 T3 08M-PM 1130.....	48
FIGURA 24 – FRESA ESFÉRICA UTILIZADA NA FASE EXPERIMENTAL.....	49
FIGURA 25 – ESTRUTURA DA MÁQUINA ROMI DCM 620-5X.....	50

FIGURA 26 – ÂNGULO DE INCLINAÇÃO (B) E ROTAÇÃO (C).....	51
FIGURA 27 - FACES DE REFERÊNCIA DO CORPO DE PROVA	52
FIGURA 28 - PLANO DE MEDIÇÃO DO CORPO DE PROVA (MM)	53
FIGURA 29 – NÚMERO DE EXPERIMENTOS POR VARIÁVEL DO PROCESSO.....	56
FIGURA 30 – POSICIONAMENTO DO CORPO DE PROVA NO SISTEMA CAM	57
FIGURA 31 – FIXAÇÃO DO CORPO DE PROVA NA MÁQUINA.....	58
FIGURA 32 – SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DE DESBASTE	59
FIGURA 33 – SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DE PRÉ-ACABAMENTO.....	60
FIGURA 34 – SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DE ACABAMENTO EM 3+2 EIXOS	62
FIGURA 35 – SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DE ACABAMENTO EM CINCO EIXOS	62
FIGURA 36 – TAMANHO DOS SEGMENTOS DE RETA ENTRE AS ESTRATÉGIAS DE USINAGEM.....	65
FIGURA 37 – DESVIO ENTRE OS MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO – LINHA 1 (x = 5 MM)	67
FIGURA 38 - DESVIO ENTRE OS MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO – LINHA 2 (x = 15 MM)	68
FIGURA 39 - DESVIO ENTRE OS MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO – LINHA 3 (x = 25 MM)	69
FIGURA 40 - TEMPOS DE USINAGEM - VELOCIDADE DE AVANÇO 2.500 MM/MIN	70
FIGURA 41 - TEMPOS DE USINAGEM - VELOCIDADE DE AVANÇO 5.000 MM/MIN	71
FIGURA 42 - TEMPOS DE USINAGEM OBTIDOS - VELOCIDADE DE AVANÇO 10.000 MM/MIN	72
FIGURA 43 - COMPORTAMENTO DA VELOCIDADE DE AVANÇO – $V_F = 2.500$ MM/MIN..	73
FIGURA 44 - COMPORTAMENTO DA VELOCIDADE DE AVANÇO - $V_F = 5.000$ MM/MIN ..	74
FIGURA 45 - COMPORTAMENTO DA VELOCIDADE DE AVANÇO - $V_F = 10.000$ MM/MIN.	75
FIGURA 46 - COMPORTAMENTO DA VELOCIDADE DE AVANÇO – LINEAR (3+2 EIXOS)	77
FIGURA 47 - COMPORTAMENTO DA VELOCIDADE DE AVANÇO – LINEAR + "CYCLE 832" - 3+2 EIXOS.....	79
FIGURA 48 - COMPORTAMENTO DA VELOCIDADE DE AVANÇO – LINEAR + "CYCLE 832" - CINCO EIXOS	81
FIGURA 49 - CORRELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS AVALIADOS – LINEAR - 3+2 EIXOS	82
FIGURA 50 - CORRELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS AVALIADOS – LINEAR + "CYCLE 832" - 3+2 EIXOS	83

FIGURA 51 - CORRELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS AVALIADOS – LINEAR + “CYCLE 832” – CINCO EIXOS.....	84
---	----

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS INSERTO INTERCAMBIÁVEL R390-11 T3 08M-PM 1130	48
TABELA 2 - CARACTERÍSTICAS DIMENSIONAIS – FRESA ESFÉRICA 8MM	49
TABELA 3 – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS EIXOS ROTATIVOS (B E C)	50
TABELA 4 - POSIÇÕES DAS LINHAS DE MEDIÇÃO.....	52
TABELA 5 – PARÂMETROS UTILIZADOS NA OPERAÇÃO DE DESBASTE.....	58
TABELA 6 - PARÂMETROS UTILIZADOS NA OPERAÇÃO DE PRÉ-ACABAMENTO.....	60
TABELA 7 - PARÂMETROS UTILIZADOS NA OPERAÇÃO DE ACABAMENTO.....	61
TABELA 8 – RESULTADOS COMPARATIVOS ENTRE AS ESTRATÉGIAS DE USINAGEM ..	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANSI – *American National Standards Institute*

B-Spline – *Basis-Spline*

CAD – *Computer Aided Design*

CAM – *Computer Aided Manufacturing*

CC – *Cutter Contact* (Ponto de Contato Ferramenta-Peça)

CL – *Cutter Location* (Ponto de Referência da Ferramenta)

CL-Data – *Cutter Location Data*

CLF – *Cutter Location File*

CNC – *Comando Numérico Computadorizado*

ETO – *Engineer to Order*

HSM – *High Speed Machining*

ISO – *International Organization for Standardization*

NC – *Numeric Control*

NCU – *Numerical Control Unit*

NURBS – *Non Uniform Rational B-Spline*

TTM – *Time to Market*

LISTA DE NOTAÇÕES E SÍMBOLOS

a_e – Passo Lateral;

a_p – Profundidade de Corte;

B_i – Vértices do Polígono de Controle;

D – Diâmetro da Ferramenta;

f – Avanço;

$f_s(x)$ – Função de Força Atuante Sobre Nós;

f_z – Avanço por Aresta;

I – Segmento Linear;

I_x^2 – Deslocamento no Eixo x;

I_y^2 – Deslocamento no Eixo y;

I_z^2 – Deslocamento no Eixo z;

k – Ordem da Curva B-Spline;

k_{t1} e k_{t2} – Curvas Principais da Ferramenta de Corte;

n – Rotação do Eixo Árvore;

n – Vetor Normal;

$n + 1$ – Quantidade de Pontos do Polígono de Controle;

$N_{i,k}(t)$ – Função de Suavização (*Basis-Spline*);

$\{N_{i,p}(u)\}$ – Funções de Base B-Spline de Grau “ P ”, Definidas em um Vetor de Nós Não Periódico e Não-Uniforme;

$P(t)$ – Função de uma Determinada Curva;

$\{P_i\}$ – Pontos de Controle (que definem os polígonos);

r – Raio Menor da Ponta da Ferramenta;

R – Raio de Curvatura da Superfície;

R_1 – Raio Maior da Ponta da Ferramenta;

R_c – Movimento da Trajetória Circular;

$Rot\theta_n$ – Rotação do Ângulo de Mudança de Direção;

$Rot\theta_t$ – Rotação do Ângulo de Inclinação;

t – Parâmetro da Curva que Varia de t_{min} à t_{max} ;

Te – Tolerâncias Externas;

Ti – Tolerâncias Internas;

u – Vetor de Orientação da Ferramenta;

V_c – Velocidade de Corte;

V_f – Avanço;

$\{w_i\}$ – Pesos Aplicados à Curva;

x_c – Centro do Arco Circular no Plano x ;

x_i – Vetores Internos do Parâmetro “ t ” Dentro da Relação $x_i \leq x_{i+1}$;

y_c – Centro do Arco Circular no Plano y ;

Z_t – Superfície de Contato da Ferramenta no Ponto CC;

α e θ – Ângulos de Rotação;

θ_n – Ângulo de Mudança de Direção;

θ_t e λ – Ângulos de Inclinação;

ρ – Raio da ponta da Ferramenta;

1. INTRODUÇÃO

Devido às variações de demanda e aumento nas exigências dos mercados consumidores, os sistemas de produção vêm sofrendo transformações significativas. A princípio, produtos personalizados, com pequenos volumes de produção e feitos sob medida perderam espaço no século XX para a fabricação em massa, a qual se diferenciava por conter altos volumes e baixa personalização (KENDRICK *et al.*, 2015).

Na chamada customização em massa, buscam-se obter sistemas de produção capazes de produzir grandes quantidades e com baixos custos, como na produção em massa, porém com produtos passíveis de personalização (CHU, 2014).

Para atender tais necessidades, a indústria de manufatura esforça-se para encontrar maneiras de elevar sua produtividade, buscando diminuir seus *lead time*, custos e *Time to Market* (TTM) de novos produtos, além de buscar sua adequação a fatores ambientais, os quais podem ser, em diversos casos, considerados pontos relevantes para os consumidores (CHU, 2014).

Esses desafios são ainda mais prevalentes para alguns nichos de mercado, quando há a necessidade do desenvolvimento de novos produtos que possuem pequenos volumes de fabricação, como nos casos de ETO – *Engineer to Order* (MACDONALD *et al.*, 2014).

Para estes casos, podem ser vantagens competitivas para os fabricantes a inserção de novos processos de fabricação e ferramentais personalizados, os quais podem conter elevado nível tecnológico, geometrias complexas, grandes detalhamentos, entre outras características que aumentam as dificuldades de fabricação (MANOGHARAN *et al.*, 2016).

Ainda neste contexto, a crescente utilização por setores como o aeronáutico (asas e turbinas de aeronaves), automotivo (carrocerias), construção naval,

energia, entre outros setores, forçaram com que as empresas envolvidas encontrassem um processo geral otimizado, que seja capaz de reduzir os custos de processamento, aumentar a qualidade final do produto e reduzir o tempo de entrega (GRANDGUILLAUME *et al.*, 2015).

Diante disso, *designers* têm usado geometrias complexas para compor as formas dos produtos para serem mais atraentes para o *mercado*, o que, conseqüentemente, aumenta a complexidade de fabricação e exige um processo de manufatura otimizado (DE SOUZA *et al.*, 2014).

Neste contexto, encontram-se as indústrias de moldes e matrizes, as quais representam uma posição chave em toda a cadeia de fabricação dos itens dependentes destes ferramentais. Estas são em grande parte indústrias com processos tradicionais, como a estampagem e a moldagem, e o *lead time* para fabricação e entrega desses ferramentais específicos é significativo, além do custo fixo atrelado à produção ser elevado, sendo também necessária a substituição dos moldes e matrizes a cada *design* de novos produtos ou partes individuais (MANOGHARAN *et al.*, 2016).

Em relação ao processo de fabricação, 60% do tempo pode ser atribuído à fabricação das partes funcionais do molde (cavidades), existindo várias inconveniências na fase efetiva de fabricação, como limitações tecnológicas de equipamentos e máquinas, até a falta de desenvolvimento dos processos de manufatura (DE SOUZA *et al.*, 2014).

O método mais utilizado na produção desses ferramentais constitui-se, basicamente, pela cadeia CAD/CAM/CNC (LASEMI *et al.*, 2010).

A primeira etapa desta cadeia é composta pelo modelamento do produto auxiliado por um sistema CAD (*Computer Aided Design*), onde as dimensões e formas do produto são projetadas e definidas. Posteriormente, na segunda etapa, a trajetória da ferramenta para o processo de usinagem é definida, através do auxílio de um sistema computacional CAM (*Computer Aided Manufacturing*) (LANGERON *et al.*, 2004; CHOI E JERARD, 1998).

Na terceira etapa, realiza-se a compreensão dos movimentos realizados na trajetória da ferramenta a partir de uma atividade denominada de pós-processamento. Nesta, gera-se um arquivo de programa com normas da *International Organization for Standardization* (ISO), o qual pode ser entendido pela unidade de controle numérico (*Numeric Control* - NC) que, então, executa os movimentos previamente definidos, produzindo efetivamente a peça (LANGERON *et al.*, 2004; CHOI E JERARD, 1998).

Esta tecnologia de fabricação (CAD/CAM/CNC) é uma das tecnologias mais eficientes disponíveis (LASEMI *et al.*, 2010), uma vez que é capaz de gerar automaticamente os movimentos das ferramentas em concordância com os movimentos da peça (SHE e TSAI, 2011).

Entretanto, apesar destas vantagens e facilidades, algumas variáveis inseridas durante a programação podem influenciar diretamente a eficiência do processo. Dentre estas, a geração da trajetória da ferramenta e a estratégia de usinagem são pontos relevantes, uma vez que as curvas que representam as geometrias dos produtos com superfícies complexas induzem desvios geométricos, dificultando a obtenção do produto final exatamente como desejado (CAO *et al.*, 2011; UHLMANN *et al.*, 2013).

Além da cadeia CAD/CAM/CNC, a máquina-ferramenta também tem evoluído, buscando melhorar a qualidade superficial, produzir itens com maior complexidade geométrica, reduzir o tempo de fabricação, entre outros fatores mencionados anteriormente. Dentre essas evoluções, desenvolveu-se a usinagem em cinco eixos (SHE e TSAI, 2011).

Quando comparada com a usinagem tradicional de máquinas-ferramentas de três eixos, a usinagem em cinco eixos simultâneos é capaz de eliminar erros causados pelo reposicionamento da peça, uma vez que a máquina oferece dois graus adicionais de movimentos rotativos, tornando-se assim, uma tendência em usinagem de exatidão (SHE e TSAI, 2011). Além disso, a usinagem em cinco eixos possibilita maior taxa de remoção de material, redução do comprimento da

ferramenta de corte, melhor acabamento da superfície, entre outras vantagens (HUO *et al.*, 2010).

Os benefícios desta tecnologia foram considerados suficientes para torná-la interessante até mesmo para a produção em baixa escala (HUO *et al.*, 2010; BANG *et al.*, 2004; PESSOLES e TOURNIER, 2009).

Entretanto, apesar de tantas vantagens, as estratégias de usinagem em cinco eixos possuem grandes quantidades de dados quando comparadas às estratégias em três eixos tradicionais (CAN e ÜNÜVAR, 2009).

Devido à variação geométrica das superfícies complexas, é difícil definir as melhores condições, métodos de interpolação da ferramenta e estratégias de corte para garantir alta produtividade e elevada qualidade superficial (LASEMI *et al.*, 2010; DONGMING *et al.*, 2010).

Dentre os fatores de influência mencionados, o método de interpolação da ferramenta é um dos parâmetros que afetam a usinagem em cinco eixos, especialmente quando relacionadas a tempo e exatidão de usinagem, pois a maioria dos programas CAM usa segmentos lineares para aproximar uma superfície complexa em uma trajetória de ferramenta. Devido a isso, para se obter uma representação aceitável da peça projetada, é necessária a criação de muitas posições discretas de ferramenta (SENCER *et al.*, 2015).

Mesmo com o aumento do número de pontos no método de interpolação, os segmentos lineares resultam em descontinuidades tangenciais e de curvaturas, que aparecem nas ligações dos segmentos adjacentes, prejudicando a eficiência do trabalho de usinagem (ERKORKMAZ e ALTINTAS, 2005; BAUDAERT *et al.*, 2013).

1.1. IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

A definição dos parâmetros de corte na usinagem é um fator determinante na criação de um processo de fabricação otimizado, quando se trata de superfícies complexas, uma vez que essas geometrias apresentam grandes diversidades e,

muitas vezes, ocorrem dificuldades em fazer com que a ferramenta siga fielmente o perfil da peça projetada (CHOI e JERARD, 1998; LASEMI *et al.*, 2010).

Nos últimos anos, buscando a solução de diversos problemas na usinagem em cinco eixos, diferentes estudos relacionados às estratégias de usinagem e aos métodos de interpolação da trajetória da ferramenta foram desenvolvidos. De forma geral, estes estudos visam otimizar a eficiência de processamento, reduzindo o tempo de processamento e as flutuações das velocidades de avanço, além de melhorar a qualidade final do produto, através, por exemplo, do aumento da exatidão geométrica e redução da rugosidade superficial (MIN e GAO, 2014).

Neste contexto, pode-se citar o trabalho de She *et al.* (2015) que busca reduzir os efeitos das descontinuidades tangenciais no caminho da ferramenta em cinco eixos, os quais resultam nas flutuações das velocidades de avanço, devido às restrições cinemáticas da máquina. Ou também, o trabalho de Li *et al.* (2018) que propõe um método de interpolação paramétrico para fazer a compensação tridimensional da fresa durante a usinagem em cinco eixos.

Entretanto, mesmo com estas adaptações e evoluções, pode-se destacar dentre os métodos de interpolação, os métodos convencionais de interpolação linear e Spline (ERKORKMAZ e ALTINTAS, 2005).

O método linear busca acompanhar o perfil curvilíneo de uma superfície complexa por meio da junção de vários segmentos de reta, criando assim, descontinuidades durante a geração da trajetória. Estas descontinuidades, influenciam diretamente a velocidade de avanço e, conseqüentemente, o tempo de manufatura (WANG e YANG, 1993).

Para amenizar as descontinuidades, é possível utilizar funções matemáticas como, por exemplo, as funções presentes no método de interpolação Spline, ou alguns comandos capazes de gerar uma interpolação indireta por recursos do

CNC, como o caso do “CYCLE 832” do comando SIEMENS 840 sl (ERKORKMAZ e ALTINTAS, 2005; SIEMENS, 2015).

Por outro lado, estes métodos também apresentam algumas desvantagens, como, por exemplo, a dificuldade em fazer com que a ferramenta siga fielmente o perfil da peça projetada na utilização do método Spline e, conseqüentemente, gerando um maior desvio geométrico (WANG e YANG, 1993; ERKORKMAZ e ALTINTAS, 2005).

Para a usinagem convencional em três eixos, estes métodos de interpolação da trajetória da ferramenta já foram bastante abordados, enquanto a quantidade de estudos em máquinas que operam com cinco eixos é relativamente reduzida (LI e ZHANG, 2006; JENSEN *et al.*, 2002; LEE e CHANG, 1996).

Além disso, grande parte dos programas são elaborados com base nas experiências e no conhecimento empírico dos próprios programadores, e não em processos padronizados otimizados, influenciando assim, os resultados relacionados ao tempo de manufatura e qualidade final do produto (CHEN *et al.*, 1998; CHU *et al.*, 2012).

Neste contexto, este trabalho busca através dos resultados obtidos pelas análises experimentais, disseminar os conhecimentos relacionados à usinagem de superfícies complexas em equipamentos que trabalham com cinco eixos simultâneos.

1.2. OBJETIVOS

Esse trabalho tem como objetivo investigar a influência da estratégia de usinagem no processo de fresamento de superfície complexa em centro de usinagem cinco eixos, avaliando o tempo de manufatura, exatidão geométrica da peça e desempenho dinâmico da máquina, auxiliando assim, no desenvolvimento tecnológico para o processo de manufatura de produtos derivados desta tecnologia.

1.3. MÉTODO DE PESQUISA

Este tópico classifica o método utilizado para a coleta dos dados teóricos relacionados ao tema de pesquisa.

Em relação à classificação desta pesquisa, utilizou-se uma pesquisa aplicada, do ponto de vista de sua natureza, a qual busca gerar conhecimentos para a aplicação prática e dirigidos às soluções de problemas específicos (PRODANOV, 2013). Neste caso, trata-se de uma análise real em um instrumento de manufatura (usinagem em equipamento com cinco eixos simultâneos).

Exploratória, do ponto de vista de seus objetivos, pois, para seu desenvolvimento, busca-se investigar um determinado assunto e proporcionar mais informações (PRODANOV, 2013). Para este estudo foi necessário explorar o comportamento e os resultados gerados por diferentes amostras obtidas pelo processo.

Experimental, do ponto de vista de seus procedimentos técnicos, pois caracteriza-se por tratar diretamente as variáveis relacionadas com o objeto de estudo. Para este modelo é necessária a definição das formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto em condições determinadas (PRODANOV, 2013).

Em relação à forma de abordagem, este trabalho é quantitativo, pois trata os dados coletados na realização do estudo de forma mensurável, expondo as informações em números, objetivando analisá-las de forma comparativa (PRODANOV, 2013).

Para obter o embasamento teórico sobre o tema de pesquisa, realizou-se uma revisão da literatura, buscando encontrar os materiais pertinentes ao assunto em três diferentes bases digitais de pesquisa;

- *Web of Science (Copyright© 2018 Clarivate Analytics);*
- *Scopus (Copyright© 2018 Elsevier B.V);*

- *Science Direct. (Copyright© 2018 Elsevier B.V).*

Nestas, foram considerados os periódicos (*Journals*) dotados das palavras-chave:

- *"Sculptured Surface" OR "Free Form Surface";*
- *"Tool Path";*
- *"Five Axis Machining" OR "Five Axis Milling".*

Foram encontradas 210 diferentes publicações, as quais foram analisadas e submetidas a um procedimento de seleção, obtendo-se um total final de 101 publicações, as quais contribuíram para a criação de uma base de conhecimento sobre o assunto.

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

A seguir, são apresentados os conteúdos pertinentes a cada capítulo deste trabalho, o qual é dividido em 7 capítulos principais.

Capítulo 1 – Introdução – Este capítulo apresenta uma sucinta contextualização do problema, a importância e justificativa do trabalho, os objetivos propostos, o método de pesquisa literária utilizado e a estrutura do trabalho.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica – Aborda-se informações referentes à usinagem de superfícies complexas, métodos de interpolação e trajetória da ferramenta em fresamento em cinco eixos.

Capítulo 3 – Materiais e Métodos – Descrição dos materiais utilizados, além do detalhamento do método para a realização dos procedimentos experimentais.

Capítulo 4 – Desenvolvimento dos Ensaios – Detalhamento da fase experimental do projeto, incluindo informações sobre o corpo de prova definido para o experimento, parâmetros de corte e métodos de interpolações utilizados, e descrição dos ensaios realizados.

Capítulo 5 – Resultados e Discussão– Análise dos resultados obtidos através dos ensaios realizados na etapa anteriormente descrita, assim como considerações baseadas nos experimentos.

Capítulo 6 – Conclusões e Sugestões – Contém conclusões a respeito de todo trabalho realizado, incluindo as contribuições do mesmo.

Capítulo 7 – Referências – Bibliografias utilizadas para o embasamento teórico e desenvolvimento da análise prática desta dissertação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Superfícies complexas, também denominadas de superfícies esculpidas, superfícies que não possuem simetria rotacional, ou ainda como formas de superfícies livres, são definidas em diversos casos como superfícies não-planares e não-quadráticas, as quais não podem ser descritas por uma única equação universal e, geralmente, são representadas por modelos paramétricos (CAMPBELL e FLYNN, 2001).

A utilização desse tipo de geometria esconde uma grande gama de desafios matemáticos, científicos e técnicos para a aplicação prática efetiva (JIANG *et al.*, 2007), podendo estas possuírem formatos praticamente infinitos (ROGER *et al.*, 1990).

Faz-se necessário, a descrição geométrica das superfícies por razões funcionais e estéticas de um projeto e, quando estas superfícies não são suficientemente flexíveis para uma representação por equações pré-definidas e comumente utilizadas, é necessário a representação matemática por polinômios de alto grau, descrevendo ligações entre segmentos e curvas com a combinação de funções internas (ROGER *et al.*, 1990).

Dentre os diferentes produtos que possuem estes tipos de geometrias, encontram-se os moldes e matrizes. Estes são produzidos por uma grande variedade de processos de fabricação (ALTAN *et al.*, 1993).

O fluxo de informação e as etapas de produção são compostas basicamente pelo *design* do produto, geração da trajetória da ferramenta, usinagem de desbaste, pré-acabamento (quando necessário), operações de acabamento (incluindo polimento manual ou automático) e testes de *try-out* (ALTAN *et al.*, 1993).

O auxílio computacional a esses processos ajudou consideravelmente na concepção e fabricação destes ferramentais, diminuindo o tempo de manufatura

e aumentando a qualidade final do produto, a qual é tema principal de diversos estudos presentes na literatura (CANDAL e MORALES, 2005; RAO *et al.*, 2010).

De forma mais específica, o processo de fabricação de moldes e matrizes auxiliado por computador é composto pela sequência de manufatura CAD-CAM-CNC, onde o sistema CAD permite o modelamento de *design* do produto e, posteriormente, é traduzido em informações de fabricação pelo sistema CAM.

Este procedimento de manufatura é realizado no processo de fabricação em diversos tipos de equipamentos que são auxiliados por comandos numéricos. Dentre os equipamentos que podem possuir este sistema de controle, existem os centros de usinagem de três e cinco eixos (ALTAN *et al.*, 1993).

Segundo Souza e Ulbrich (2013), o fresamento é o processo de usinagem mais complexo em função das movimentações que pode realizar. Ambos os equipamentos citados (três e cinco eixos) possuem basicamente o mesmo princípio de operação, estando a diferença entre eles no número de eixos rotacionais adicionais presentes na tecnologia de fresamento em cinco eixos (WANG e TANG, 2007).

Para os equipamentos com apenas três eixos, a ferramenta de corte (fresa) pode se mover em três direções simultaneamente (X, Y e Z – eixos de translação) e, com os dois eixos adicionais (A-B, A-C ou B-C), presentes nos equipamentos com cinco eixos, estes movimentos estendem-se para cinco graus de liberdade (SOUZA e ULBRICH, 2013).

Esses 2 eixos extras, que podem ser aplicados ao eixo árvore da máquina ou à mesa de suporte à peça (Figura 1), permitem maior liberdade de movimentos da ferramenta para atingir algumas regiões que não são alcançáveis nos equipamentos com três eixos (WANG *et al.*, 2007), não sendo necessário, em grande parte dos casos, o reposicionamento manual da peça trabalhada para usinar ângulos negativos e faces laterais do produto (SOUZA e ULBRICH, 2013).

Além deste aumento na liberdade de movimentos da peça, os eixos podem ser controlados simultaneamente, o que facilita a produção de peças com superfícies complexas com melhor eficiência (CHEN *et al.*, 2003).

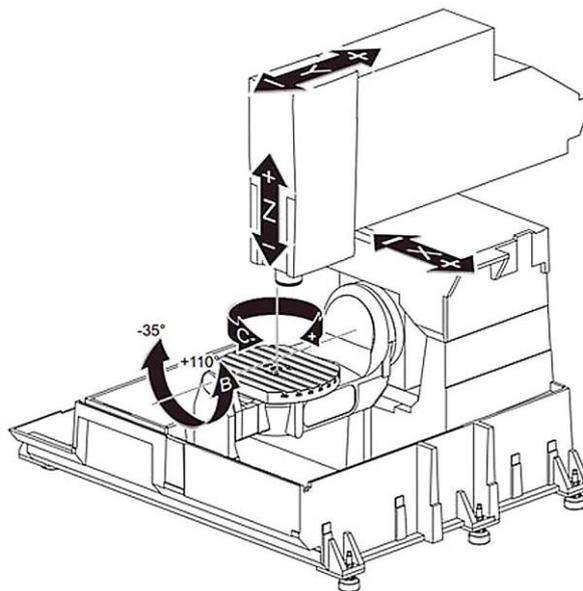


FIGURA 1 – CONFIGURAÇÃO CINEMÁTICA - MÁQUINA CINCO EIXOS (X, Y, Z – B,C)

FONTE: TSUTSUMI E SAITO (2003)

Neste sentido, pelas características apresentadas, o fresamento pode ser considerado como o processo de fabricação mais versátil e indicado para as geometrias mais complexas (SOUZA e ULBRICH, 2013).

Além disso, as principais vantagens do processo de usinagem em cinco eixos estão na possibilidade de obter maior precisão do produto final, menor tempo de manufatura, redução de custos (WANG *et al.*, 2007) e também obter melhores acabamentos da peça devido ao aumento da estabilidade do processo pela utilização de ferramentas mais curtas (TOENSMEIER, 2006).

Outros benefícios mais específicos da utilização do fresamento em cinco eixos podem ser citados como, por exemplo, o aumento da qualidade da peça pela utilização de algumas ferramentas, que também são frequentemente utilizadas na usinagem comum em três eixos (ROTH *et al.*, 2001).

Em usinagem em três eixos, fresas com ponta esférica apresentam, no ponto central de sua extremidade, uma velocidade de corte (v_c) igual a zero, acarretando em um acabamento de baixa qualidade da peça. Entretanto, com a possibilidade de inclinação trazida pelos eixos rotacionais da usinagem em cinco eixos, consegue-se eliminar o problema de velocidade de corte zero no eixo central da ferramenta (ROTH *et al.*, 2001).

Tratando-se de fresas de topo, é possível obter a adequação da geometria da ponta da ferramenta à geometria da peça a ser usinada, pois a usinagem em cinco eixos permite a inclinação das ferramentas, modificando a geometria de contato entre a peça e a fresa (SILVA, 2006).

De uma forma mais objetiva, tratando-se do processo de usinagem de superfícies complexas em centros de usinagem cinco eixos, existem duas razões principais para a utilização deste tipo de equipamento: eficiência e acessibilidade (WANG *et al.*, 2005).

Por outro lado, mesmo com essas vantagens, a usinagem em três e cinco eixos apresenta as mesmas dificuldades em relação à geração das trajetórias da ferramenta auxiliada pelo *software* CAM e ao método de interpolação do CNC (SILVA, 2006).

A usinagem de superfícies complexas em equipamentos que trabalham com cinco eixos simultâneos possui maior complexidade de programação, uma vez que deve-se levar em consideração as operações de usinagem, desde a construção da peça no sistema CAD (que pode influenciar a trajetória da ferramenta), até a programação CAM, a qual depende do equipamento que está sendo utilizado, dos dispositivos de fixação disponíveis, entre outros fatores (SILVA, 2006; WANG *et al.*, 2005).

Devido a esta alta complexidade, na maior parte das vezes a geração da trajetória da ferramenta no processo de usinagem em cinco eixos requer a utilização de sistemas computacionais de auxílio à manufatura (sistemas CAM) (SOUZA e ULBRICH, 2013).

Na programação de usinagem utilizando os sistemas CAM, são realizadas as etapas de geração da trajetória da ferramenta, onde se definem as ferramentas que serão utilizadas durante a manufatura efetiva, os métodos e as estratégias de corte, o tipo de interpolação e a própria trajetória da ferramenta (CHOI e JERARD, 1998).

Na segunda etapa, deve-se considerar os dispositivos de fixação, refrigeração, peças e ferramentas, validando por completo os programas e garantindo a segurança do processo de usinagem (CHOI e JERARD, 1998).

A terceira e última etapa é o pós-processamento, onde todas as informações definidas anteriormente, as quais são representadas por um arquivo nativo, conhecido como CLDATA (*Cutter Location Data File*), são transformadas em programas NC, com linguagem apropriada para o CNC e, finalizando assim, a denominada cadeia CAD/CAM/CNC (CHOI e JERARD, 1998).

2.1. PARÂMETROS DE USINAGEM

No processo de usinagem, alguns movimentos devem ser definidos, os quais podem ser divididos entre movimentos efetivos de corte, movimentos de transição e movimentos de retração (SOUZA e ULBRICH, 2013). A Figura 2 apresenta, de forma geral, estes diferentes grupos.

Além desses, também podem ser realizados outros movimentos mais específicos, como, por exemplo, movimentações de correção para compensar alterações do processo, como desgaste da ferramenta, dilatações térmicas, entre outros (SOUZA e ULBRICH, 2013).

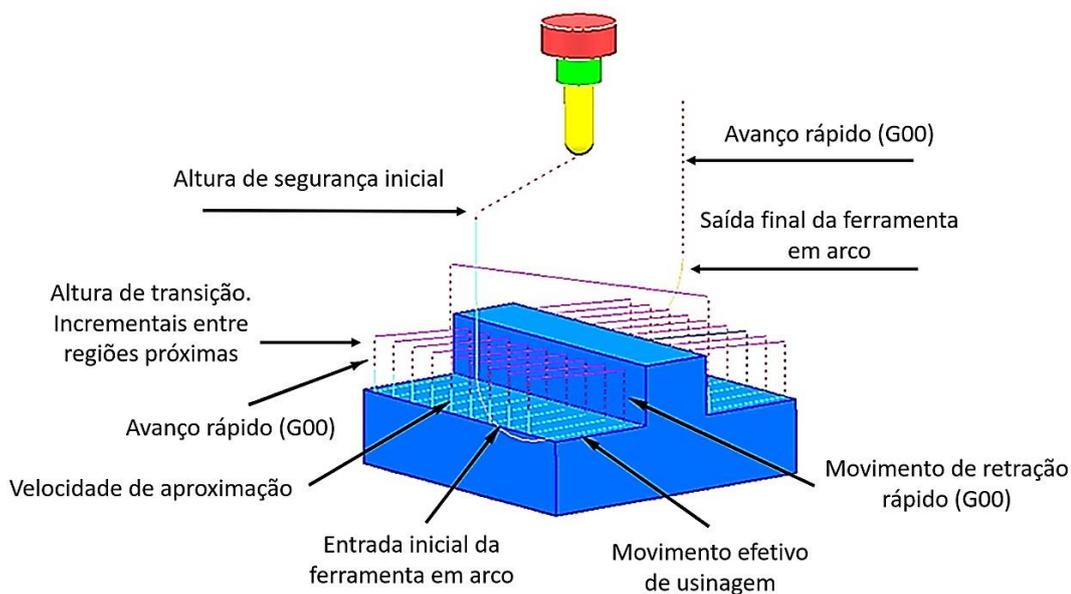


FIGURA 2 – MOVIMENTOS DE USINAGEM – FRESAMENTO

FONTE: SOUZA E ULBRICH (2013)

Tratando-se dos movimentos efetivos de corte, são parâmetros relevantes e influenciam diretamente os erros e eficiência de usinagem, o parâmetro denominado de passo lateral (a_e), avanço (f) e a profundidade de corte (a_p) (SOUZA e ULBRICH, 2013).

O passo lateral (w) é delimitado pela distância normal entre dois caminhos adjacentes, o qual também pode ser denominado como “Comprimento do passo lateral”. Já o movimento de avanço (f) representa o deslocamento contínuo em um único caminho. Estes movimentos podem interferir na quantidade e no local de remoção de material e, conseqüentemente, influenciam a eficiência e qualidade do processo (LASEMI *et al.*, 2010; MA *et al.*, 2018).

Outro parâmetro de grande importância é a profundidade de corte (h). Este, representa a distância entre a face inicial da peça e a geometria final usinada. A tolerância de usinagem é caracterizada pela diferença máxima entre a geometria projetada e geometria usinada (GROOVER, 2010; HANGOUËT, 1995).

Na usinagem auxiliada por computador, estes parâmetros são gerenciados por um sistema CAM, o qual fornece informações da trajetória da ferramenta para

gerar os comandos necessários para o centro de usinagem executar o fresamento. Essas informações são organizadas em um arquivo chamado CL-Data (*Cutter Location Data* – dados de localização da ferramenta de corte) (GROOVER, 2010; HANGOUËT, 1995).

As informações contidas no arquivo CL-Data contêm sequências de pontos denominados de pontos (CL), os quais são distribuídos ao longo da trajetória pré-definida para a usinagem da peça. A distância espacial entre esses pontos adjacentes ao longo de um único caminho da ferramenta representa o intervalo de avanço (Figura 3) (LASEMI *et al.*, 2010; MA *et al.*, 2018) e os pontos CL representam a posição em que a ponta do eixo central da ferramenta se encontra no momento da usinagem.

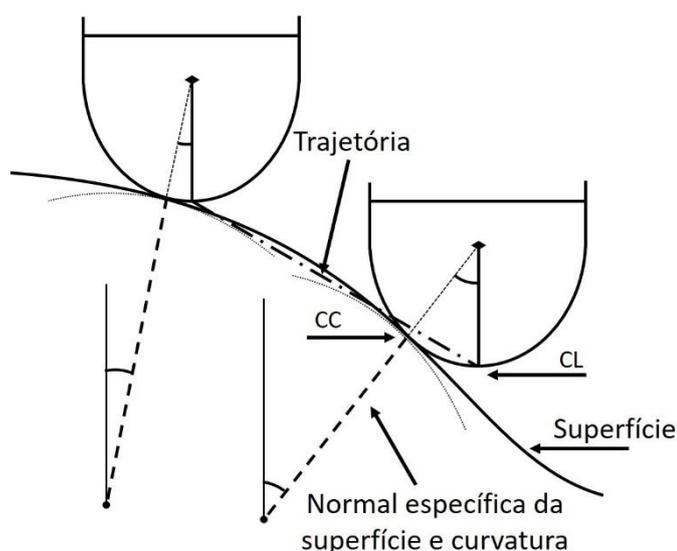


FIGURA 3 – REPRESENTAÇÃO DOS PASSOS DE AVANÇO DA TRAJETÓRIA DA FERRAMENTA.

FONTE: SOUZA E ULBRICH (2013)

Os parâmetros de usinagem mencionados (passo lateral, avanço, profundidade de corte e pontos CL) são definidos de forma conservadora por alguns *softwares* CAD/CAM. Diante disso, o programador deve atentar-se aos resultados de usinagem obtidos, uma vez que a eficiência do processo pode ser prejudicada (WUJIA, 2008).

A definição da área de corte, também denominada de área usinável ou região de corte, é feita pela seleção da área sobre a qual a ferramenta de corte deve deslizar. No exemplo da Figura 4, esta área é delimitada pela superfície S (WUJIA, 2008).

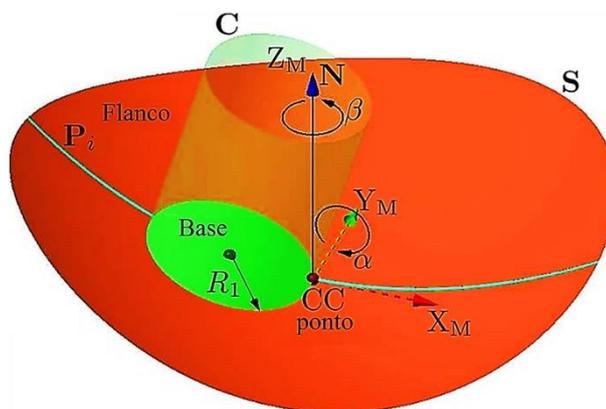


FIGURA 4 – ORIENTAÇÃO DE CORTE

FONTE: FAN E BALL (2014)

A orientação de corte é especificada pelo posicionamento da ferramenta em relação a superfície S, tendo como orientação, a direção de pontos de contato de corte (pontos CC) consecutivos (SOUZA E ULBRICH, 2013).

A relação entre o ponto de contato de corte CC e o ponto CL depende da geometria da ferramenta e de sua orientação. De forma geral, o ponto CC representa o ponto de contato entre a ferramenta e a peça, enquanto o ponto CL define o ponto do eixo central no topo da ferramenta de corte (Figura 5). Estes pontos são coincidentes (CC=CL) quando a ferramenta se encontra perpendicular ao plano de contato (SOUZA E ULBRICH, 2013).

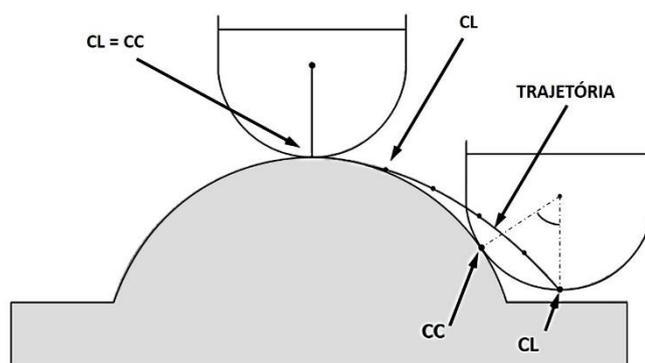


FIGURA 5 – RELAÇÃO ENTRE PONTO CC E CL

FONTE: SOUZA E ULBRICH (2013)

Usando a definição clássica de orientação, como definido na Equação 1 e 2, os ângulos de inclinação e de mudança de direção são definidos através da orientação da direção de corte ou avanço, superfície normal e ângulo transversal, pelas rotações dos ângulos de inclinação e de mudança de direção, ao redor dos vetores t e n (BEUDAERT *et al.*, 2014).

$$Rot\theta_t = \begin{bmatrix} \cos \theta_t & \text{sen } \theta_t & 0 \\ -\text{sen } \theta_t & \cos \theta_t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$Rot\theta_n = \begin{bmatrix} \cos \theta_n & 0 & \text{sen } \theta_n \\ 0 & 0 & 1 \\ -\text{sen } \theta_n & 0 & \cos \theta_t \end{bmatrix} \quad (2)$$

onde:

θ_t – Ângulo de Inclinação;

θ_n – Ângulo de mudança de direção;

$Rot\theta_t$ – Rotação do ângulo de Inclinação;

$Rot\theta_n$ – Rotação do ângulo de mudança de direção.

Desta forma, a combinação das duas rotações faz a transformação entre o vetor normal e o vetor de orientação da ferramenta, expressa pela Equação 3 (BEUDAERT *et al.*, 2014).

$$u = Rot\theta_n . Rot\theta_t . n \quad (3)$$

onde:

n – Vetor normal;

u – Vetor de orientação da ferramenta.

Uma vez obtida a orientação da ferramenta, a ligação entre os pontos CC e CL é dada pela Equação 4 (BEUDAERT *et al.*, 2014).

Quando o ponto CC é conhecido, esta expressão traz uma fórmula explícita para obter o ponto CL. Entretanto, quando obtêm-se o ponto CL, este processo deve ser aplicado repetidamente para encontrar os pontos CC e os vetores normais n correspondentes (BEUDAERT *et al.*, 2014).

$$CL = CC + rn + (R_1 - r) v - ru \text{ com } v = \frac{u \wedge n}{\|u \wedge n\|} \wedge u \quad (4)$$

onde:

R_1 – Raio maior da ponta da ferramenta;

r – Raio menor da ponta da ferramenta;

Voltando à Figura 4, é possível observar a orientação de corte. Esta pode ser descrita no sistema de coordenadas local da máquina ($X_M - Y_M - Z_M$), onde a origem encontra-se no ponto CC, o eixo Z_M é paralelo à superfície normal N e X_M aponta para a direção de corte, a qual é tangente ao caminho da ferramenta P_i no ponto CC (FAN e BALL, 2014).

Na usinagem em cinco eixos, a ferramenta gira em torno do eixo Y_M (α) e em torno do eixo Z_M (β) (FAN e BALL, 2014). O controle da orientação da ferramenta

e da peça influencia diretamente a eficiência e a qualidade das operações (LASEMI *et al.*, 2010).

Neste sentido, com o intuito de maximizar as taxas de remoção de material e minimizar a rugosidade da peça, várias estratégias de orientação da ferramenta em cinco eixos têm sido propostas (FAROUKI e LI, 2013).

Para obter uma taxa de remoção de material uniforme, a aresta de corte da ferramenta deve entrar em contato com a peça de trabalho no ponto (CC), como mostrado na Figura 6. Para isso, uma ferramenta deve ser posicionada de forma que a superfície normal (n) em relação ao ponto CC, passe através da aresta principal da ferramenta (RAO e SARMA, 2000).

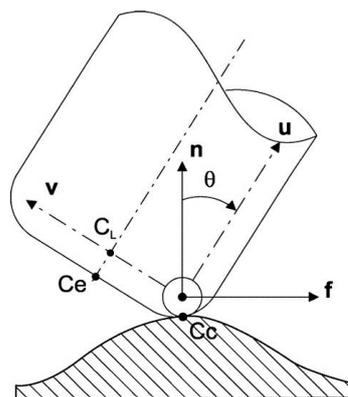


FIGURA 6 – POSICIONAMENTO DA FERRAMENTA

FONTE: PESSOLES E TOURNIER (2009)

Na usinagem simultânea em cinco eixos, há uma correspondência mais próxima entre o perfil de corte da fresa e o perfil da superfície do ponto CC, uma vez que os dois graus adicionais de liberdade proporcionam várias opções de posicionamento da ferramenta, podendo assim, adaptar-se às diferentes formas das superfícies complexas (VICKERS e QUAN, 1989).

Em relação aos movimentos lineares, é possível visualizar na Figura 7, o sistema de coordenadas da ferramenta ($X_t; Y_t; Z_t$), o sistema de coordenadas da superfície

$(X_S; Y_S; Z_S)$, o sistema de coordenada local $(X_L; Y_L; Z_L)$ e o sistema de coordenada global da máquina $(X_G; Y_G; Z_G)$.

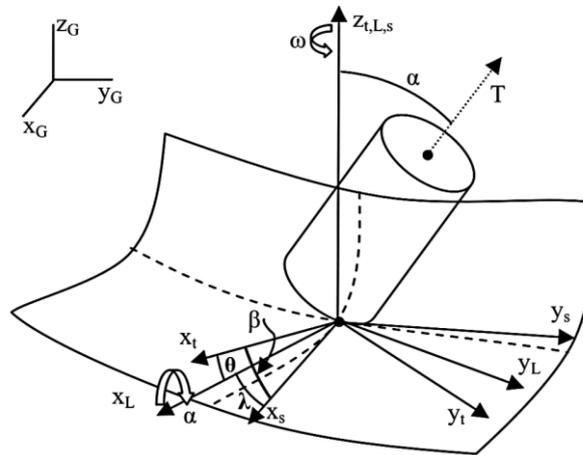


FIGURA 7 – SISTEMA DE COORDENADAS PARA A GERAÇÃO DA TRAJETÓRIA DA FERRAMENTA

FONTE: LASEMI *ET AL.* (2010)

Observa-se que o eixo Z no sistema de coordenadas (X, Y, Z) é normal à superfície e X e Y são paralelos a essa mesma superfície de trabalho e ao sistema de coordenadas da ferramenta. Y_L é a direção de corte no ponto CC e X_L é transversal à Y_L e Z_L . α é o ângulo de rotação do eixo X_L , e λ e θ são os ângulos entre X_S e X_T respectivamente (LASEMI *et al.*, 2010).

Quando $\theta=0$, a direção de corte em X se alinha com a direção principal da ferramenta e a ferramenta tem a maior curvatura efetiva. Quando λ e θ são iguais a zero, a ferramenta e a direção da superfície principal sobrepõem-se em X_L . Os ângulos ω (rotação da ferramenta à superfície normal Z_L) são considerados como ângulos de inclinação (LASEMI *et al.*, 2010).

No sistema de coordenadas da ferramenta, o filete e a superfície de contato da ferramenta no ponto CC são dados pela Equação 5 (LASEMI *et al.*, 2010).

$$Z_t = \frac{1}{2} (k_{t1}x_t^2 + k_{t2}y_t^2) \quad (5)$$

onde:

Z_t – Superfície de contato da ferramenta no ponto CC;

k_{t1} e k_{t2} – Curvas principais da ferramenta de corte.

A taxa de remoção de material é outro fator que influencia consideravelmente a usinagem, uma vez que a produtividade e a eficiência do processo poderiam ser melhoradas através do aumento do raio efetivo de corte ou do ângulo de varredura da superfície trabalhada (REDONNET *et al.*, 2014; LEE, 1998).

Além dos parâmetros mencionados anteriormente, a direção de corte, que representa a direção da trajetória em que a ferramenta se move, também é importante no processo de usinagem.

Na Figura 8, o eixo Y representa a direção de corte e o eixo X está definido ao longo da superfície normal. Neste contexto, o planejamento da região de usinagem visa obter a maior largura de faixa de remoção de material possível sem nenhuma interferência (WUJIA, 2008).

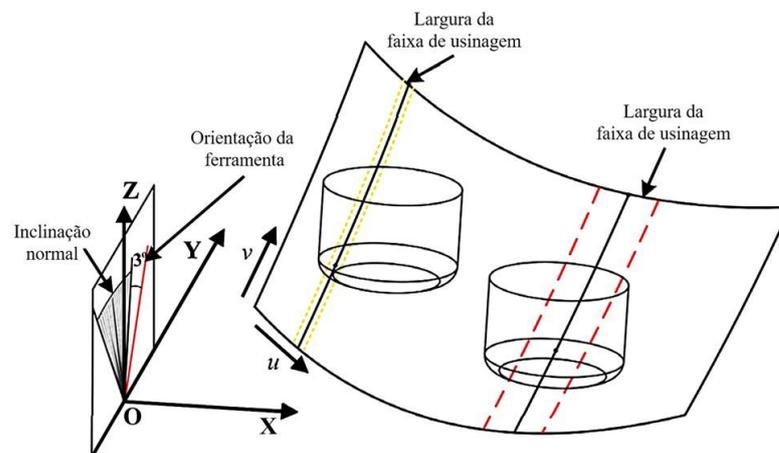


FIGURA 8 – FAIXA EFETIVA DE CORTE

FONTE: ZHU *ET AL.* (2016)

Na usinagem em cinco eixos, a inclinação da ferramenta pode contribuir para o aumento da faixa efetiva de corte, uma vez que possui dois graus de liberdade

a mais de movimentos que a usinagem convencional em três eixos, possibilitando, assim, o posicionamento da ferramenta em ângulos que aumentem a face de contato da ferramenta (FAN e BALL, 2014).

A Figura 9 demonstra esta face de contato da ferramenta onde, em diversos casos, a largura da faixa corresponde em pequena parcela da região total de usinagem. Deste modo, com a inclinação da ferramenta permitida pela usinagem em cinco eixos, é possível otimizar este processo, aumentando assim a eficiência do trabalho (FAN e BALL, 2014).

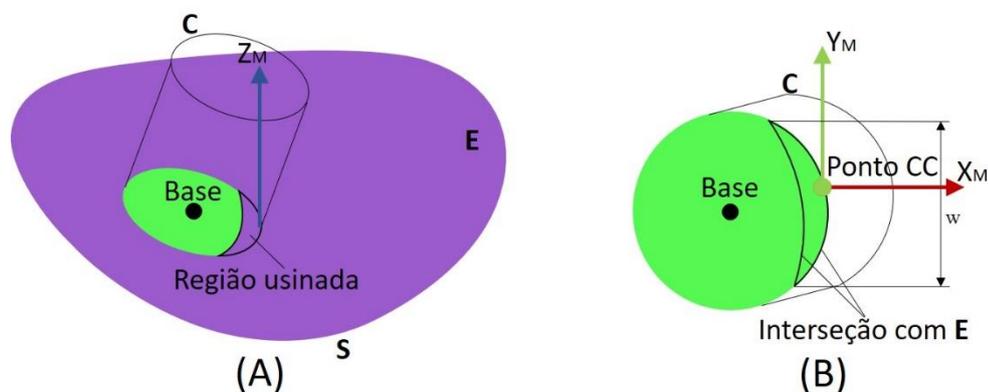


FIGURA 9 – REGIÃO DE USINAGEM (A); LARGURA DA FAIXA DE USINAGEM (B)

FONTE: FAN E BALL (2014)

2.2. CADEIA CAD/CAM/CNC

O processo de manufatura de superfícies complexas é baseado no uso de máquinas com sistemas CAD, CAM e CNC. Neste processo, o produto é modelado e concebido no sistema CAD, transferido posteriormente para o sistema CAM, onde os dados de manufatura como, dimensões da matéria-prima, estratégias de usinagem e parâmetros de corte, são inseridos e a trajetória da ferramenta é então calculada e simulada.

Após as inserções dessas informações das diversas etapas da cadeia CAD-CAM-CNC, o modelo discreto já validado vai para a etapa de fabricação, no caso,

a usinagem propriamente dita, onde o centro de usinagem vai produzir um produto real (MEHRAD *et al.*, 2013).

Para isso, o sistema CAM gera automaticamente um arquivo (CLDATA) contendo as coordenadas no sistema cartesiano representando o caminho da ferramenta (UHLMANN *et al.*, 2013) e o reconhecimento dos dados gerados pelo sistema CAM limita-se ao próprio sistema que o gerou, uma vez que os arquivos nativos (CLDATA) não estão na linguagem de programação definida na ISO 6983 (LARTIGUE *et al.*, 2004).

Para que seja feita a interpretação desses dados, é necessário um pós-processador, o qual é responsável por alterar o CLDATA em um programa NC, sendo esta, uma linguagem apropriada para a interpretação do CNC (LARTIGUE *et al.*, 2004; SCHÜTZER *et al.*, 2010).

Entretanto, conforme representado na Figura 10, todo esse processo é limitado por diversos fatores, os quais impactam diretamente na qualidade do produto, tempo de processamento, consumo energético, entre outros.

Dentre estes fatores influenciadores, podemos destacar alguns que ocorrem na etapa de programação. Estes relacionam-se, de forma geral, com a definição das operações de usinagem e definições de estratégias (MEHRAD *et al.*, 2013).

Mais especificamente sobre a definição das estratégias, esta resulta-se da definição da estratégia de orientação do eixo da ferramenta, da estratégia de corte que será empregada no processo de fresamento e do método de interpolação escolhido (MEHRAD *et al.*, 2013).

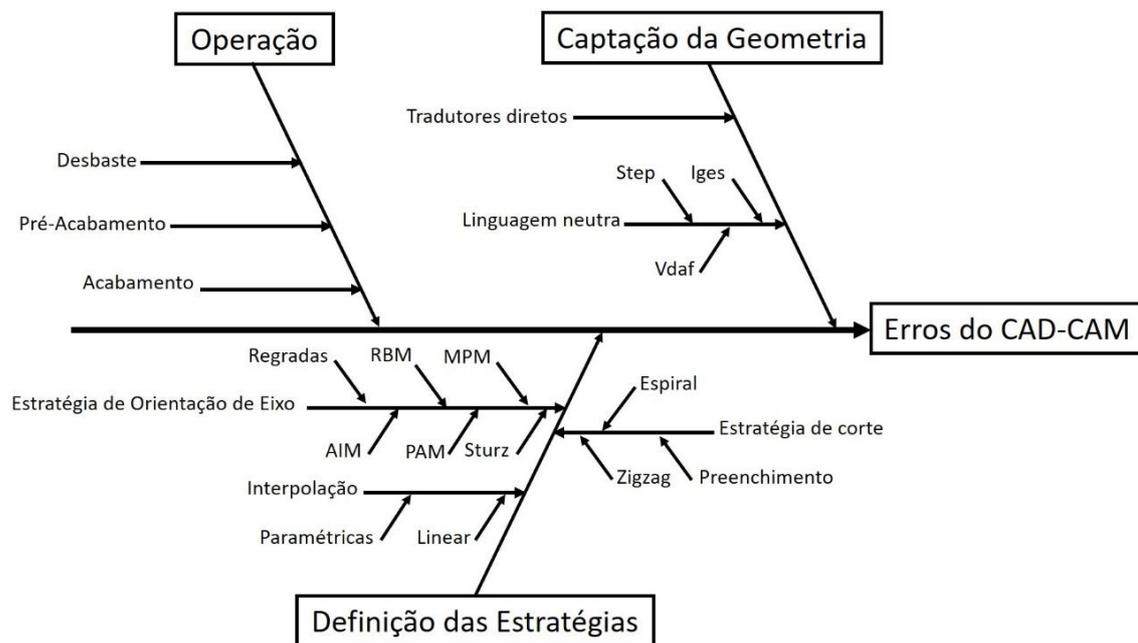


FIGURA 10 – FONTES DE ERROS DA ETAPA CAD – CAM

FONTE: MEHRAD *ET AL.* (2013)

O método de interpolação da ferramenta, segundo a literatura, pode ser um dos principais problemas de produtividade e qualidade no processo de usinagem de peças que possuem geometrias complexas (UHLMANN *et al.*, 2013).

Devido a esse e outros motivos relacionados à eficiência de usinagem, diversos estudos relacionados ao método de interpolação tornaram-se fundamental na geração do programa NC (LARTIGUE *et al.*, 2004; SCHÜTZER *et al.*, 2010).

2.3. MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO DA TRAJETÓRIA DA FERRAMENTA

A trajetória da ferramenta representa a estratégia de usinagem por meio de seu formato geométrico e topológico. Atualmente, os sistemas CAM oferecem diferentes estratégias de usinagem, possibilitando alterar os parâmetros das movimentações passivas para tornar as operações mais eficientes ou suaves, por exemplo (SOUZA e ULBRICH, 2013).

O planejamento da trajetória tem como finalidade controlar o percurso da ferramenta, de modo que se execute os movimentos necessários, gerando assim dados de referência para o sistema de controle de movimentos (ZEID, 1991).

Este trajeto é definido pelo sequenciamento de pontos no espaço operacional, com linhas de ligação entre eles, as quais podem ser traçadas de diferentes formas, sendo todo esse processo denominado de interpolação da trajetória (ZEID, 1991).

Basicamente, a geração da trajetória da ferramenta é composta pela definição da topologia do caminho da ferramenta e pelos parâmetros de corte (CHOI e JERARD, 1998). A determinação da topologia do caminho é feita por uma sequência de pontos (CC) que representam a superfície de forma livre e a maneira com que esses pontos são gerados, influenciam diretamente o tempo efetivo de usinagem e a qualidade superficial da peça (KIM e CHOI, 2002).

Quanto maior o número de pontos (CC), mais precisa será a superfície usinada em relação ao arquivo digital e menores serão as cristas que causam rugosidade na superfície. Por outro lado, com o aumento do número de pontos, também se eleva o tempo de processamento do programa digital e a utilização de memória computacional (LASEMI *et al.*, 2010).

Uma trajetória de corte eficiente está diretamente relacionada com um deslocamento mínimo do caminho da ferramenta e com alta flexibilidade para a adequação dos movimentos de corte em determinadas regiões das superfícies complexas (KIM e CHOI, 2002; ARKIN *et al.*, 2000).

Existem diversas configurações para a definição da trajetória da ferramenta, como, por exemplo, as apresentadas na Figura 11, onde o caminho (a) *Direction parallel*, segue uma linha predefinida, que pode ser paralela ou normal ao limite da superfície ou paralela ao eixo de um sistema de coordenadas especificado. Pode-se citar, como exemplo deste caminho de ferramenta, o caminho comercialmente denominado como “Ziguezague”, encontrado em diversos sistemas CAM (PI *et al.*, 1998; MARSHALL e GRIFFITHS, 1994).

O caminho (b) *Contour parallel* gera suas linhas de movimento buscando acompanhar o contorno do produto no limite da superfície final (MARSHALL e GRIFFITHS, 1994). Este método de geração da trajetória da ferramenta, quando comparado em algumas pesquisas realizadas com o método *Direction parallel*, é demonstrado que a seleção da melhor estratégia de usinagem depende da superfície a ser usinada e das condições de corte presentes.

Portanto, para cada processo de desbaste, pré-acabamento ou acabamento, mais de uma estratégia de corte pode ser selecionada a fim de adaptar-se às geometrias de todas as camadas (KIM e CHOI, 2002).

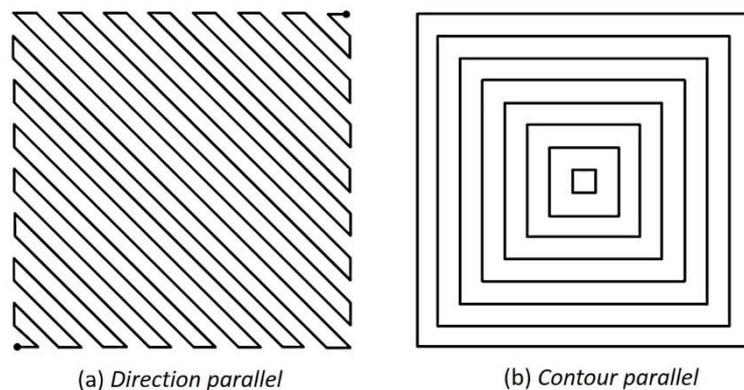


FIGURA 11 – EXEMPLO DE DIFERENTES CAMINHOS DA FERRAMENTA

FONTE: LIVESU *ET AL.* (2017)

Com base nos pontos relacionados à simplicidade e adaptabilidade nas aplicações de engenharia, as duas estratégias apresentadas anteriormente são bastante utilizadas (HAN e YANG, 1999).

Por outro lado, embora estas estratégias sejam eficientes em grande número de aplicações, na usinagem cinco eixos, elas não são tão populares devido à complexidade da trajetória, mudanças frequentes na direção de corte e problemas dinâmicos da máquina-ferramenta (HAN e YANG, 1999).

Na usinagem em cinco eixos é importante que ocorra a alteração suave da orientação da ferramenta ao longo do caminho gerado para a execução de usinagem, pois alterações repentinas dos pontos CC podem acarretar em

acelerações angulares excessivas nos eixos rotativos (A-B-C), os quais são menos rígidos que os eixos de translação (X-Y-Z) e, portanto, mais propensos a erros de posicionamento. Além disso, a variação abrupta dos movimentos da ferramenta pode aumentar os tempos de usinagem, os erros de corte e, conseqüentemente diminuir a qualidade superficial da peça (XU *et al.*, 2012).

Diversas trajetórias foram desenvolvidas buscando solucionar problemas relativos à usinagem cinco eixos, as quais buscam tipicamente a redução do tempo de simulação e usinagem, o aumento da capacidade de usinagem de superfícies compostas e não paramétricas, a redução de custos de manufatura, entre outros (LASEMI *et al.*, 2010).

Na prática, os três algoritmos mais utilizados para a geração da trajetória da ferramenta em máquinas cinco eixos são os métodos Isoparamétrico (HE *et al.*, 2009; HU *et al.*, 2015), Iso-planar (DING *et al.*, 2003), e Iso-scallop (XU *et al.*, 2012), que podem ser observados na Figura 12.

O método Isoparamétrico foi o primeiro método desenvolvido entre os três para a geração da trajetória. Este busca traçar os pontos de caminho de corte (CC) sobre a superfície de contato $S(u, v)$, fixando uma variável paramétrica (u), enquanto modifica o valor da outra variável (v) dentro do domínio.

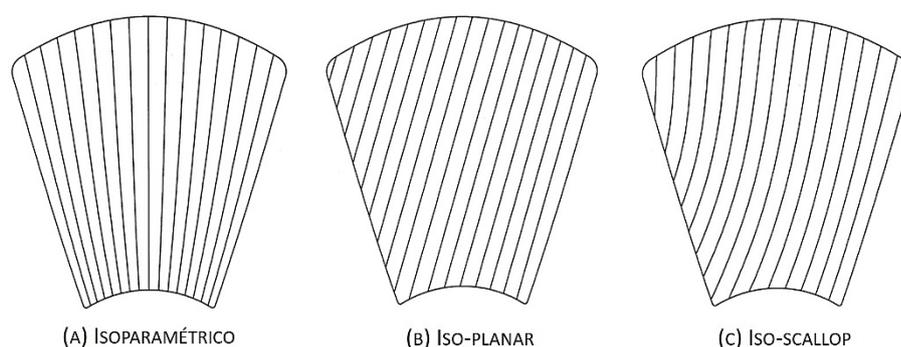


FIGURA 12 – MÉTODOS DE GERAÇÃO DA TRAJETÓRIA

FONTE: FENG E LI (2002)

O método Isoparamétrico é matematicamente conveniente e garante que toda a superfície seja recoberta pela trajetória da ferramenta. Por outro lado, dependendo da superfície, este torna-se muito denso em volume de dados (ANOTAIPAIBOON e MARKHANOV, 2000).

Na busca de melhorar a eficiência do método Isoparamétrico e reduzir a quantidade de dados, desenvolveu-se o método adaptativo Iso-planar. Este segundo emprega uma série de planos paralelos que fazem intersecções com as formas das superfícies correspondentes aos pontos CC das trajetórias.

As separações entre os planos de intersecção adjacentes proporcionam um melhor controle quando comparado ao método Isoparamétrico. A principal vantagem do método Iso-planar é que ele evita a formação de áreas com alta densidade de trajetória da ferramenta como observado no método Isoparamétrico (ANOTAIPAIBOON e MARKHANOV, 2000).

Os dois primeiros mencionados (Isoparamétrico e Iso-planar) são capazes de gerar uma trajetória uniformemente distribuída, garantindo uma boa qualidade superficial e de acabamento. Por outro lado, mesmo com a otimização do método Iso-planar, ainda ocorre grande sobreposição da ferramenta entre regiões de usinagem, gerando maior tempo de processamento (HU *et al.*, 2017).

O método Iso-scallop visa a eliminação das sobreposições geradas nos métodos anteriormente mencionados, a partir da geração de curvas sequenciais de modo que entre quaisquer curvas adjacentes a profundidade de usinagem é mantida, eliminando conseqüentemente a sobreposição. A desvantagem deste método está na qualidade superficial e na falta de uniformidade quando comparado ao Isoparamétrico e Iso-planar (HU *et al.*, 2017).

Além desses três métodos mais tradicionais apresentados, existem diversos outros trabalhos que buscam melhorar a eficiência de usinagem através da redução do comprimento da trajetória da ferramenta (HU *et al.*, 2017).

Desta maneira, tomando como base as informações apresentadas neste capítulo, conclui-se que a trajetória da ferramenta é desenvolvida a partir da

análise da topologia da peça e da definição dos parâmetros de movimento da ferramenta, considerando as restrições de qualidade superficial (precisão) e tempo de manufatura (MARSHALL e GRIFFITHS, 1994).

Em outras palavras, para a definição dos parâmetros e trajetória da ferramenta deve-se levar em consideração as seguintes variáveis (MARSHALL e GRIFFITHS, 1994; LI e JERARD, 1994):

- Qualidade: na definição dos parâmetros da trajetória da ferramenta, deve-se evitar paradas repentinas e as cristas que causam rugosidade devem estar dentro da tolerância dimensional especificada;
- Eficiência: a eficiência está diretamente relacionada com o tempo de usinagem da peça. É possível verificar essa variável recorrendo-se à simulação computacional com base em *softwares* CAM e à usinagem real da peça. Dentro das alternativas de verificação de eficiência existentes, o método computacional é o mais utilizado, podendo este ser configurado e simulado com diferentes trajetórias de ferramenta e parâmetros de usinagem;
- Robustez: considera-se como robustez a capacidade de adaptação da trajetória da ferramenta às diferentes superfícies e equipamentos de usinagem. Em outras palavras, um sistema com alta robustez deve ser capaz de trabalhar com diferentes superfícies e suas condições de continuidade. Um sistema com alta robustez permite a seleção de diversas trajetórias de ferramenta e diferentes superfícies e parâmetros. As limitações cinemáticas da máquina também devem ser levadas em consideração (LASEMI *et al.*, 2010).

Outro parâmetro de grande relevância e foco de estudo deste trabalho é o método de interpolação da trajetória da ferramenta. Este é definido na etapa de programação CAM. O cálculo resultante neste método gera um arquivo genérico sem especificações que contém os pontos da trajetória e são conhecidos como *Cutter Location File* (CLF).

As interpolações buscam representar por equações matemáticas como o movimento da ferramenta deve se comportar entre pontos de controle consecutivos, como ilustrado na Figura 13 (LARTIGUE *et al.*, 2004; ALTINTAS e ERKORKMAZ, 2003; FLEISIG e SPENCE, 2001).

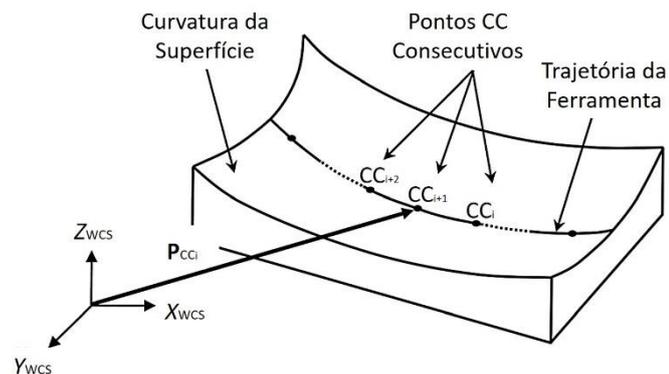


FIGURA 13 – PONTOS CC AO LONGO DA TRAJETÓRIA

FONTE: BHUIYA E TUTUNEA-FATAN (2016)

Durante a definição da trajetória, o método de interpolação é selecionado para que na etapa posterior (pós-processamento - Figura 14), seja realizada a transformação da linguagem interna do sistema em um programa CNC na sintaxe aceita pela máquina utilizada (SOUZA e ULBRICH, 2013).

É importante destacar que a simulação oferecida pelos sistemas CAM baseia-se nos pontos CLF e não no programa CNC utilizado diretamente na máquina. Devido a isso, divergências entre a simulação CAM e a usinagem real da peça podem ocorrer. Uma maneira de minimizar este problema é a utilização de *softwares* específicos que realizam a simulação do programa CNC incorporando as características específicas da máquina utilizada (CAMARGO *et al.*, 2014).

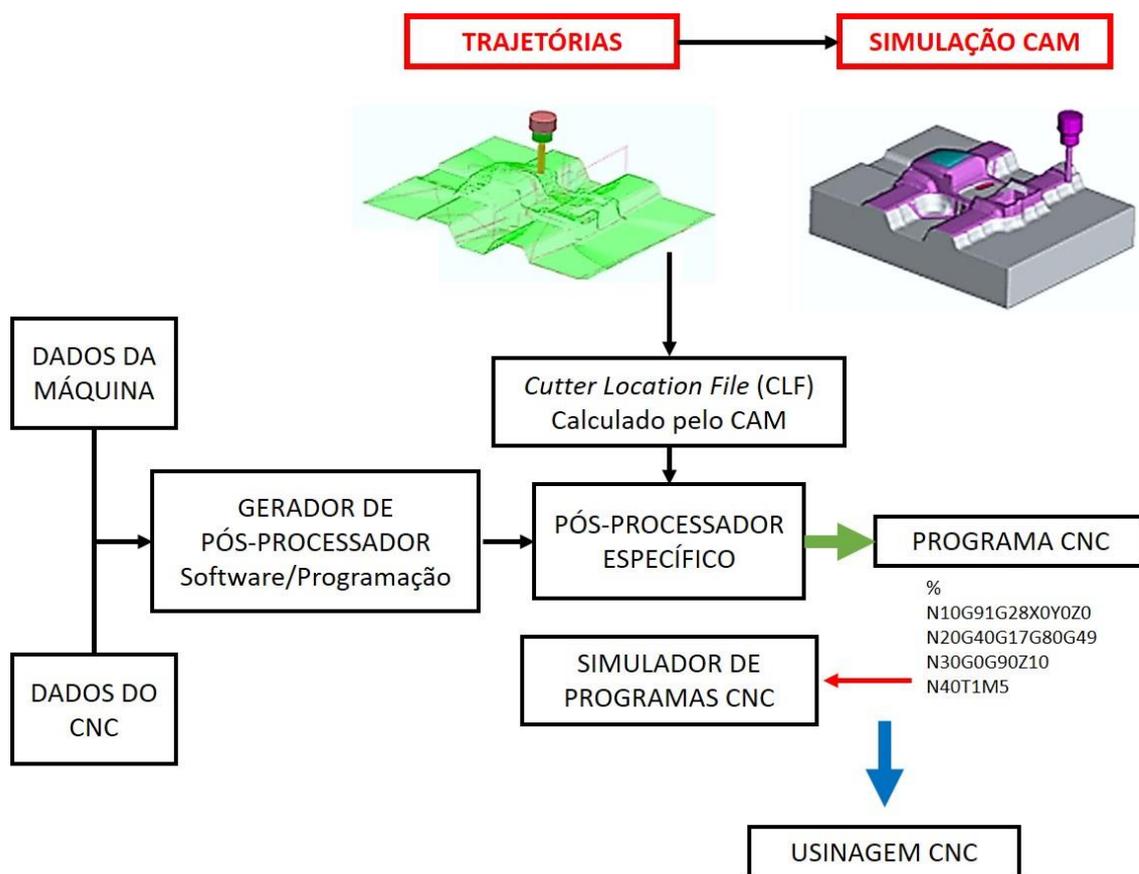


FIGURA 14 – ETAPAS DA GERAÇÃO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL E PÓS-PROCESSAMENTO

FONTE: SOUZA E ULBRICH (2013)

Voltando ao método de interpolação, a movimentação da ferramenta pode ser descrita por diferentes métodos, uma vez que a definição matemática de interpolação é a estimativa de um valor desconhecido a partir de valores conhecidos, os quais podem ser obtidos por diferentes expressões matemáticas. O resultado dessas expressões matemáticas gera uma matriz com pontos CC sucessivos (PCC_i e PCC_{i+1}), que representam o caminho da ferramenta planejado (WUJIA, 2008).

Como pode ser observado na Figura 15, existem diversos métodos de interpolação da trajetória da ferramenta, como, por exemplo, a interpolação por segmentos de retas ou linear (a), interpolação circular (b), curvas cúbicas (Spline de Hermite, B-Spline, NURBS) (c), entre outras (ZEID, 1991).

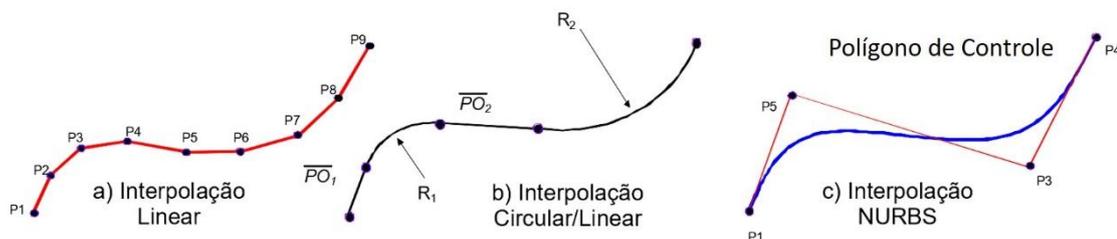


FIGURA 15 – MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO DA TRAJETÓRIA DA FERRAMENTA

FONTE: SCHÜTZER E SOUZA (2000)

Nos últimos anos, pesquisadores vêm considerando os métodos Splines, *B-Splines*, e curvas NURBS, os métodos de interpolação mais importantes para sistemas CNC. Estas curvas paramétricas possibilitam a geração de trajetórias suaves, permitindo assim o controle da geometria e limitando os comportamentos dinâmicos (DE SANTIAGO-PEREZ *et al.*, 2013).

Mesmo com diversos métodos de interpolação e com diferenças significativas entre eles, grande parte dos usuários desprezam essas funções durante o processo de programação CAM para a manufatura de superfícies complexas. Isto pode trazer como consequência a redução no desempenho do processo e na qualidade do produto (LARTIGUE *et al.*, 2004).

Dentre os métodos de interpolação disponíveis, o método linear tornou-se padrão na indústria, uma vez que possui maior simplicidade para o cálculo do programa NC (LARTIGUE *et al.*, 2004; ALTINTAS e ERKORKMAZ, 2003; FLEISIG e SPENCE, 2001). Neste método, o programa CAM busca gerar uma trajetória da ferramenta baseado em segmentos de retas as quais acompanham as curvas que delimitam o perfil do produto (HELLENO e SCHÜTZER, 2006).

No entanto, devido ao aumento das exigências por parte dos consumidores, o método de interpolação linear passou a ser questionável sobre a qualidade final do produto e tempo de manufatura (ARNONE, 1998).

Para a manufatura de superfícies complexas, o processo de geração da trajetória com pequena tolerância acaba gerando grande número de pequenos segmentos

de retas que representam as curvas e, conseqüentemente, programas NC extensos e com alto tempo de processamento (ARNONE, 1998).

Diante destes problemas, outros métodos foram levados em consideração para a geração da trajetória da ferramenta, como por exemplo a Interpolação circular, Spline, Polinomial, e que são objetos de estudo para a usinagem de superfícies complexas (LANGERON *et al.*, 2004; YONGZHANG *et al.*, 2007).

2.3.1. INTERPOLAÇÃO LINEAR

A interpolação linear ainda é o método de interpolação da trajetória da ferramenta mais usado na indústria. Este método de interpolação é bastante utilizado em CNC's, pois possui uma representação matemática mais simples em relação aos demais métodos (SCHÜTZER *et al.*, 2010).

O movimento total da ferramenta é subdividido linearmente em segmentos discretos pelo sistema CAM/NC, onde um controlador CNC gera os movimentos da ferramenta entre os pontos CL definidos pela compilação CAM/NC.

Conforme ilustrado na Figura 16, o sistema CAM determina o caminho da ferramenta através da interpolação de segmentos de linha reta que melhor se adaptam à faixa de tolerância de usinagem (SCHÜTZER *et al.*, 2010).

O aumento ou redução na tolerância CAM influencia o intervalo de pontos que representam o caminho da ferramenta, levando também a uma mudança conseqüente nos ângulos de inclinação entre os segmentos de reta que definem a trajetória da ferramenta (SCHÜTZER *et al.*, 2010).

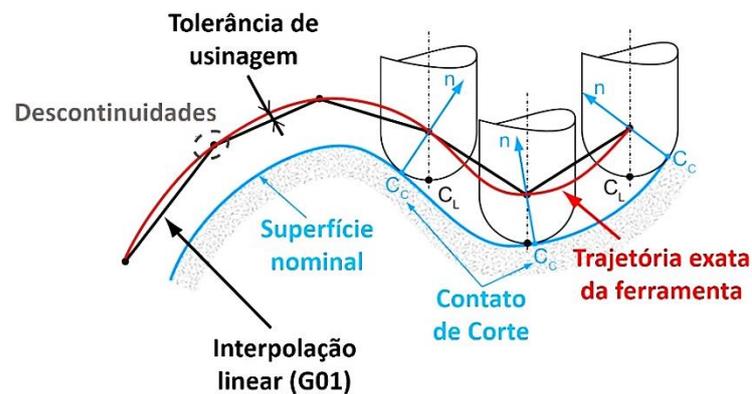


FIGURA 16 – MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO LINEAR

FONTE: BEUDAERT *ET AL.* (2014)

O comando CNC é responsável por calcular a movimentação que cada eixo deve realizar para que a ferramenta se desloque linearmente a partir de um ponto inicial e final. No caso tridimensional, o comando CNC calcula o segmento linear e a velocidade que cada eixo deve seguir para compor vetorialmente o segmento proposto (SOUZA e ULBRICH, 2013).

Os valores relativos para os eixos são definidos geometricamente em função do ângulo entre o segmento linear e os próprios eixos (SOUZA e ULBRICH, 2013).

Tratando-se do processo de fabricação de superfícies complexas, este método é também bastante utilizado. Como mencionado anteriormente, o sistema CAM acompanha as curvas que representam o perfil da peça fabricada com pequenos segmentos de reta, os quais são descritos pelo comando G01 da linguagem de programação ISO 6983.

Para a execução deste procedimento, deve-se definir a tolerância de usinagem, sendo esta a responsável por delimitar o erro máximo permitido em nível acima e abaixo da geometria originalmente projetada. Neste caso, o sistema CAM calcula a posição dos pontos de contato da ferramenta com a peça (*Cutter Contact* – CC) respeitando a banda de tolerância (CHOI e JERARD, 1998).

Os números de pontos CC são influenciados pela tolerância de usinagem, uma vez que quando se aumenta a faixa de tolerância, o número de pontos CC reduz-se e no oposto (diminuição da tolerância), o número de pontos CC aumenta-se para conseguir representar a geometria curva da peça, mantendo as limitações especificadas (CHU *et al.*, 2012).

Nota-se que quanto maior o raio de curvatura da superfície, maior serão os segmentos gerados, visto que a geometria se aproxima de um formato linear. O mesmo comportamento é observado com o aumento da tolerância especificada, pois maiores serão os erros permitidos entre a superfície original e os segmentos lineares interpolados (CHOI e JERARD, 1998).

Por outro lado, quanto menor o tamanho dos segmentos menor será a alteração na direção de movimentação entre eles, pois a trajetória irá se aproximar mais da curvatura da superfície. O contrário também é válido. Naturalmente, uma maior divisão da trajetória em segmentos menores gera um maior número de pontos CC calculados.

As Equações 6 a 9 apresentam o cálculo do tamanho do segmento em função das demais variáveis geométricas para regiões convexas e côncavas (CHOI e JERARD, 1998).

$$I_{CC-convexo} = 2R \left\{ 1 - \left[\frac{R+\rho-Ti}{R+\rho} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (6)$$

$$I_{CL-convexo} = 2\{2Ti(R + \rho) - (Ti)^2\}^{1/2} \quad (7)$$

$$I_{CC-C\text{ONCAVO}} = 2R \left\{ 1 - \left[\frac{R-\rho-T_E}{R-\rho} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (8)$$

$$I_{CL-C\text{ONCAVO}} = 2\{2T_E(R - \rho) - (T_E)^2\}^{1/2} \quad (9)$$

onde:

R - Raio de curvatura da superfície;

ρ - Raio da ponta da ferramenta;

T_i - Tolerâncias internas;

T_e - Tolerâncias externas.

Neste método, devido ao controlador CNC gerar o movimento tendo como base o ponto central da ferramenta e seu eixo, podem ocorrer algumas interferências (Figura 17) em casos em que a geometria da peça trabalhada não apresenta um formato linear, como nos casos das superfícies complexas (CHU *et al.*, 2012).

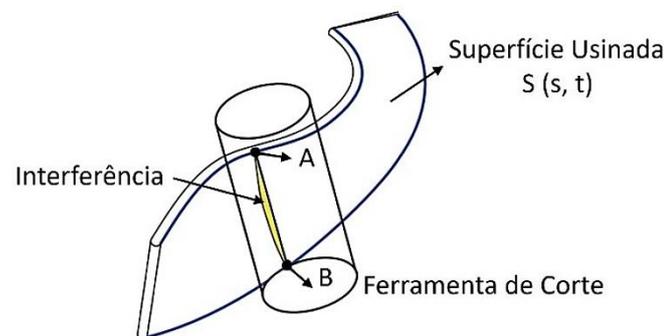


FIGURA 17 – INTERFERÊNCIA DA FERRAMENTA INDUZIDA PELA INCLINAÇÃO SUPERFICIAL

FONTE: CHU E CHEN (2005)

Apesar da facilidade de utilização e das vantagens mencionadas acima, o método de interpolação linear, inevitavelmente, traz diversas desvantagens como: (BEUDAERT *et al.*, 2013):

- Induz desvios geométricos que podem ser corrigidos pela diminuição da tolerância de usinagem. Por outro lado, a redução da tolerância acarreta no aumento da quantidade de dados e no consequente aumento de tempo de programação e pós-processamento;
- Sendo a quantidade de dados em grande volume, ocorre a dificuldade do tratamento destes pelo CNC, o qual realiza a tarefa em tempo real. Além disso, pequenos segmentos podem induzir uma redução no avanço por causa do tempo de processamento. Em outras palavras, com o método

de interpolação linear, as possibilidades em manter alta produtividade e baixos desvios geométricos são reduzidas;

- Como as curvas são representadas por segmentos de reta, mesmo que a tolerância seja reduzida, apenas haverá a representação totalmente fidedigna em superfícies onde a peça possui formatos lineares e a velocidade máxima de avanço ao longo do perfil usinado é limitado pela geometria descontínua gerada com a interpolação linear;
- A segmentação das curvas representativas, associada às altas taxas de velocidade avanço, resultará em significativos problemas de desempenho dinâmico em fresamento em máquinas três e cinco eixos. Portanto, o comprimento e o ângulo entre os segmentos que representam as curvas têm efeito importante no avanço (f) da ferramenta (BEUDAERT *et al.*, 2013).

Tratando-se de superfícies complexas, a representação do caminho da ferramenta em cinco eixos é composta por muitas posições discretas da ferramenta resultando, assim, em descontinuidades de tangências e curvaturas, que aparecem nas junções entre os segmentos adjacentes (SENCER *et al.*, 2015).

Durante a usinagem, a velocidade tangencial vai se alterando ou até mesmo chegando a zero nas bordas dos segmentos adjacentes, o que afeta profundamente a eficiência e a qualidade da usinagem (YAN *et al.*, 2016).

Deste modo, para a utilização deste método de interpolação em superfícies complexas, deve-se alcançar a suavização geométrica do caminho linear da ferramenta, garantindo o movimento contínuo e evitando a aceleração/desaceleração frequente (HENG e ERKORKMAZ, 2010).

Uma vez que estes pontos são alcançados, o planejamento da velocidade pode ser executado, produzindo como consequência o corte eficiente e a qualidade da usinagem significativamente mais elevada (HENG e ERKORKMAZ, 2010).

2.3.2. INTERPOLAÇÃO INDIRETA POR RECURSOS DE OTIMIZAÇÃO DO CNC

Além dos métodos de interpolação obtidos diretamente pelo Sistema CAM, também é possível obter outros métodos de interpolação de forma indireta por recursos CNC, os quais, basicamente, transformam uma interpolação linear para uma interpolação curvilínea, seguindo uma tolerância de conversão determinada.

Sabe-se que para obter maior precisão dimensional e melhorar a qualidade final da superfície dos produtos, é preciso reduzir a tolerância de usinagem. Este processo, quando realizado nas interpolações lineares e circulares, gera-se grande número de dados e um alto tempo de processamento e de resposta (tempo de resposta da malha de controle da máquina CNC) (SOUZA e COELHO, 2003).

Com o intuito de melhorar a eficiência deste processo (aumento da qualidade superficial e redução do tempo de processamento), facilitar a utilização para o programador, entre outras vantagens, foram desenvolvidos alguns comandos especiais, como por exemplo, o “CYCLE 832” presente no comando SIEMENS 840D sl (SIEMENS, 2015).

O “CYCLE 832” é capaz de poupar o usuário da execução de algumas tarefas de otimização durante o funcionamento da máquina, pois envolve a otimização dos eixos utilizados na usinagem e os ajustes da NCU - *Numerical Control Unit*, atuando na eficiência de, por exemplo, do controle *feedforward*, limitação de solavancos, entre outros (SIEMENS, 2015).

Além disso, este recurso possui entre suas principais funções especiais as seguintes bases de comando (SIEMENS, 2015):

- Conversão interna em polinômios Spline: O comando une várias linhas programadas com interpolações lineares (G01) em uma função de polinômio de quinto grau Spline;
- Aceleração e Desaceleração (Bell-Shape): Este recurso é utilizado para deixar os movimentos mais suaves durante a aceleração/desaceleração

da máquina, uma vez que em percursos na ordem de 0,001 a 0,5 mm, não se consegue obter altas velocidades de avanço e, conseqüentemente, gerando movimentos mais bruscos;

- Look ahead: Antes da execução do programa NC, este recurso é utilizado para o pré-processamento de blocos, sendo capaz de analisar previamente a trajetória da ferramenta, mapeando e gerando um novo caminho com os posicionamentos corretos dos eixos para as acelerações e desacelerações com altas taxas de avanço;
- Feed Forward: As imprecisões causadas pelo deslocamento dos eixos e suas acelerações durante o processo de usinagem em altas velocidades, pode ser corrigido por esse recurso.
- Soft/Brisk: Define a forma de aceleração da máquina, em que o módulo Soft gera acelerações mais suaves enquanto o módulo Brisk produz avanços mais bruscos;
- Transição e blocos em cantos retos: Juntamente com a função Look ahead, esta função transforma as interpolações lineares para movimentos arredondados, principalmente nos cantos e áreas de paradas bruscas, de forma que os movimentos fiquem mais suavizados.

Com os recursos adaptativos permitidos pelo “CYCLE 832”, é possível ajustar a execução de um programa CAM para diferentes estratégias, obtendo uma qualidade superficial otimizada em comparação com os métodos de interpolação convencionais.

Além dos parâmetros apresentados, há também o parâmetro operação, no qual altera-se os parâmetros internos de movimentação dinâmica, priorizando assim a qualidade final do produto ou o tempo de usinagem, tendo como opções de seleção as opções de desbaste, pré-acabamento ou acabamento (SIEMENS, 2015).

2.3.2.1. INTERPOLAÇÃO SPLINE

Conforme mencionado no Capítulo 2.3.2, “CYCLE 832” é capaz de fazer a conversão interna dos segmentos lineares (interpolação linear) em polinômios Spline de quarto grau.

A geração da trajetória da ferramenta, quando se utiliza do método Spline, é representada por um conjunto de linhas retas e segmentos curvilíneos, os quais não são necessariamente arcos completos ou segmentos de arcos, mas sim curvas com maior grau de liberdade. Essas curvas são representadas por equações matemáticas, sendo possível obter formas mais suaves e precisas em comparação com os métodos de interpolação linear e circular (UHLMANN *et al.*, 2013).

O método consiste da união de diversas funções definidas em um intervalo, de tal maneira que os pontos entre as seções estejam ligados de forma contínua e suave (FERNANDES, 1997).

Antes da interação computacional, a definição de uma curva podia ser obtida fisicamente através de um método que consistia na utilização de uma barra, a qual era modelada no formato da curva desejada com a aplicação de tensões (pesos denominados “*ducks*”), conforme pode ser observado na Figura 18 (ROGERS e ADAMS, 1990).

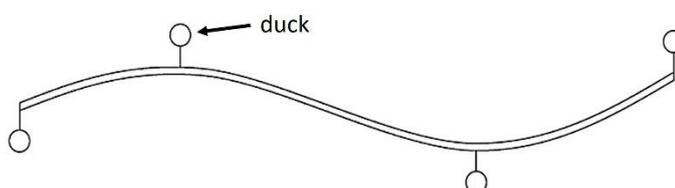


FIGURA 18 – CRIAÇÃO DE CURVAS COM O AUXÍLIO DE "DUCKS"

FONTE: ROGERS E ADAMS (1990)

Matematicamente, este método tem como objetivo obter uma curva interpolada contínua e com todos os pontos (denominados de nós) sobre a curva. A força

atuante sobre esses nós é representada por uma função discreta, $f(x_i), i = 0, \dots, n$, que resulta numa aproximação do tipo (ROGERS e ADAMS, 1990):

$$f_s(x) = \begin{cases} p_i(x), x_0 \leq x \leq x_1 \\ p_i(x), x_{i-1} \leq x \leq x_i \\ p_i(x), x_{n-1} \leq x \leq x_n \end{cases}$$

A função cúbica Spline é uma partição de polinômios que consiste na junção de polinômios, limitado por um determinado intervalo, tal que a continuidade da curva resultante desta função é satisfeita nos pontos de junção (LEI *et al.*, 2007).

Acima do terceiro grau, a função Spline pode possuir outros graus, sendo a Spline de grau “ n ”, um pedaço de polinômio que tem continuidade da derivada de ordem “ $n - 1$ ” em cada nó (LEI *et al.*, 2007).

Uma curva $s(t)$ é chama de Spline de grau n acima do nó t_0, t_1, \dots, t_n com $t_i \leq t_{i+1}$ e $t_i \leq t_{i+n+1}$ para cada i , se $s(t)$ possuir $n - r$ derivados de todos os nós múltiplos de r , e $s(t)$ é um polinômio de grau menor que n em cada intervalo $[t_i, t_{i+1}]$ para cada $i = 0, 1, \dots, m - 1$ (PALUSZNY *et al.*, 2002).

Desta maneira, define-se $s(t)$ pela Equação 10, de forma fragmentada acima do intervalo $[t_0, t_m] = [t_0, t_1] \cap [t_1, t_2] \cap \dots \cap [t_{k-1}, t_k]$ (DE SANTIAGO-PEREZ *et al.*, 2013).

$$s(t) = p_i(t) \text{ para } t \in [t_i, t_{i+1}] \quad (10)$$

onde:

$p_i(t)$: é uma função polinomial;

$$p_i^{(n-r)}(t_i) = p_{i+1}^{(n-r)}(t_{i+1}).$$

Quando gerado pelo sistema CAM, o método de interpolação Spline determina um caminho otimizado da ferramenta, respeitando os limites de tolerância previamente especificados. Em comparação com o método de interpolação linear, os programas NC's gerados são bem menores, uma vez que a quantidade

de pontos para representar as curvas também é reduzida. Desta maneira, o tempo de processamento e pós-processamento são otimizados, além da qualidade superficial e desacelerações serem mais eficientes (UHLMANN *et al.*, 2013).

Uma diferença sobre este método de interpolação está na sua aplicação, pois por não pertencer à norma de programação ISO 6983, não existe uma padronização e, conseqüentemente, não há semelhanças entre as linguagens de cada fabricante de comando numérico, o que dificulta a aplicação no ambiente industrial (CHENG *et al.*, 2002).

Dentre os métodos de interpolação Spline, existem famílias de funções compostas por vetores que utilizam segmentos de polinômios, os quais podem ser utilizados para gerar qualquer curva entre um determinado vetor de nós. Dentre essas famílias existe uma em especial, denominada de *Basis-Spline* ou apenas B-Spline, a qual é representada na Figura 19.

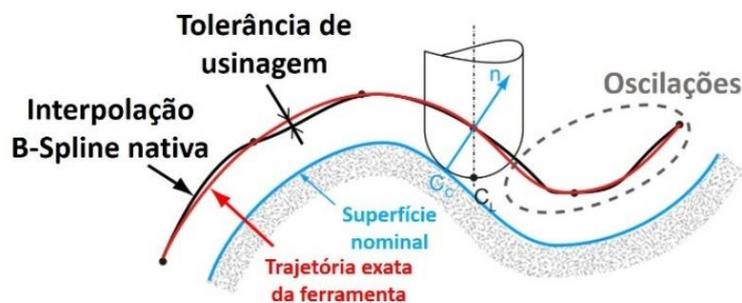


FIGURA 19 – MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO B-SPLINE

FONTE: BEUDAERT *ET AL.* (2014)

A curva B-Spline usa um modelo matemático baseado na função de mesclagem (*Base Spline*), que é apresentada pelos Polinômios de Bernstein. Está é definida a partir de um polígono de controle, passando apenas pelo primeiro e último ponto do polígono de controle, buscando uma melhor suavização nos demais pontos (ROGERS, 2000).

A representação matemática de uma curva B-Spline é apresentada na Equação 11 e nas Equações 12 e 13 são discriminadas suas funções de suavização (ROGERS, 2000).

$$P(t) = \sum_{i=1}^{n+1} BiNi, k(t) \quad (11)$$

onde:

$P(t)$ = Curva B-Spline;

Bi = Vértices do Polígono de Controle;

$n + 1$ = quantidade de pontos do Polígono de Controle;

t = Parâmetro da curva que varia de t_{\min} à t_{\max} ;

k = Ordem da Curva B-Spline, podendo ser definida no intervalo $2 \leq k \leq n + 1$;

$Ni, k(t)$ = Função de Suavização (*Basis-Spline*).

$$N_{i,1}(t) = \begin{cases} 1 & \text{se } x_i \leq t \leq x_{i+1} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (12)$$

$$N_{i,k}(t) = \frac{(t-x_i)N_{i,k-1}(t)}{x_{i+k-1}-x_i} + \frac{(x_{i+k}-t)N_{i+1,k-1}(t)}{x_{i+k}-x_{i+1}} \quad (13)$$

onde:

x_i = vetores internos do parâmetro "t" que respeitam a relação $x_i \leq x_{i+1}$.

O parâmetro "k" representa a variação do grau da função polinomial da curva, podendo variar entre " $k = 2$ ", resultando na representação da curva B-Spline através de polinômios de grau 1 (retas), até o limite do número de vértices do polígono de controle " $k = n$ " (Curva *Bézier*) (ROGERS, 2000).

De forma geral, como pode-se observar na Figura 20, quanto menor for o grau de uma curva, mais próxima a curva B-Spline fica de seus pontos de controle.

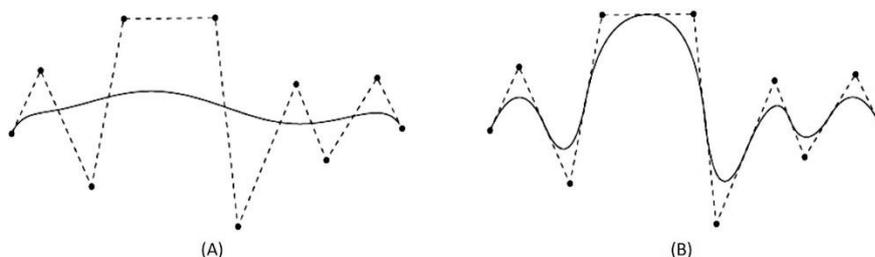


FIGURA 20 – (A) CURVA B-SPLINE DE GRAU 9; (B) CURVA B-SPLINE DE GRAU 2

FONTE: CARVALHO (2006)

Sendo assim, o grau do polinômio a ser utilizado na obtenção da curva está relacionado à ordem (k) da Curva B-Spline, na relação de $k - 1$ (ROGERS, 2000; MAHON e BROWNE, 1993).

Outro método de interpolação derivativo do método Spline e também com grande importância como o método B-Spline é a interpolação denominada *NURBS* (*Non Uniform Rotational B-Spline*). Esta permite a geração de uma trajetória mais suavizada e com menor quantidade de dados e, conseqüentemente, com um programa NC reduzido em comparação com seu método original (JEE e KOO, 2003).

Matematicamente, uma curva NURBS de grau “ P ” é definida pela Equação 14 (YAU *et al.*, 2006):

$$C(U) = \frac{\sum_{i=0}^N N_{i,P}(U)W_i P_i}{\sum_{i=0}^N N_{i,P}(U)W_i}, A \leq U \leq B \quad (14)$$

onde:

$\{P_i\}$ – Pontos de controle (compostos por polígonos de controle);

$\{W_i\}$ – Pesos;

$\{N_{i,p}(u)\}$ – Funções de base B-Spline de grau “ P ” definidas em um vetor de nós não periódico e não-uniforme.

A vantagem principal deste método de interpolação está na liberdade em produzir ou modificar as superfícies, uma vez que permite manipular de forma localizada uma região, através dos ajustes que podem ser feitos nos pontos de controle (JEE e KOO, 2003).

Por outro lado, para a representação de formas tradicionais (como uma circunferência), são necessários sete pontos de controle e dez nós, enquanto a representação tradicional necessita apenas do valor do raio, um ponto de centro e o vetor normal ao plano que contém o círculo. Portanto, nesses casos, ocorre maior taxa de armazenamento de dados, devido ao maior número de informações necessárias (YAU *et al.*, 2006).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir o objetivo deste trabalho, foram desenvolvidos experimentos considerando diferentes estratégias de usinagem para o fresamento da superfície complexa determinada.

Este processo seguiu as etapas descritas na Figura 21.

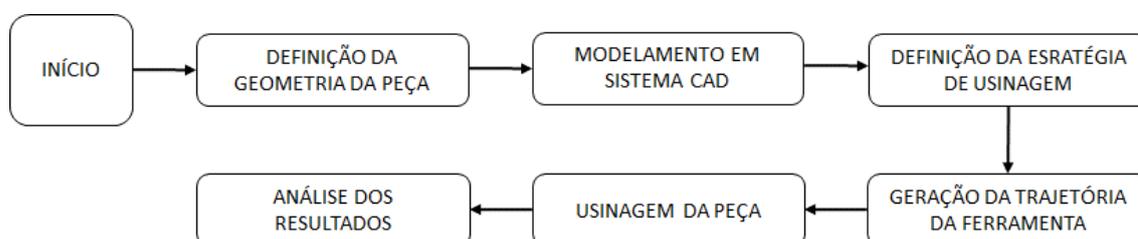


FIGURA 21 – ETAPAS DA FASE EXPERIMENTAL

Nas próximas seções deste capítulo são descritos detalhadamente os equipamentos e instrumentos utilizados, além do método de orientação seguido para a execução dos procedimentos experimentais.

3.1. CORPO DE PROVA

O corpo de prova utilizado nas análises experimentais deste estudo foi confeccionado, tendo como matéria-prima, o aço AISI P20 (DIN W.Nr 1.2311) com dureza na ordem de 30 Rockwell C. Este material foi desenvolvido para apresentar elevada polibibilidade, além de baixa deformação na têmpera ou no endurecimento por precipitação, sendo comumente utilizado na fabricação de moldes para injeção de plásticos (MEDEIROS *et al.*, 2013).

A Figura 22, apresenta as características geométricas gerais deste corpo de prova.

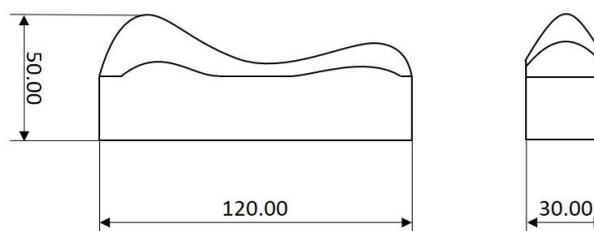


FIGURA 22 – DIMENSÕES BÁSICAS DO CORPO DE PROVA EM MILÍMETRO (MM)

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

3.2. FERRAMENTAS DE CORTE

Em relação às ferramentas de corte utilizadas no processo de usinagem, a princípio, para o processo de desbaste e pré-acabamento, utilizou-se insertos intercambiáveis da marca Sandvik Coromant, modelo (ISO e ANSI) R390-11 T3 08M-PM 1130, conforme características dimensionais apresentadas na Tabela 1 e ilustrada na Figura 23.

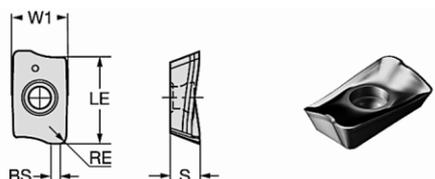


FIGURA 23 – INSERTO INTERCAMBIÁVEL - R390-11 T3 08M-PM 1130

FONTE: SANDVIK (2016)

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS INSERTO INTERCAMBIÁVEL R390-11 T3 08M-PM 1130

DESCRIÇÃO	SIGLA	VALOR	UNIDADE
Largura da pastilha	W1	6,80	Mm
Comprimento efetivo da aresta de corte	LE	10,00	Mm
Comprimento da aresta alisadora	BS	1,20	Mm
Raio do canto	RE	0,80	Mm
Ângulo da aresta de corte principal	KRINS	90,00	graus (°)
Espessura da pastilha	S	3,59	Mm
Peso do item	WT	0,002	Kg

FONTE: SANDVIK (2016)

Para a operação de acabamento, foco principal deste estudo, utilizou-se fresas inteiriças com pontas esféricas e de duas faces, conforme as características dimensionais apresentadas na Tabela 2 e ilustrado na Figura 24.

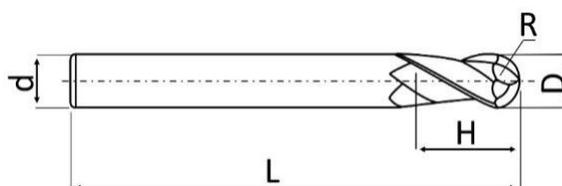


FIGURA 24 – FRESA ESFÉRICA UTILIZADA NA FASE EXPERIMENTAL

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

TABELA 2 - CARACTERÍSTICAS DIMENSIONAIS – FRESA ESFÉRICA 8MM

DESCRIÇÃO	SIGLA	VALOR	UNIDADE
Diâmetro da ponta	D	8	mm
Raio	R	4	mm
Diâmetro da haste	D	8	mm
Comprimento de corte	H	10	mm
Comprimento total	L	100	mm
Número de faces		2	und

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

3.3. MÁQUINA-FERRAMENTA

A máquina-ferramenta utilizada nos ensaios experimentais, foi o centro de usinagem vertical de cinco eixos, da marca ROMI, modelo DCM 620-5X, equipado com comando CNC SIEMENS 840D sl, conforme ilustrado na Figura 25.

Este equipamento é capaz de movimentar a ferramenta de corte em três direções lineares, proporcionando, assim, os movimentos de translação (X, Y e Z).



FIGURA 25 – ESTRUTURA DA MÁQUINA ROMI DCM 620-5X

FONTE: INDÚSTRIAS ROMI S.A. (2018)

Além destes, também é possível gerar movimentos angulares (Eixos B e C), através da inclinação e rotação da mesa de fixação da peça (SOUZA e COELHO, 2006), conforme as características apresentadas na Tabela 3 e ilustrado na Figura 26.

TABELA 3 – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS EIXOS ROTATIVOS (B e C)

CARACTERÍSTICAS DOS EIXOS ROTATIVOS	(B e C)
Ângulo de inclinação do eixo B	-110° +110°
Ângulo de rotação do eixo C	360°
Sistema de acionamento dos eixos B e C	Motores independentes
Peso máximo admissível na mesa	300 Kg
Velocidade de rotação	12 rpm
Torque de travamento	Eixo B: 4.410 N.m Eixo C: 2.450 N.m

FONTE: INDÚSTRIAS ROMI S.A. (2018)



FIGURA 26 – ÂNGULO DE INCLINAÇÃO (B) E ROTAÇÃO (C)

FONTE: INDÚSTRIAS ROMI S.A. (2018)

3.4. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

A análise comparativa das metodologias de interpolação da trajetória da ferramenta foi realizada através das seguintes características:

- Exatidão geométrica do corpo de prova, comparando-o com o modelo virtual do sistema CAD;
- Tempo de usinagem do corpo de prova;
- Variação da velocidade de avanço da máquina-ferramenta;

3.4.1. EXATIDÃO GEOMÉTRICA

Para a análise da exatidão geométrica do corpo de prova, utilizou-se uma máquina de medição por coordenadas. Nesta, o modelo da peça projetada no sistema CAD é transferido para o *software* da máquina de medição em formatos neutros de conversão geométrica, tais como IGES e STEP.

Posteriormente, colocando o modelo físico em um plano de medição (referência), o *software* é capaz de identificá-lo, comparando, assim, as coordenadas virtuais projetadas com as coordenadas reais da peça usinada.

O procedimento de ajuste dos modelos geométricos (real e virtual) é extremamente importante, uma vez que os erros provenientes de um mau posicionamento serão transferidos diretamente para a comparação geométrica. Em função disso, faces de referência foram usinadas para os eixos de coordenadas (X, Y, Z), possibilitando assim, o correto posicionamento entre os modelos.

Estas faces estão destacadas pela coloração azul na Figura 27.

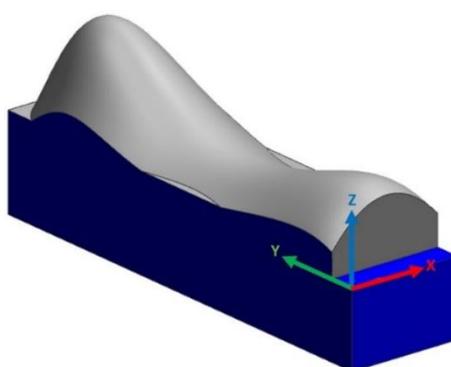


FIGURA 27 - FACES DE REFERÊNCIA DO CORPO DE PROVA

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

O plano de medição do corpo de prova foi baseado na varredura por pontos, em intervalos de 1,00 mm, sobre as linhas de medição. Estas linhas foram distribuídas em três posições sobre o corpo de prova, com intervalos de 10,00 mm entre elas, conforme detalhamento da Tabela 4 e representação ilustrativa da Figura 28.

TABELA 4 - POSIÇÕES DAS LINHAS DE MEDIÇÃO

POSIÇÕES DAS LINHAS DE MEDIÇÃO	
LINHA	EIXO X _M (mm)
1	5,00
2	15,00
3	25,00

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

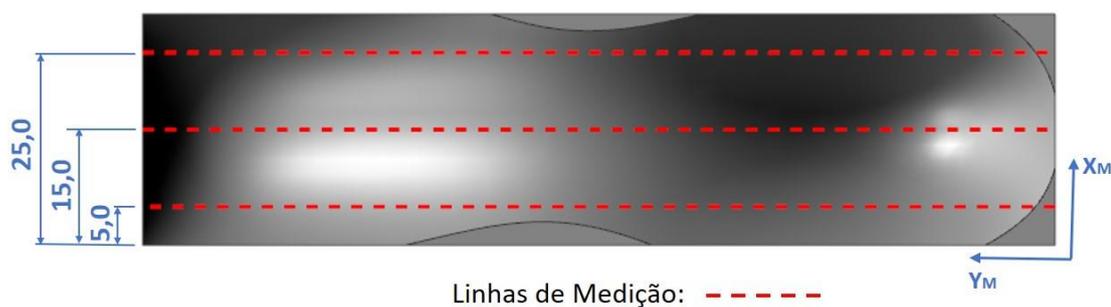


FIGURA 28 - PLANO DE MEDIÇÃO DO CORPO DE PROVA (MM)

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

3.4.2. TEMPO DE USINAGEM

O tempo de usinagem de cada método de interpolação foi medido com o auxílio da própria máquina de usinagem, com o intuito de verificar a eficiência de cada método de interpolação testado.

Para efeito comparativo, considerou-se o tempo de usinagem da Interpolação Linear como sendo 100% e, a partir deste, foram feitas as quantificações proporcionais dos tempos dos outros métodos analisados.

Todos os resultados obtidos são apresentados na seção 5.3.

3.4.3. VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE AVANÇO

A importância de analisar o impacto que o método de interpolação da trajetória da ferramenta exerce sobre a variação da velocidade de avanço relaciona-se diretamente com o tempo de usinagem e, conseqüentemente, com a eficiência do processo.

Para isto, neste estudo, utilizou-se um programa NC desenvolvido pela SIEMENS, o qual possui linguagem parametrizada e funções síncronas, conforme demonstrado no Apêndice A.

Sendo assim, através destas funções síncronas, foi possível fazer com que o próprio CNC monitorasse a velocidade de avanço real ao longo da geometria da

peça trabalhada, em intervalos de 2 mm, os quais foram previamente especificados no programa.

Portanto, desta maneira, foi possível avaliar a influência da geometria da peça sobre o avanço real da ferramenta para cada método de interpolação avaliado.

4. DESENVOLVIMENTO DOS ENSAIOS

Os ensaios de usinagem que compõem a fase experimental deste projeto visam o aprofundamento teórico-prático objetivando obter e compreensão dos fatores envolvidos no processo de manufatura de superfícies complexas.

De forma mais específica, estes ensaios buscam a compreensão dos efeitos decorrentes da aplicação de diferentes estratégias de usinagem, variando os métodos de interpolação da trajetória da ferramenta, durante o processo de corte em centros de usinagem que trabalham com cinco eixos.

Para isto, a princípio, como meio de preparação para os testes de usinagem, realizou-se a simulação virtual dos movimentos da ferramenta sobre a peça (auxiliados pelo *software* CAM - Unigraphics NX - SIEMENS), distribuindo os métodos de interpolação da trajetória da ferramenta (Linear e Linear + “CYCLE 832” em três eixos e Linear em cinco eixos) em faixas paralelas de usinagem.

O centro de usinagem Cinco Eixos é capaz de executar seu trabalho, movimentando os cinco eixos simultaneamente, ou também, fixando a mesa de apoio à peça em uma determinada posição e, posteriormente, trabalhar com os eixos lineares para o processo de remoção de material. Este processo de trabalho é designado como usinagem 3+2 eixos.

Diante desta definição, este trabalho comparou os métodos de interpolação da trajetória da ferramenta (Linear e Linear + “CYCLE 832”), utilizando a usinagem em 3+2 eixos.

De modo complementar, como uma segunda fase desta etapa experimental, buscou-se evidenciar as diferenças entre a manufatura de superfícies complexas, fabricadas em cinco eixos simultâneos e em 3+2 eixos. Para isto, manteve-se as variáveis e parâmetros utilizados no método de interpolação Linear + “CYCLE 832” na usinagem em 3+2 eixos, alterando apenas para a usinagem em cinco eixos simultâneos.

Sendo assim, como consequência do número de variáveis envolvidas no processo e, buscando a validação dos resultados encontrados de modo a garantir a repetibilidade dos mesmos, a Figura 29 apresenta o número de experimentos executados para cada tipo de método de interpolação avaliado.

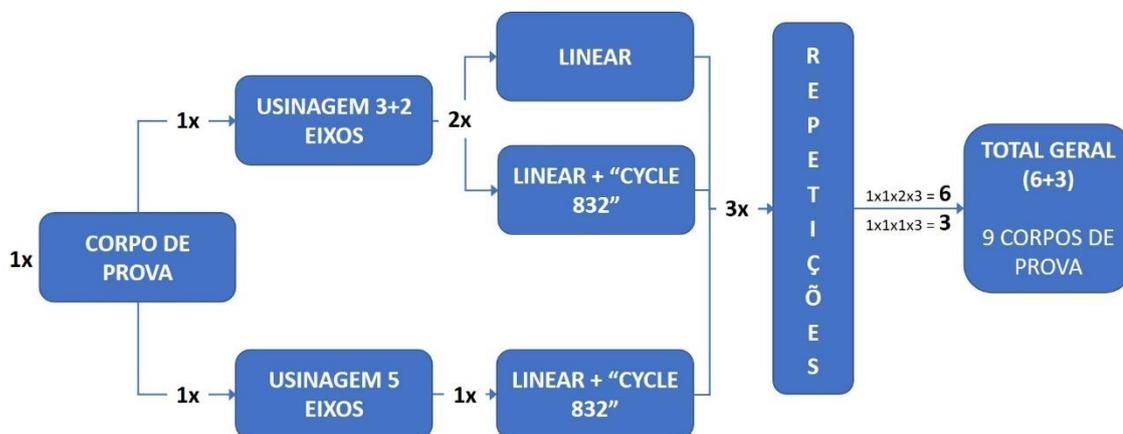


FIGURA 29 – NÚMERO DE EXPERIMENTOS POR VARIÁVEL DO PROCESSO

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Como é possível observar, na totalidade, foram produzidos 9 corpos de prova, sendo 3 unidades destinadas para cada método de interpolação da trajetória da ferramenta em 3+2 eixos, totalizando em 6 unidades, e mais 3 unidades, produzidas pelo processo de usinagem em cinco eixos simultâneos com o método de interpolação Linear + “CYCLE 832”.

Os demais parâmetros tecnológicos, tais como, velocidade de corte, avanço por aresta e profundidade de usinagem, foram aplicados da mesma forma para todos os corpos de prova. Estes encontram-se descritos nos tópicos subsequentes a este capítulo.

4.1. DESCRIÇÃO DAS OPERAÇÕES

As operações preliminares compostas pelas operações de desbaste e pré-acabamento, possuem entre elas os mesmos parâmetros tecnológicos, inclusive o método de interpolação da trajetória da ferramenta, uma vez que o objeto de estudo deste trabalho é direcionado às operações de acabamento.

Em relação ao posicionamento de fixação da peça no sistema CAM, o comprimento do lado maior da peça (120 mm), foi colocado paralelamente ao eixo Y_M (Y da máquina) e, o eixo X_M , encontra-se perpendicular a este primeiro mencionado (direção do lado de 30 mm). Devido aos três eixos lineares serem perpendiculares entre si, por consequência, o eixo Z_M , encontra-se paralelo ao lado de 50 mm.

O ponto zero do eixo de coordenadas da máquina foi posicionado nos eixos X_M e Y_M , no ponto médio do comprimento total das respectivas faces (15 mm para X_M e 60 mm para Y_M). Para o eixo Z_M , considerou-se como ponto zero, a face superior do corpo de prova inicial.

As posições de fixação da peça em relação aos eixos de coordenadas da máquina e ponto zero do eixo de coordenadas podem ser observados na Figura 30.

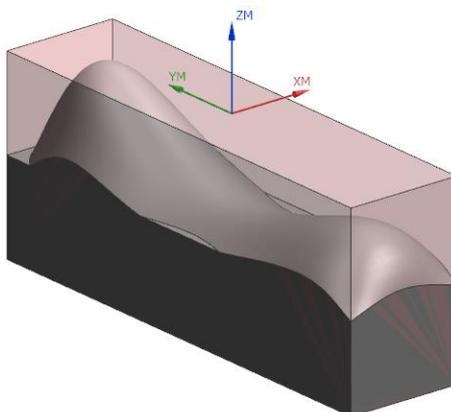


FIGURA 30 – POSICIONAMENTO DO CORPO DE PROVA NO SISTEMA CAM

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

A Figura 31 apresenta a posição de fixação do corpo de prova na máquina.

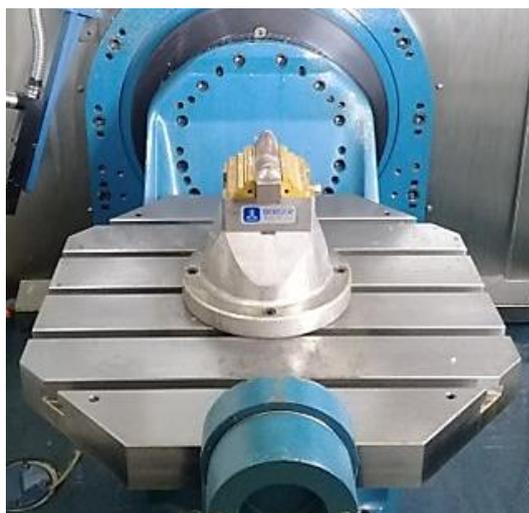


FIGURA 31 – FIXAÇÃO DO CORPO DE PROVA NA MÁQUINA

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

4.1.1. DESBASTE

A operação de desbaste tem como objetivo eliminar grande parte do material contido na peça inicial, deixando sobremetal para a execução das atividades posteriores de pré-acabamento e acabamento.

Nesta etapa foi utilizado o inserto intercambiável modelo R390-11 T3 08M-PM 1130 (Sandvik Coromant) descrito na seção 3.2, e a estratégia de corte, *follow-periphery*, em conjunto com os parâmetros de corte apresentados na Tabela 5.

TABELA 5 – PARÂMETROS UTILIZADOS NA OPERAÇÃO DE DESBASTE

PARÂMETRO	SIGLA	VALOR	UNIDADE
Rotação do eixo árvore	n	3.200,00	Rpm
Velocidade de avanço	Vf	800,00	mm/min
Velocidade de corte	Vc	200,00	m/min
Avanço por aresta	fz	0,12	Mm
Profundidade de corte	ap	0,50	Mm
Passo lateral	ae	15,00	Mm
Sobremetal	-	0,40	Mm
Diâmetro da ferramenta	D	20,00	Mm
Número de arestas		2,00	Und

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

A Figura 32 ilustra a simulação da operação de desbaste do corpo de prova realizada no Sistema CAM. É possível observar que, devido ao tamanho da ferramenta utilizada, a peça final apresenta-se com grande quantidade de sobremetal e, devido a estratégia de corte selecionada, gerou-se grande quantidade de movimentos de transição da ferramenta (movimentos não efetivos de corte).

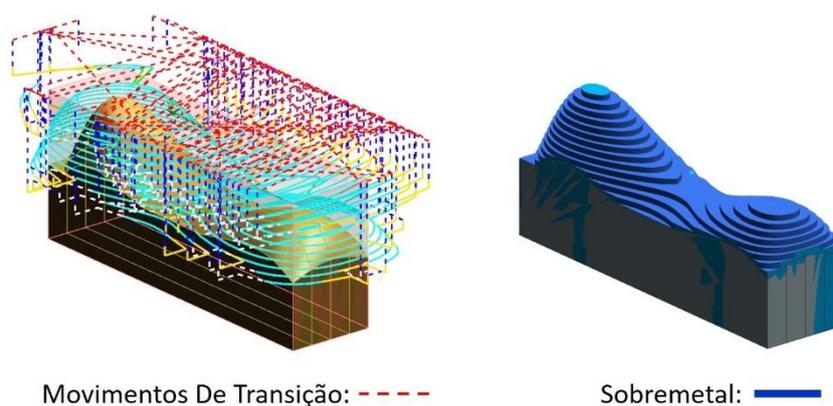


FIGURA 32 – SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DE DESBASTE

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

4.1.2. PRÉ-ACABAMENTO

O pré-acabamento é a fase intermediária entre a operação de desbaste e acabamento. Esta tem como finalidade retirar o excesso de sobremetal deixado na operação de desbaste criando, assim, uma superfície mais uniformizada e com uma quantidade de sobremetal constante (0,20 mm) para a operação final de acabamento.

A simulação dos movimentos da ferramenta para esta etapa do processo pode ser observado na Figura 33. Nesta, as linhas que acompanham o movimento longitudinal da peça são movimentos efetivos de corte, sendo estes os movimentos de maior predominância nesta fase do processo.

Nesta etapa, utilizou-se a estratégia de corte *zig-zag*, paralela ao eixo Y da peça, com os parâmetros de corte apresentados na Tabela 6.

TABELA 6 - PARÂMETROS UTILIZADOS NA OPERAÇÃO DE PRÉ-ACABAMENTO

PARÂMETRO	SIGLA	VALOR	UNIDADE
Rotação do eixo árvore	n	6.200,00	Rpm
Velocidade de avanço	Vf	1.200,00	mm/min
Velocidade de corte	Vc	150,00	m/min
Avanço por aresta	Fz	0,10	Mm
Profundidade de corte	ap	0,40	Mm
Sobremetal		0,20	Mm
Diâmetro da ferramenta	D	8,00	Mm
Número de arestas		2,00	Und

FONTA: ELABORADO PELO AUTOR

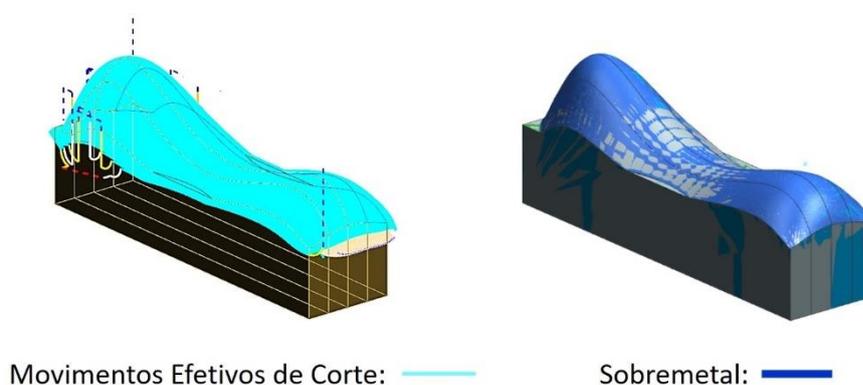


FIGURA 33 – SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DE PRÉ-ACABAMENTO

FONTA: ELABORADO PELO AUTOR

4.1.3. ACABAMENTO

A operação final é denominada de acabamento. Esta tem por finalidade deixar a peça conforme o modelo geométrico projetado. Por ser uma operação crítica que atinge diretamente a qualidade final do produto, foi o objeto de estudo deste trabalho.

Os corpos de prova, descritos na seção 3.1, foram diferenciados pelos métodos de interpolação da trajetória da ferramenta e pela estratégia de movimentação dos eixos rotativos da máquina (3+2 e Cinco Eixos), durante o processo de manufatura.

Para a usinagem em 3+2 Eixos, utilizou-se dos métodos de interpolação Linear e Linear + “CYCLE 832” e, para o processo de usinagem em cinco eixos, utilizou-se exclusivamente o método de interpolação Linear + CYCLE 832”.

Em relação aos parâmetros de usinagem, para todos os casos foram utilizados os valores apresentados na Tabela 7 com a estratégia de corte aplicada *zig-zag* paralela ao eixo Y_M .

TABELA 7 - PARÂMETROS UTILIZADOS NA OPERAÇÃO DE ACABAMENTO

PARÂMETRO	SIGLA	VALOR	UNIDADE
Rotação do eixo árvore	n	12.000	rpm
Velocidade de avanço	Vf	5.000	mm/min
Velocidade de corte	Vc	300	m/min
Avanço por aresta	fz	0,10	mm
Passo Lateral	a _e	0,20	mm
Diâmetro da ferramenta	D	8	mm
Número de arestas		2	und

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

4.1.3.1. Acabamento em 3+2 Eixos

A simulação da operação de acabamento em 3+2 eixos, gerada pelo sistema CAM, é apresentada na Figura 34.

Neste processo, a princípio, a peça foi posicionada pelo eixo rotacional B em ângulos de 45° (positivo e negativo) em relação ao eixo Z_M e, posteriormente, os eixos lineares da máquina entraram em movimento, realizando assim a usinagem efetiva da peça.

Em outras palavras, os posicionamentos mencionados dividem a usinagem da peça em duas etapas. A primeira realiza a usinagem do corpo de prova posicionado em ângulo positivo de 45° e, em segundo momento, rotacionando a peça para 45° negativos, executa-se a segunda etapa do processo de manufatura.

Na imagem, é possível observar, através das linhas de movimentos efetivos de corte, que a ferramenta não percorre toda a superfície da peça com apenas um

movimento de inclinação do Eixo B. Para isto, é necessário movimentar a mesa de fixação em ambos os sentidos, de forma que a ferramenta seja capaz de percorrer todo o perfil da peça e concluir o processo de manufatura.

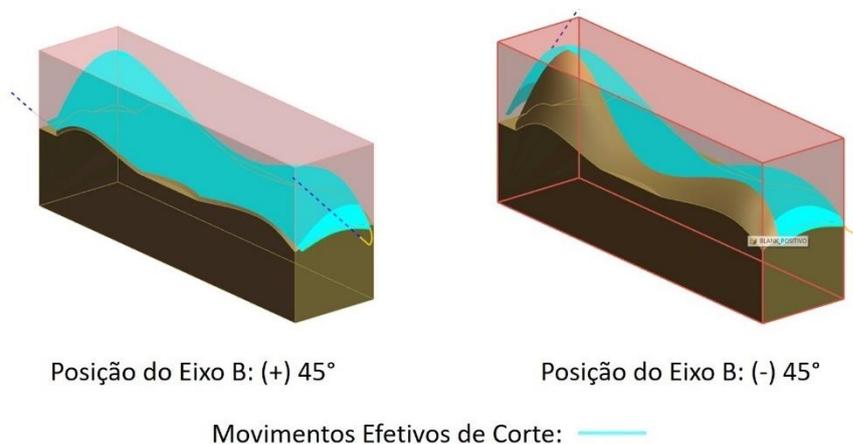


FIGURA 34 – SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DE ACABAMENTO EM 3+2 EIXOS

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

4.1.3.2. Acabamento em 5 Eixos

A usinagem em cinco eixos diferencia-se, principalmente, pela execução simultânea dos movimentos entre os eixos de translação (X, Y e Z) e eixos rotacionais (B e C).

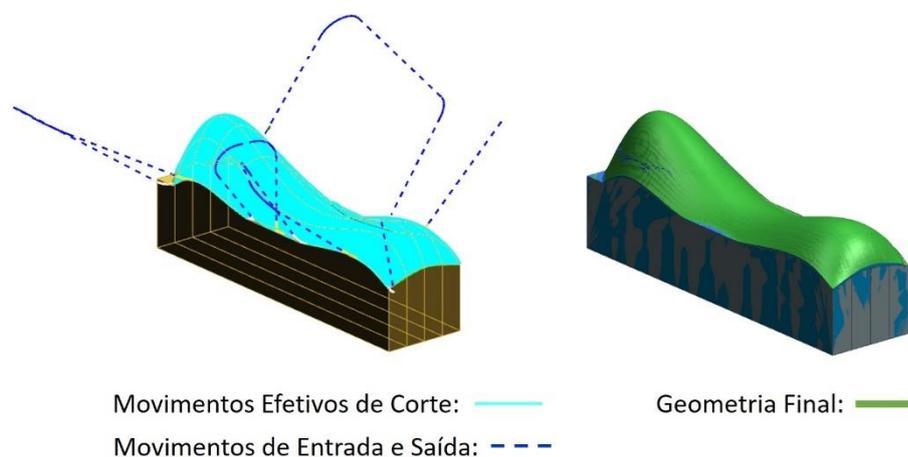


FIGURA 35 – SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DE ACABAMENTO EM CINCO EIXOS

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

A Figura 35 apresenta a simulação desta operação, onde é possível observar que a ferramenta realiza o movimento de entrada em um dos lados da peça, seguido pelos movimentos efetivos de corte e, diferentemente da usinagem em 3+2 eixos, a peça é usinada em sua totalidade na direção do eixo X em consonância com o movimento rotacional dos eixos B e C da máquina.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados decorrentes do processo de manufatura dos corpos de prova descritos na seção 3.1, com a aplicação das diferentes estratégias de usinagem, apresentadas na seção 4.1.3.

5.1. ANÁLISE DO MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO LINEAR

Como descrito na seção 2.3.1, o método de interpolação linear é composto pela união de segmentos de retas que acompanham o perfil da peça projetada. Em função disso, a análise deste método está fundamentada na comparação dos tamanhos dos segmentos de retas que compõem os mesmos.

Diante disso, para execução efetiva da análise, utilizou-se as linhas guias descritas no seção 3.4.1, e seus programas com as respectivas trajetórias, estão documentados nos Apêndices B – J.

Sendo assim, a Figura 36 apresenta as características de variação do tamanho de segmento de reta de acordo com a estratégia de usinagem utilizada.

Nesta análise, utilizou-se a velocidade de avanço $V_f = 5.000$ mm/min, onde foi evidenciado que os dois métodos de interpolação (Linear e Linear + “CYCLE 832”) utilizados na usinagem em 3+2 Eixos, apresentaram exatamente os mesmos tamanhos de segmentos de retas. Isso deve-se ao fato da interpolação Linear + “CYCLE 832” ser derivada da interpolação Linear. A conversão desta primeira ocorre por meio de comandos internos da máquina (conforme apresentado na seção 2.3.2) e, portanto, as diferenças entre os tamanhos dos segmentos de retas não são observados no programa NC.

Quando comparadas as estratégias de usinagem em 3+2 e cinco eixos, utilizando-se do mesmo método de interpolação observa-se que em alguns pontos da peça como, por exemplo, entre os pontos 26 e 40 (Linha X = 25 mm) e entre os pontos 77 e 96 (Linha X = 5 e 25 mm) do eixo Y, a usinagem em cinco eixos apresentou

considerável redução dos segmentos de retas em comparação à usinagem em 3+2 eixos.

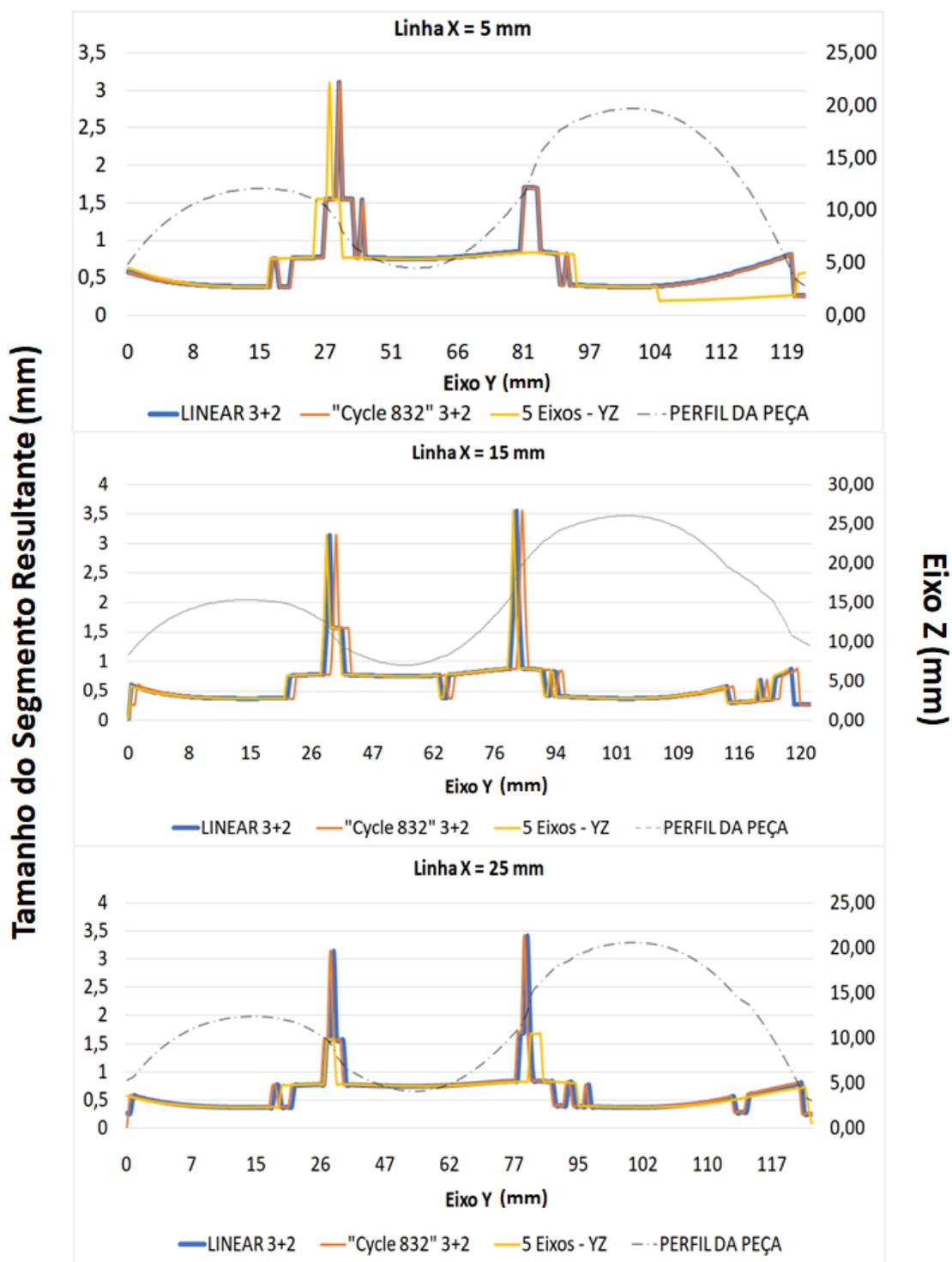


FIGURA 36 – TAMANHO DOS SEGMENTOS DE RETA ENTRE AS ESTRATÉGIAS DE USINAGEM

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

5.2. ANÁLISE DA EXATIDÃO GEOMÉTRICA

Com a análise de exatidão geométrica, buscou-se avaliar o comportamento do erro geométrico no processo de fabricação da peça. Em outras palavras, buscou-se identificar o desvio da peça usinada em relação ao modelo nominal projetado.

Diante disso, a exatidão geométrica obtida para as diferentes metodologias de interpolação da trajetória da ferramenta, é apresentada na Figura 37, Figura 38 e Figura 39. Estes valores foram coletados no relatório de medição da máquina de medir por coordenadas, sendo que os desvios indicados consideraram a comparação entre o modelo CAD e o corpo de prova, a partir de uma referência XYZ pré-determinada (ver item 3.4.1).

Neste relatório, as linhas com core cinza indicam as variações dimensionais (desvios geométricos resultantes – X, Y, Z) em relação ao perfil do corpo de prova projetado no sistema CAD.

Desta maneira, foi possível observar que:

- Os maiores desvios dimensionais entre os métodos de interpolação avaliados foram obtidos com a utilização da estratégia de usinagem Linear + “CYCLE 832” em 3+2 Eixos;
- Nas regiões onde a ferramenta executou movimentos descendentes, o corpo de prova apresentou dimensões inferiores ao modelo CAD. Desta maneira, houve a invasão da ferramenta sobre a área projetada;
- Nas regiões onde a ferramenta executou movimentos ascendentes, a geometria do corpo de prova apresentou-se com dimensões maiores que o projetado no modelo CAD. Desta maneira, houve a presença de sobremetal residual na peça;
- A usinagem Cinco Eixos apresentou a menor oscilação de desvio geométrico, com maior elevação nos pontos de saída da peça trabalhada.
- Os métodos de interpolação executados em 3+2 Eixos apresentaram a desvios geométricos resultantes inversos para movimentos ascendentes e descendentes da curva Y da peça.

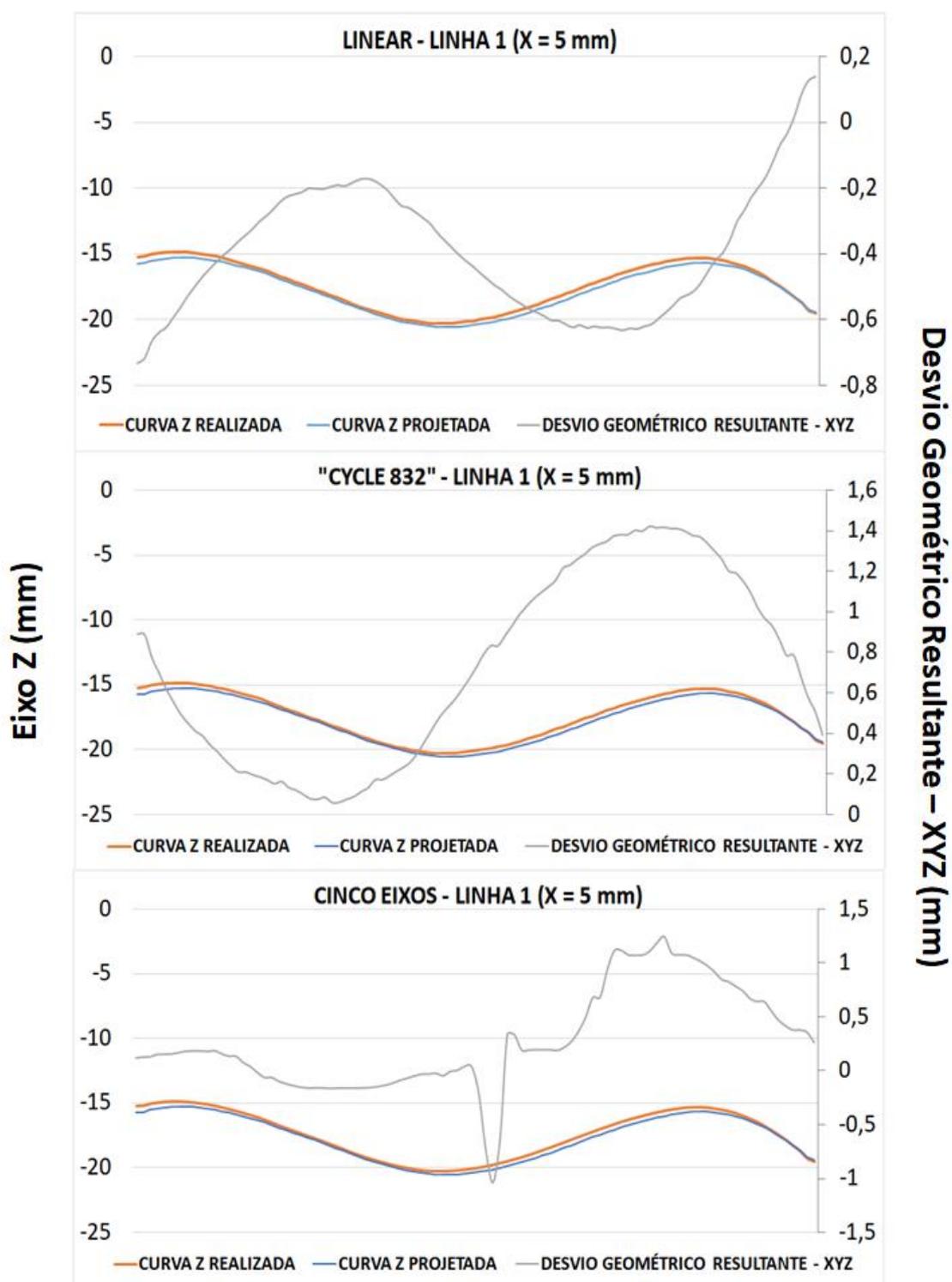


FIGURA 37 – DESVIO ENTRE OS MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO – LINHA 1 (X = 5 MM)

FONTES: ELABORADO PELO AUTOR

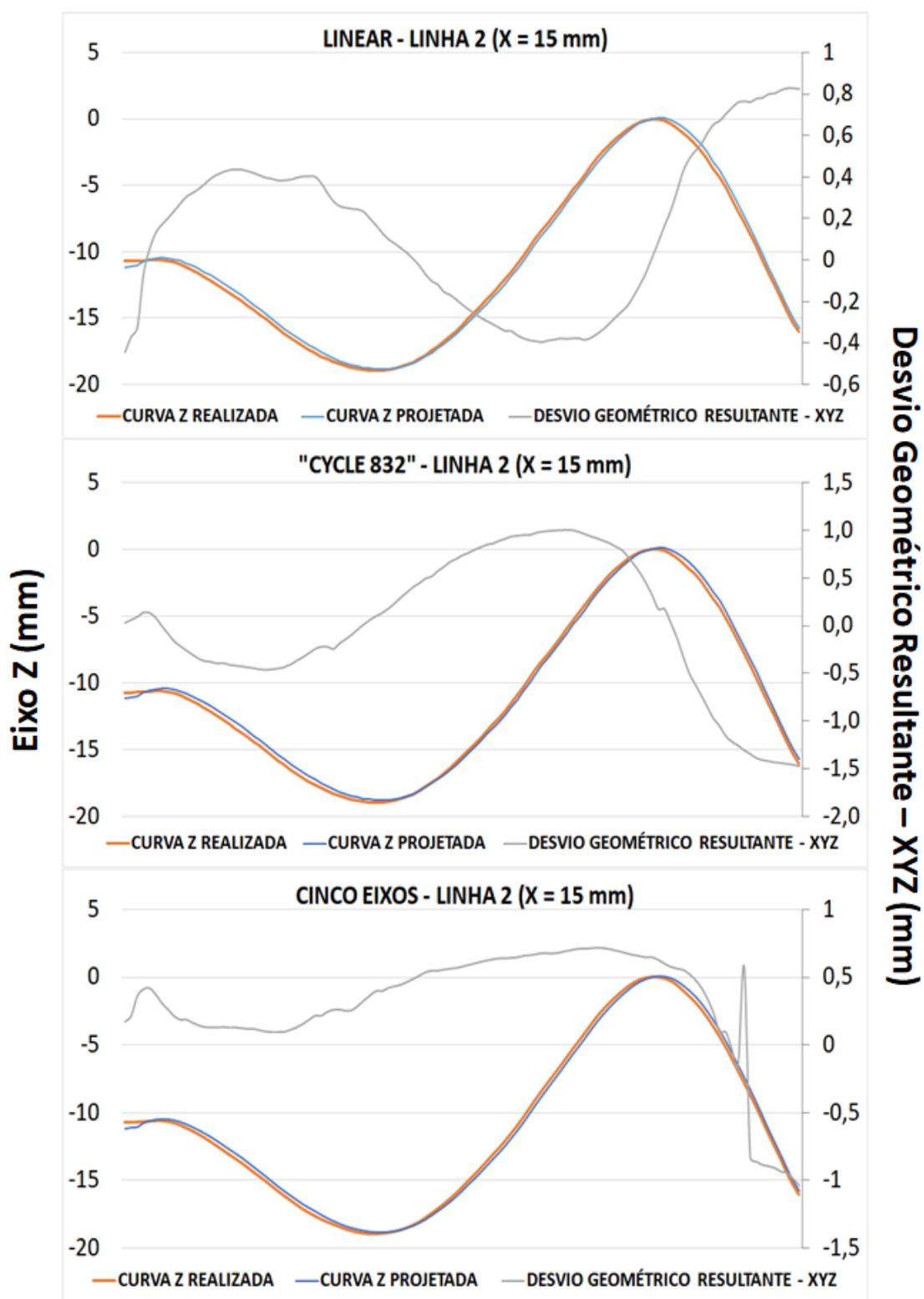


FIGURA 38 - DESVIO ENTRE OS MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO – LINHA 2 (X = 15 MM)

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

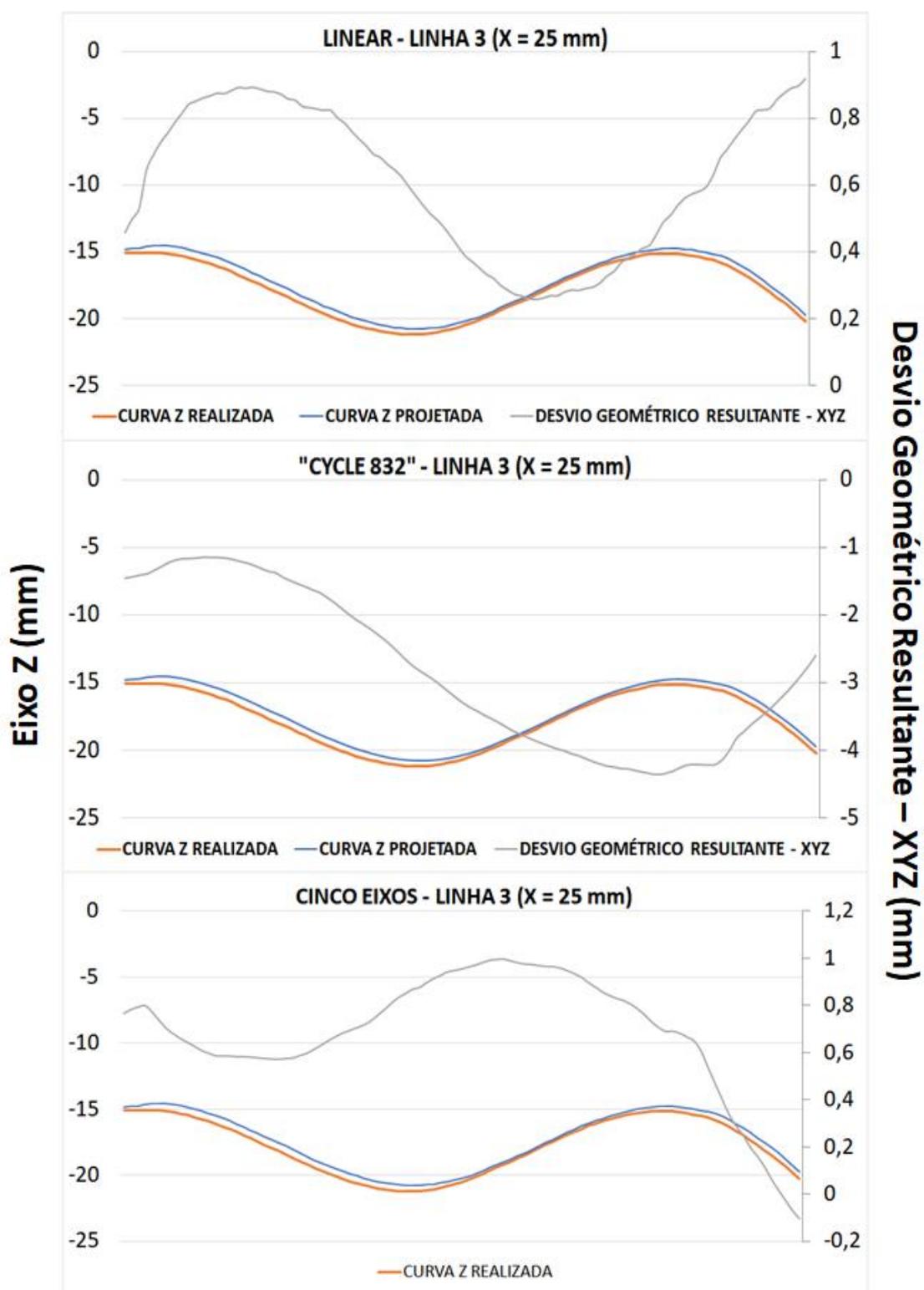


FIGURA 39 - DESVIO ENTRE OS MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO – LINHA 3 (X = 25 MM)

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

5.3. ANÁLISE DO TEMPO DE USINAGEM

Os resultados entre os tempos de usinagem para cada método de interpolação estudado são apresentados na Figura 40, Figura 41 e Figura 42.

Como pode ser observado, a usinagem em cinco eixos simultâneos apresentou o maior tempo, quando comparado às outras estratégias avaliadas. De forma quantitativa, este método utilizou entre 13 a 39% a mais de tempo, sendo este resultado decorrente da geração de maior quantidade de dados para a movimentação simultânea dos eixos rotativos e lineares.

Avaliando apenas os ensaios com baixas velocidades de avanço (2.500 mm/min), a tendência da usinagem em cinco eixos em utilizar mais tempo manteve-se. Na usinagem em 3+2 Eixos, os métodos avaliados apresentaram tempos de usinagem aproximados devido à capacidade de processamento da máquina para baixas velocidades de avanço ser capaz de processá-los com eficiência aproximada.

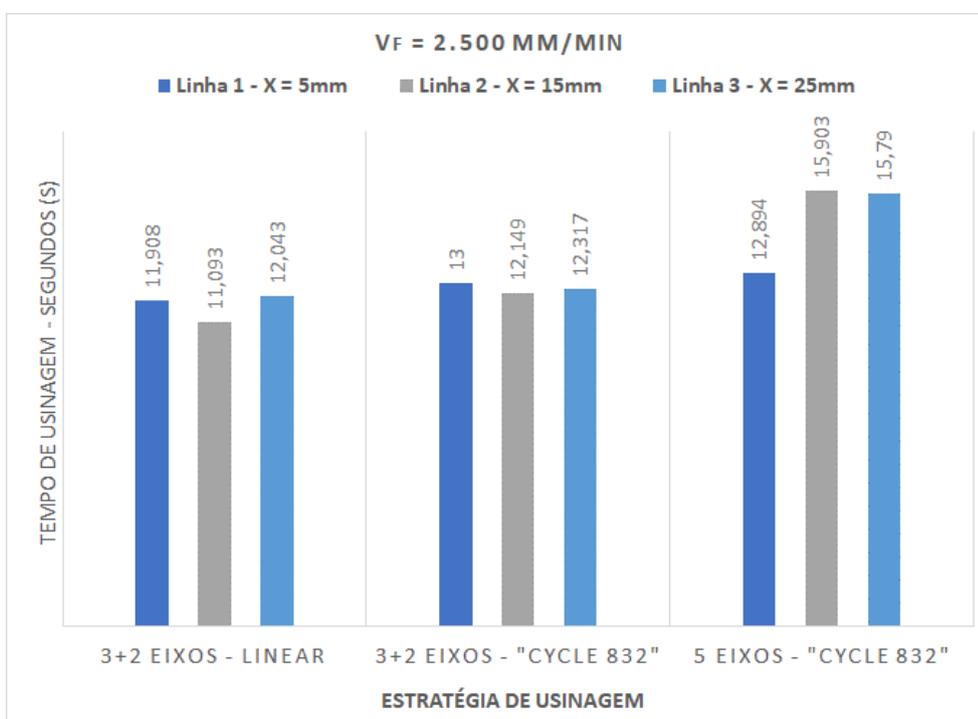


FIGURA 40 - TEMPOS DE USINAGEM - VELOCIDADE DE AVANÇO 2.500 MM/MIN

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Para os ensaios realizados com maiores velocidades de avanço (5.000 e 10.000 mm/min), é evidenciada a superioridade do método Linear + “CYCLE 832”, uma vez que este obteve uma redução entre 9 e 18% do tempo utilizado no método Linear em 3+2 Eixos, o qual foi identificado como o segundo método mais rápido.

Desta maneira, com a comparação entre a variação dos tempos de usinagem em relação à estratégia de usinagem utilizada, é possível concluir que:

- em todas as faixas de velocidades de avanço trabalhadas, a usinagem em cinco eixos simultâneos, apresentou o maior tempo de usinagem;
- a superioridade do método de interpolação Linear + “CYCLE 832” sobre o método Linear é evidenciada com a utilização de velocidades de avanço mais elevadas.



FIGURA 41 - TEMPOS DE USINAGEM - VELOCIDADE DE AVANÇO 5.000 MM/MIN

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

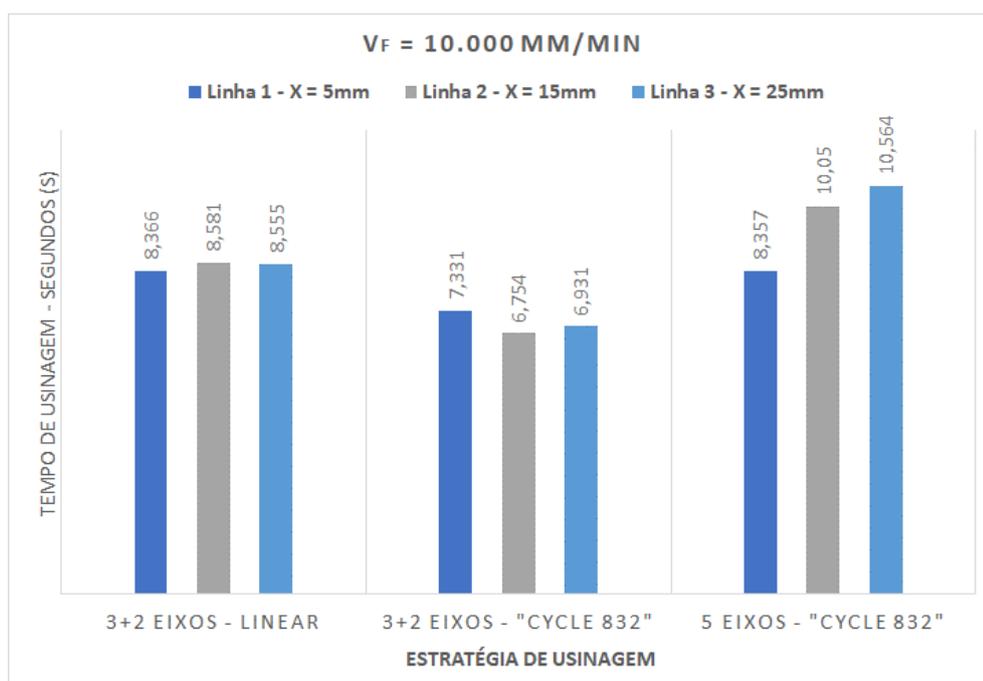


FIGURA 42 - TEMPOS DE USINAGEM OBTIDOS - VELOCIDADE DE AVANÇO 10.000 MM/MIN

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

5.4. ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE AVANÇO

A variação da velocidade de avanço impacta diretamente no tempo de usinagem e, conseqüentemente, na eficiência do processo. Diante disso, buscou-se avaliar a influência das estratégias estudadas em diferentes condições geométricas e velocidades de avanço programadas.

Os resultados são apresentados na Figura 43, Figura 44 e Figura 45, onde é possível observar de forma geral que, em baixas velocidades de avanço programadas (2.500 mm/min) não houve frequente variação da velocidade, mantendo-se o avanço programado em grande parte do percurso executado.

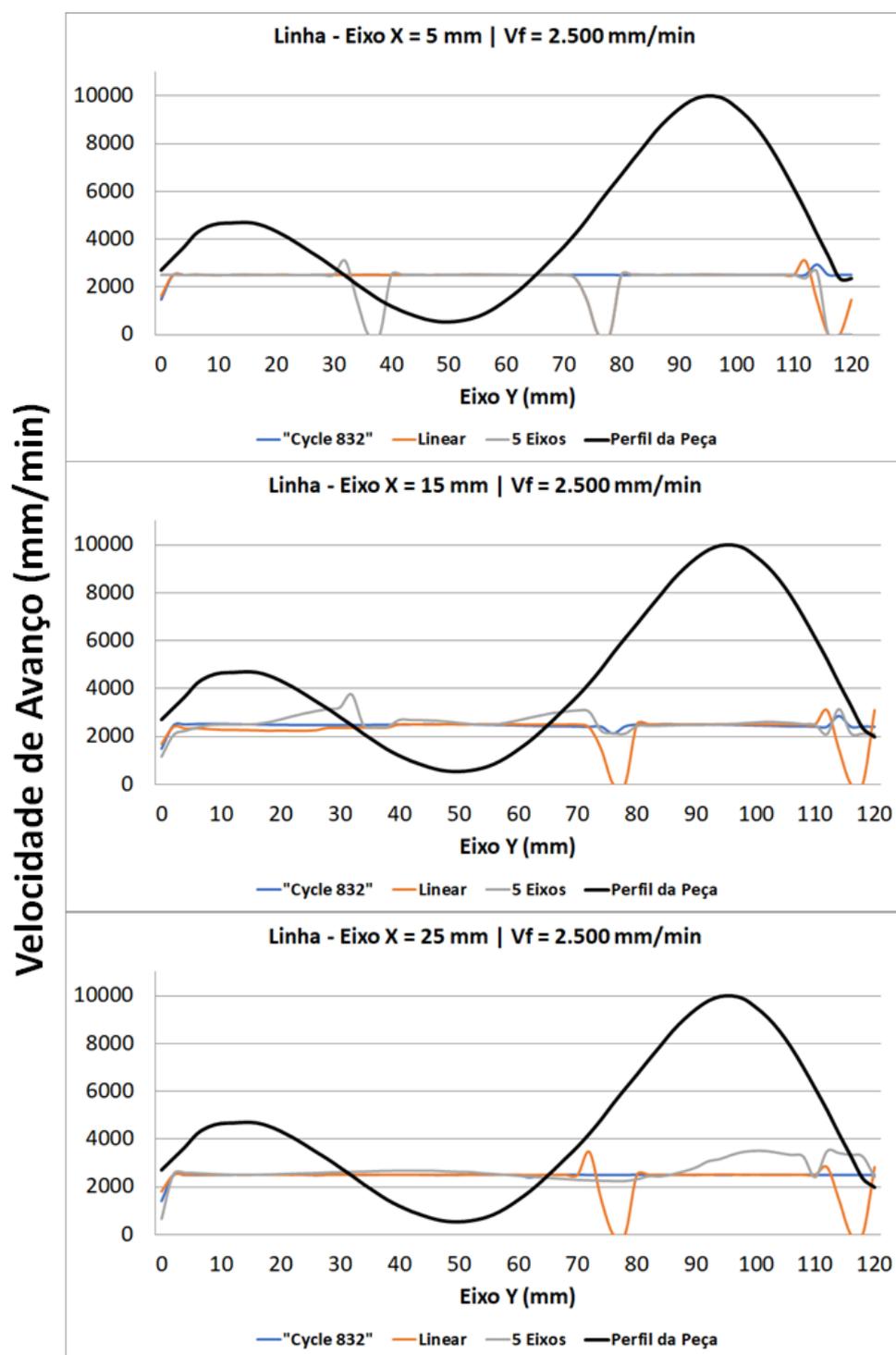


FIGURA 43 - COMPORTAMENTO DA VELOCIDADE DE AVANÇO – $V_F = 2.500$ MM/MIN

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Os resultados das análises dos testes realizados com velocidades de avanço mais elevadas (5.000 e 10.000 mm/min) evidenciam com maior incidência as oscilações de velocidades de avanço, principalmente para o método Linear em 3+2 Eixos.

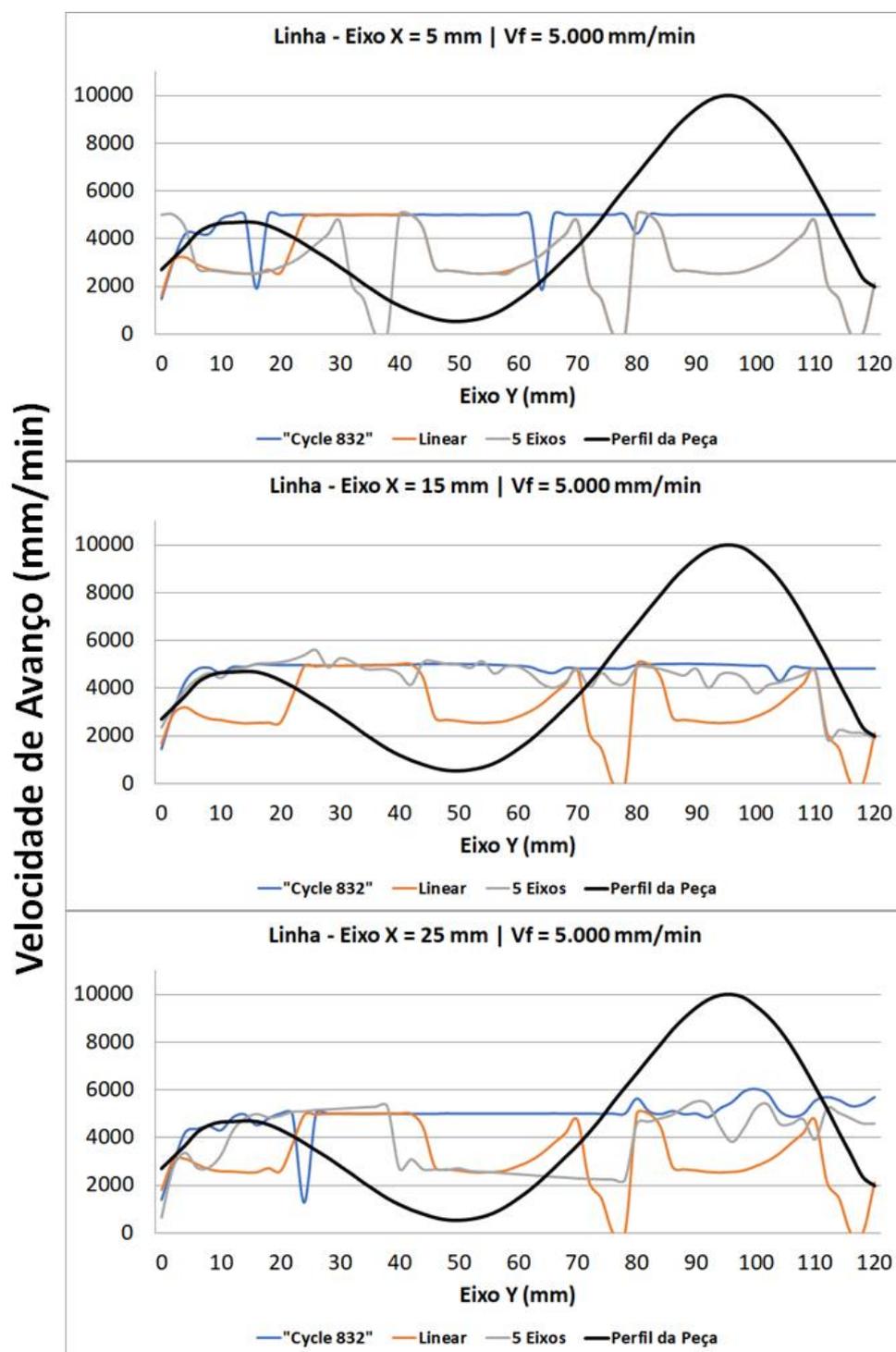


FIGURA 44 - COMPORTAMENTO DA VELOCIDADE DE AVANÇO - $V_F = 5.000$ MM/MIN

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Em outras palavras, quando comparadas as três estratégias avaliadas, a usinagem executada em 3+2 Eixos com o recurso CNC “CYCLE 832” apresentou movimentos mais contínuos e com menores oscilações de velocidades de avanço durante a usinagem.

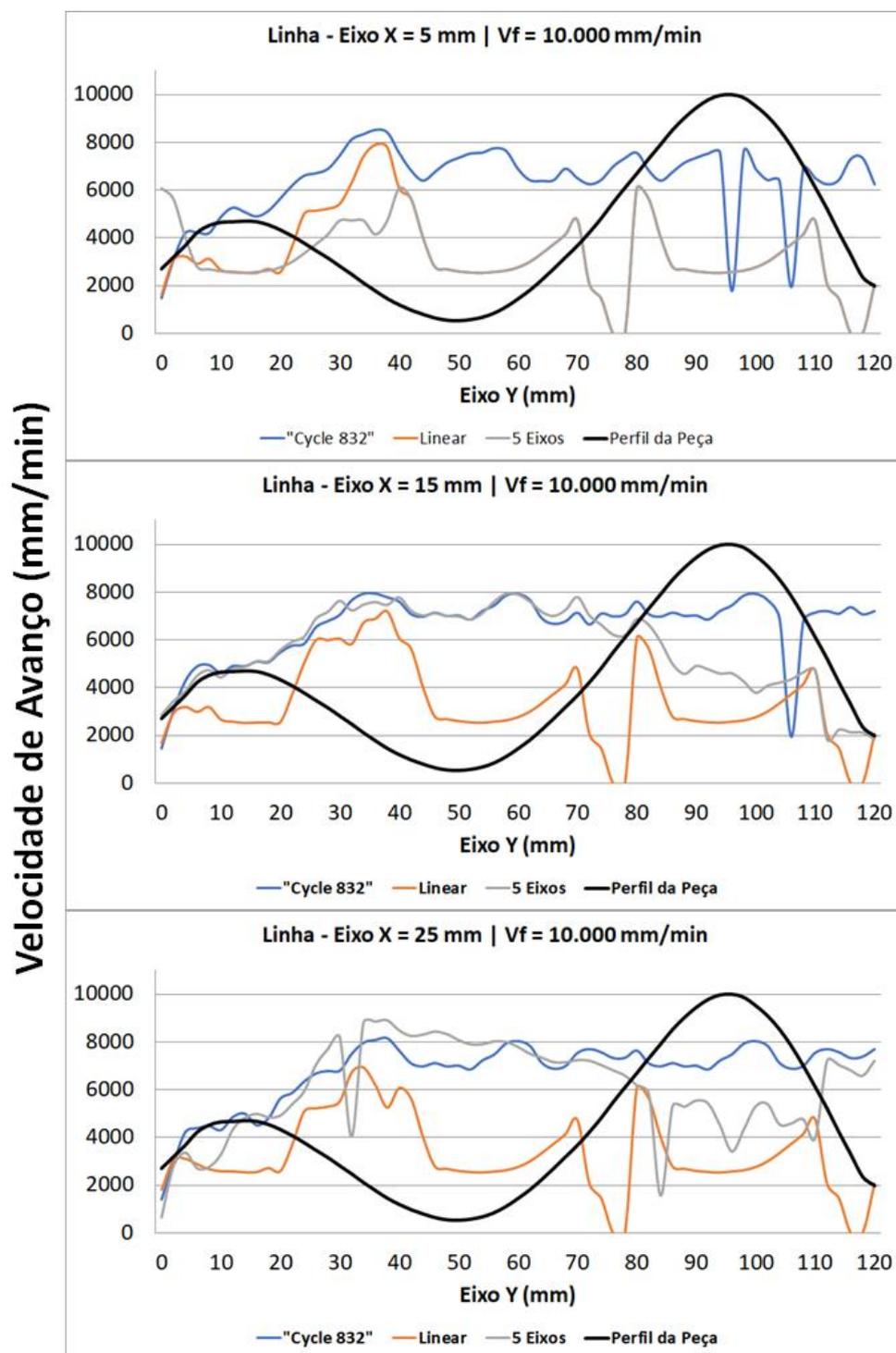


FIGURA 45 - COMPORTAMENTO DA VELOCIDADE DE AVANÇO - $V_F = 10.000$ MM/MIN
FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Além disso, observou-se dificuldade em atingir a velocidade de avanço programada para índices mais elevados, como neste caso $V_f = 10.000$ mm/min.

Com o objetivo de compreender plenamente o comportamento da velocidade de avanço, será apresentada nos próximos tópicos uma análise para cada tipo de trajetória de ferramenta utilizada nesse trabalho.

5.4.1. VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE AVANÇO – LINEAR (3+2 EIXOS)

Na interpolação linear, o movimento total da ferramenta é subdividido linearmente em segmentos discretos. Os resultados relacionados ao comportamento da velocidade de avanço para este método são apresentados na Figura 46.

É possível concluir que:

- para todas as velocidades de avanço programadas, há um padrão de comportamento. Observa-se que, em regiões descendentes, a velocidade de avanço eleva-se e em regiões ascendentes, o inverso ocorre, ou seja, há a desaceleração do movimento;
- em nenhuma das linhas medidas, foi atingida a velocidade de avanço máxima programada (10.000 mm/min) e, para velocidades de avanço inferiores, há menor oscilação no comportamento deste parâmetro;
- há grandes flutuações das velocidades de avanço em trechos específicos da peça como, por exemplo, entre os pontos 70 e 80 mm no eixo Y, os quais são pontos com movimentos íngremes.

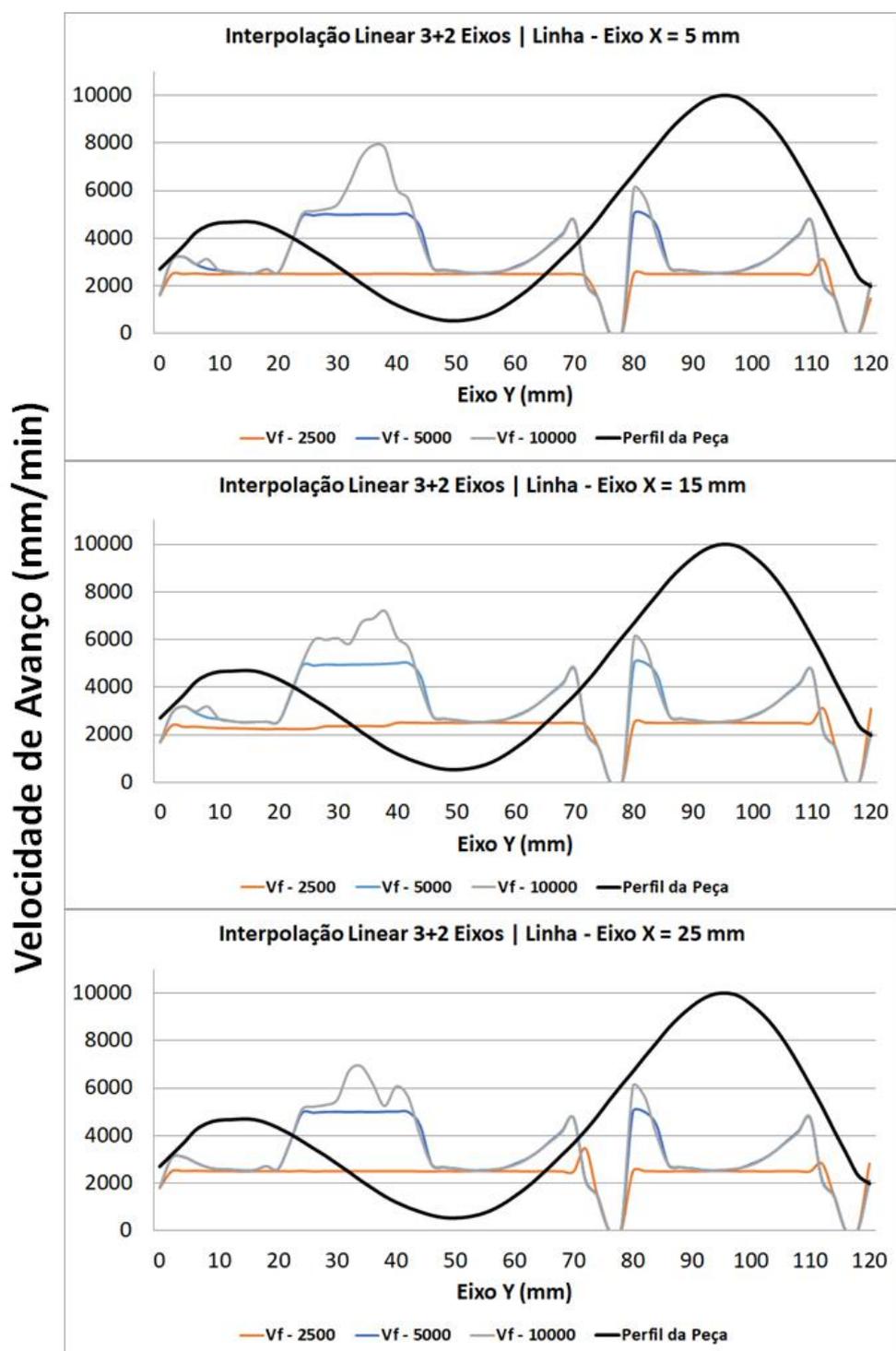


FIGURA 46 - COMPORTAMENTO DA VELOCIDADE DE AVANÇO – LINEAR (3+2 EIXOS)

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

5.4.2. VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE AVANÇO – LINEAR + “CYCLE 832” (3+2 EIXOS)

O recurso CNC “CYCLE 832” busca, basicamente, transformar uma interpolação linear para uma interpolação curvilínea, seguindo uma tolerância de conversão determinada.

Quando executado nas mesmas condições dos outros métodos de interpolação avaliados, este apresentou as características de variações de velocidade de avanço relacionadas a seguir e apresentadas na Figura 47:

- há menores oscilações das velocidades de avanço reais, em comparação com os métodos lineares (3+2 e Cinco Eixos);
- para altas velocidades de avanço programadas, este método superou o nível de velocidade máxima alcançada, em comparação com o método linear em 3+2 Eixos. Em números, este método superou a faixa de 8.000 mm/min, enquanto o método linear em 3+2 Eixos não obteve este patamar em nenhum dos testes realizados. Entretanto, em nenhum momento atingiu-se a velocidade programada de 10.000 mm/min;
- como nos outros métodos avaliados, também há pontos específicos com baixas velocidade de avanço com, por exemplo, entre os pontos 90 e 11 mm do eixo Y.

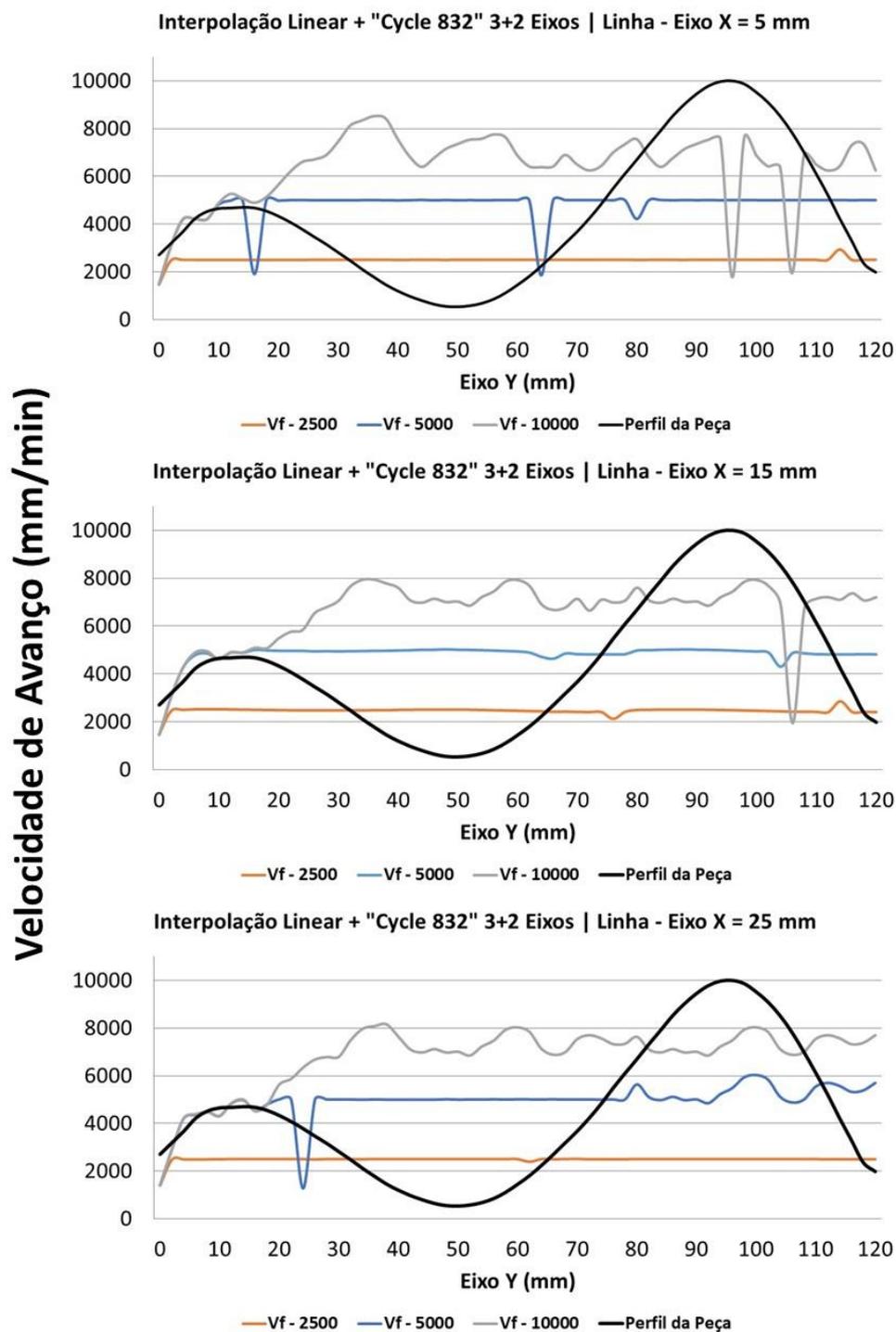


FIGURA 47 - COMPORTAMENTO DA VELOCIDADE DE AVANÇO – LINEAR + "CYCLE 832" -
3+2 EIXOS

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

5.4.3. VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE AVANÇO – LINEAR + “CYCLE 832” - CINCO EIXOS

Da mesma maneira que na usinagem em 3+2 Eixos, a interpolação Linear + “CYCLE 832” utilizado na usinagem cinco eixos, subdivide o movimento total da ferramenta em segmentos discretos os quais são convertidos posteriormente internamente pelo pós-processador da máquina. Entretanto, para esta estratégia de usinagem, os movimentos rotativos da base onde é fixada a peça, ocorrem simultaneamente com os movimentos de translação dos eixos XYZ.

Analisando a variação da velocidade de avanço (Figura 48) para esta estratégia de usinagem, observa-se que:

- as flutuações das velocidades de avanço ocorrem com maior incidência em comparação com os outros métodos avaliados;
- observa-se um pior desempenho em relação à manutenção da velocidade de avanço quando comparado ao mesmo método de interpolação, porém na usinagem em 3+2 Eixos;
- como nos outros métodos avaliados, em nenhum ponto das linhas medidas, atingiu-se a velocidade comparativa máxima programada (10.000 mm/min).

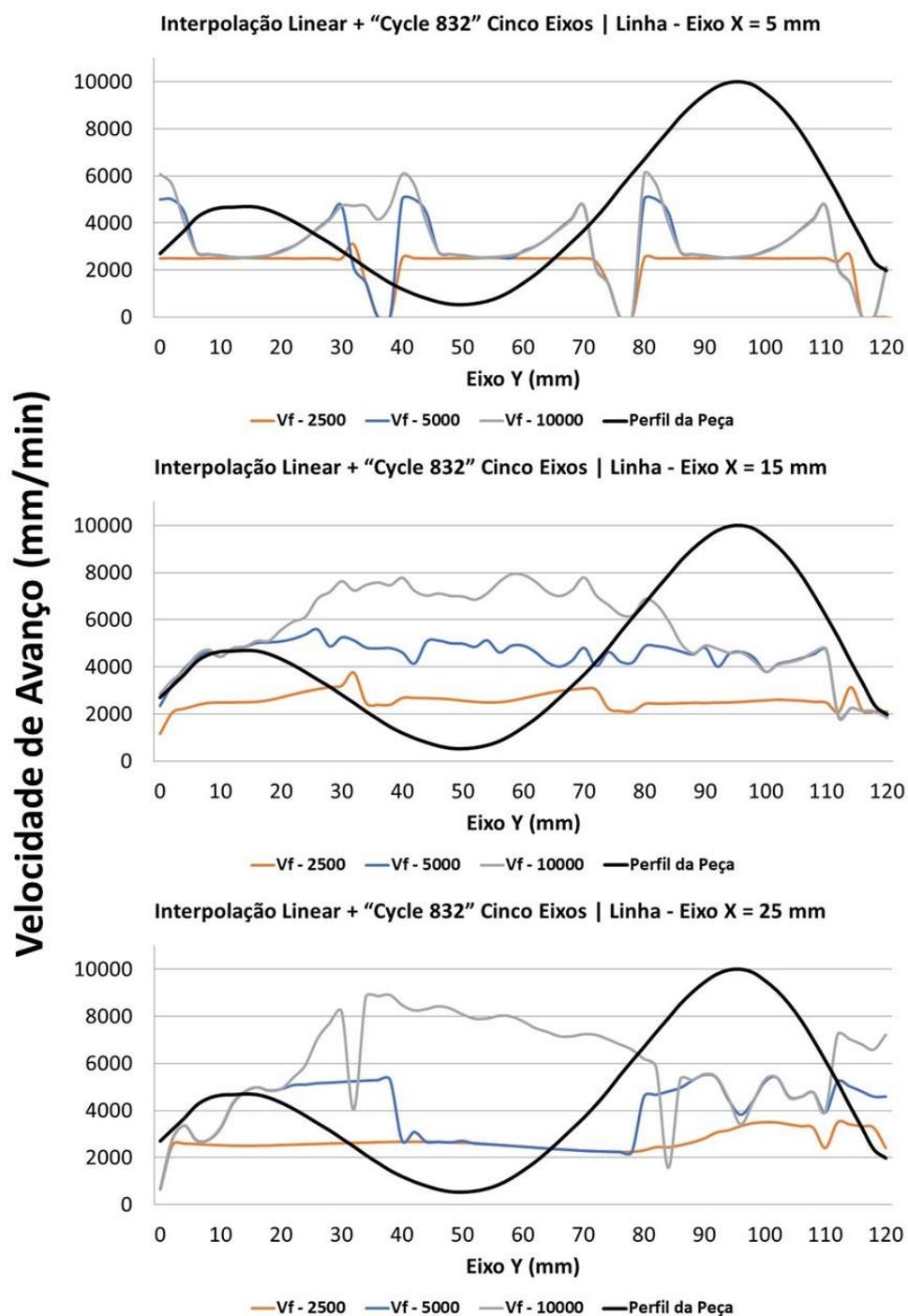


FIGURA 48 - COMPORTAMENTO DA VELOCIDADE DE AVANÇO – LINEAR + "CYCLE 832" - CINCO EIXOS

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

5.5. ANÁLISE DE CORRELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS AVALIADOS

A correlação entre os parâmetros avaliados possibilita a compreensão de alguns comportamentos consequentes das estratégias de usinagens adotadas.

Como pode ser observado na Figura 49, em determinadas regiões da peça, como por exemplo, entre os pontos 36 e 41 mm do Eixo Y, onde há a redução do tamanho do segmento resultante YZ, após uma elevação do mesmo, ocorrem variações consideráveis na velocidade de avanço (redução) e desvio geométrico (aumento). Estes comportamentos são mais evidentes para a interpolação Linear em 3+2 Eixos, uma vez que o desempenho dinâmico da máquina é afetada pela quantidade de pontos interpolados, os quais influenciam no tamanho do segmento de reta gerado.

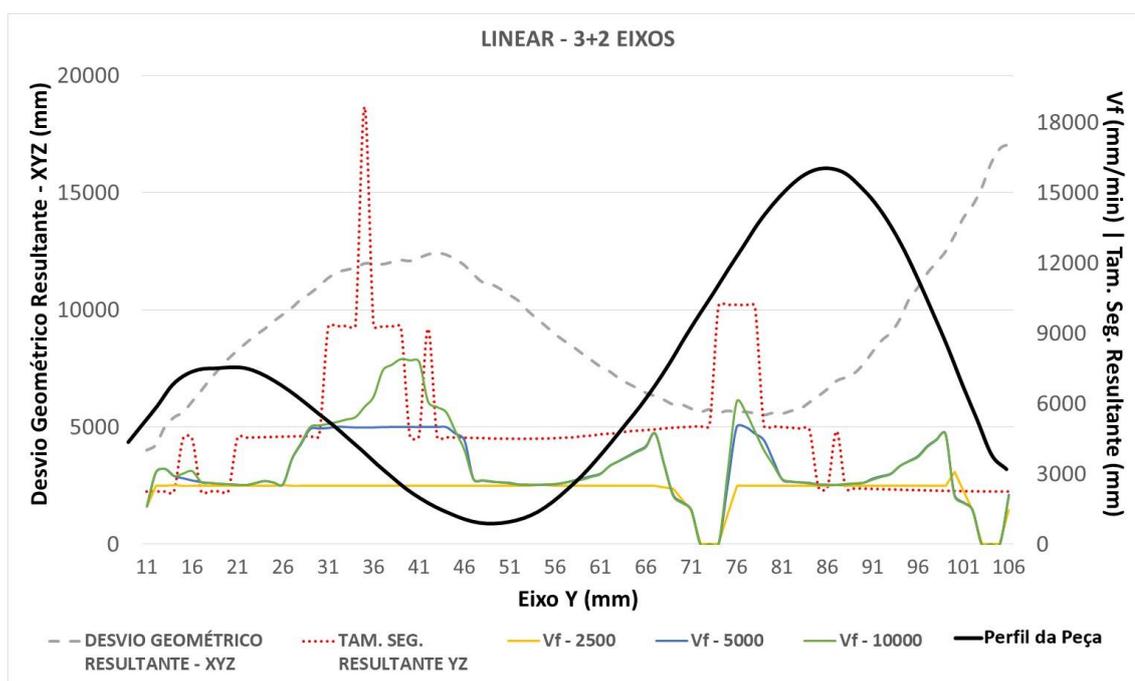


FIGURA 49 - CORRELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS AVALIADOS – LINEAR - 3+2 EIXOS

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Quando inserido o método de interpolação Linear + “CYCLE 832” (Figura 50) na usinagem em 3+2 Eixos, verificou-se uma menor variação da velocidade de avanço, devido aos recursos de conversão interna dos segmentos lineares em

polinômios Spline, os quais reduzem conseqüentemente a quantidade de pontos interpolados, permitindo um melhor desempenho dinâmico da máquina. Para esta análise, não foi possível observar variações no tamanho de segmento após a inserção do “CYCLE 832”, uma vez que este é executado internamente e não na etapa de geração do programa NC pelo *software* CAM.

Em relação à curva de desvio geométrico da peça estudada, para esta estratégia de usinagem, observou-se a inversão do sentido da curva em comparação com a interpolação Linear em 3+2 Eixos, sendo isto decorrente da variação da velocidade de avanço entre regiões ascendentes e descendentes da peça.

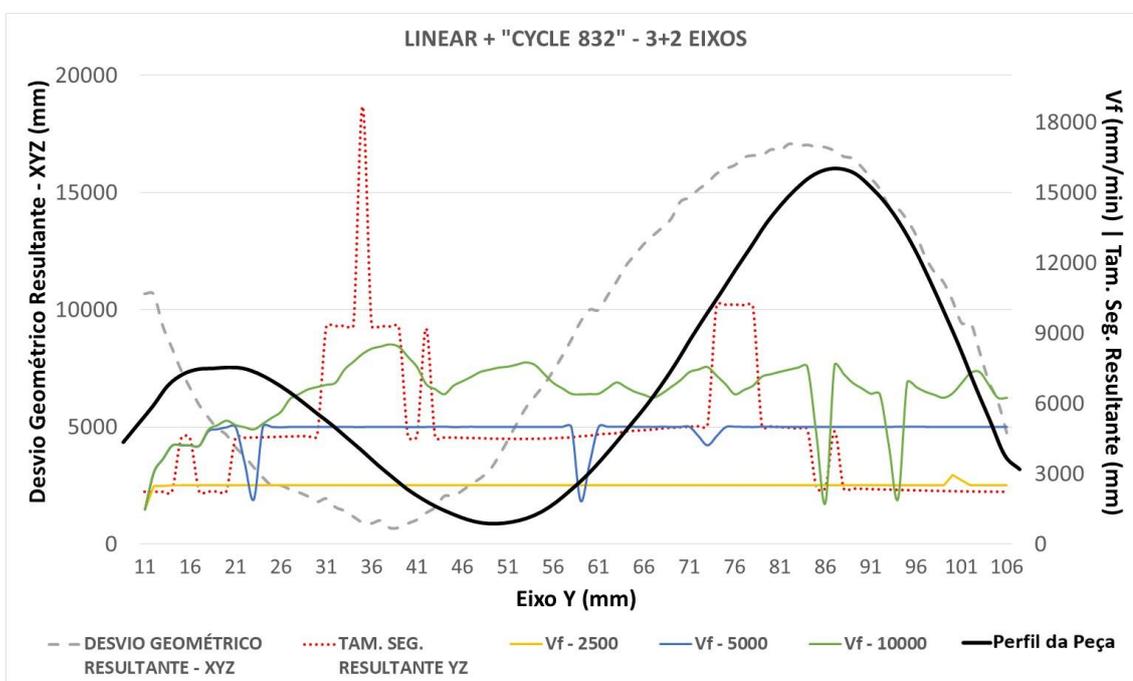


FIGURA 50 - CORRELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS AVALIADOS – LINEAR + “CYCLE 832” - 3+2 EIXOS

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Da mesma forma que a estratégia de usinagem em 3+2 Eixos com o método de interpolação Linear + “CYCLE 832”, na usinagem em Cinco Eixos com este mesmo método de interpolação, também ocorre a conversão interna dos segmentos lineares em polinômios Spline, não possibilitando verificar a real variação destes.

Os desvios geométricos resultantes da usinagem Cinco Eixos apresentaram menores flutuações em comparação a usinagem em 3+2 Eixos (Figura 51). Este resultado deve-se à inclinação dos eixos rotativos, que permitem manter a peça perpendicular à ferramenta, proporcionando uma remoção de material mais uniforme.

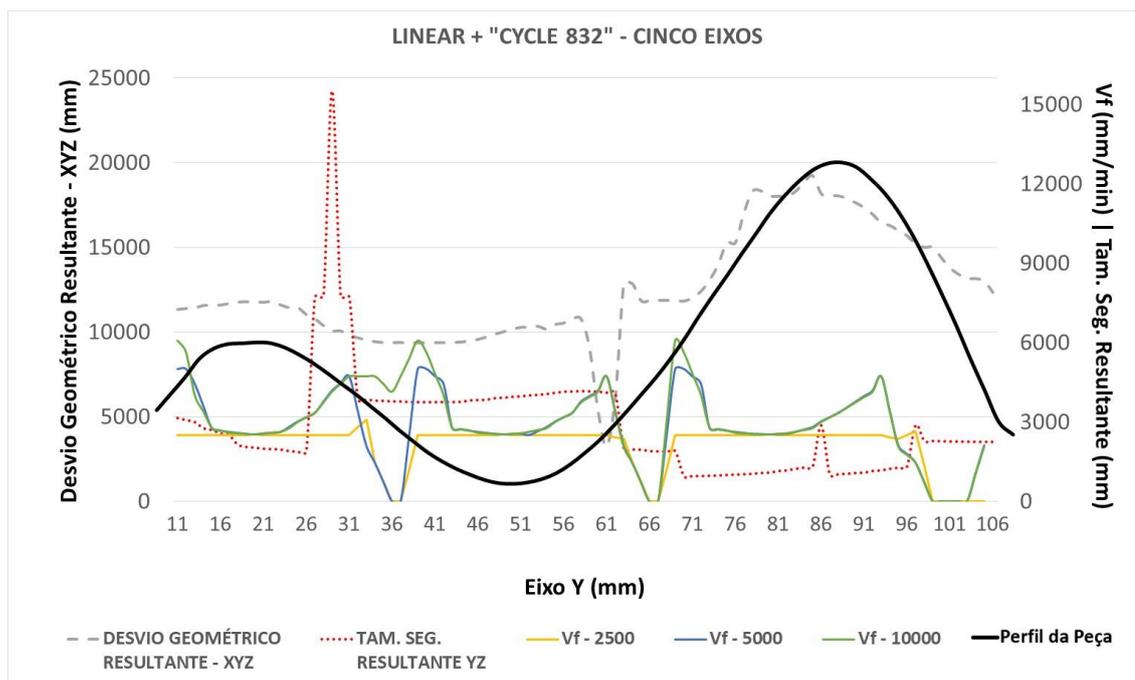


FIGURA 51 - CORRELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS AVALIADOS – LINEAR + “CYCLE 832” – CINCO EIXOS

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

De forma sintetizada, a Tabela 8 traz uma análise geral dos resultados comparativos obtidos entre as estratégias de usinagem avaliadas.

Como pode ser observado, quando avaliados tempos de processamento, os métodos de interpolação em 3+2 eixos apresentaram superioridade frente à usinagem em cinco eixos simultâneos. Entretanto, visando a qualidade e exatidão geométrica do produto, esta é obtida com maior aderência ao perfil projetado, pela usinagem em cinco eixos simultâneos.

TABELA 8 – RESULTADOS COMPARATIVOS ENTRE AS ESTRATÉGIAS DE USINAGEM

PARÂMETROS AVALIADOS	3+2 EIXOS		CINCO EIXOS
	LINEAR	CYCLE 832	CYCLE 832
TEMPO DE USINAGEM	Equivalente ao 3+2 – Linear + "CYCLE 832" para Vf = 2.500 mm/min	Entre 14 e 21% de redução de tempo para Vf = 5.000 e 10.000 mm/min	Maior tempo de usinagem: Entre 13 e 39% acima dos outros métodos
VELOCIDADE DE AVANÇO 2500 MM/MIN	Vf média real: 2.280 mm/min 8,7% abaixo da programada	Vf média real: 2.474 mm/min 1% abaixo da programada	Vf média real: 2.470 mm/min 1,1% abaixo da programada
VELOCIDADE DE AVANÇO 5000 MM/MIN	Vf média real: 3.129 mm/min 37,4% abaixo da programada	Vf média real: 4.823 mm/min 3,5% abaixo da programada	Vf média real: 3.722 mm/min 25,5% abaixo da programada
VELOCIDADE DE AVANÇO 10000 MM/MIN	Vf média real: 3.317 mm/min 66,8% abaixo da programada	Vf média real: 6.572 mm/min 34,2% abaixo da programada	Vf média real: 4.960 mm/min 50,3% abaixo da programada
EXATIDÃO GEOMÉTRICA	Relação com o movimento da ferramenta: Elevação da exatidão em movimentos descendentes e redução em ascendentes	Relação com o movimento da ferramenta: Redução da exatidão em movimentos descendentes e elevação em movimentos ascendentes	Baixa oscilação de desvio geométrico.
TAMANHO DO SEGMENTO	Diretamente proporcional à variação da velocidade de avanço	Transformação em polinômios Spline melhora o desempenho dinâmico da máquina	Transformação em polinômios Spline melhora o desempenho dinâmico da máquina, influenciado pelos movimentos rotacionais da base

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O conhecimento sobre as influências de aplicação de diferentes estratégias de usinagem proporciona possíveis ganhos de produtividade, uma vez que estes impactam diretamente no tempo de manufatura e qualidade do produto, conforme apresentado neste trabalho.

A revisão da literatura evidenciou a inserção da usinagem em três e cinco eixos no processo de manufatura de superfícies complexas, assim como os diferentes métodos de interpolação da trajetória da ferramenta com o auxílio da cadeia CAD/CAM/CNC.

Os resultados apresentaram a superioridade em relação ao tempo do processo de usinagem em 3+2 Eixos quando comparado com a usinagem Cinco Eixos, sendo este justificado pelo maior número de dados presentes no programa NC para a usinagem Cinco Eixos. Esse maior número de dados é decorrente da movimentação simultânea dos eixos rotativos e lineares, os quais ocorrem de forma individualizada para a usinagem em 3+2 Eixos.

Em um segundo momento, quando comparadas apenas as estratégias utilizadas em 3+2 Eixos, foi possível evidenciar os benefícios da utilização de comandos numéricos de otimização da trajetória da ferramenta como, neste caso, o “CYCLE 832”. O melhor desempenho em relação a tempo de usinagem é decorrente da conversão realizada pelo “CYCLE 832” dos segmentos lineares por polinômios Spline, os quais geram como resultado menor número de pontos entre os segmentos e, conseqüentemente, diminuem o tempo de processamento dos dados pela máquina.

Este melhor desempenho do “CYCLE 832” é mais evidente com a elevação da velocidade de avanço como, para este estudo, 5.000 e 10.000 mm/min. Para baixas velocidades de avanço (2.500 mm/min), há menor exigência do desempenho dinâmico da máquina, sendo esta capaz de processar os dados de forma a manter em grande parte do percurso a velocidade de avanço programada.

Independente da estratégia utilizada, verificou-se a influência da geometria da peça na variação da velocidade de avanço real. Em determinadas regiões da superfícies complexa, independente da velocidade de avanço programada, ocorreram o aumento e diminuição da velocidade de avanço.

A exatidão geométrica, quando comparadas as estratégias avaliadas, a usinagem Cinco Eixos apresentou a menor oscilação de desvio geométrico entre a peça projetada e a peça real usinada. Porém, apesar da menor oscilação de desvio geométrico resultante nesta estratégia, houve a predominância de sobremetal residual no corpo de prova.

Os maiores desvios geométricos foram evidenciados com a utilização da estratégia de usinagem Linear + “CYCLE 832” em 3+2 Eixos.

Ainda nesta análise de exatidão geométrica, considerando um sistema de referência comum entre o modelo CAD e a geometria usinada evidenciou-se que:

- nas regiões em que a ferramenta se desloca no sentido descendente, a geometria do corpo de prova está inferior ao modelo CAD, ou seja, há uma violação geométrica;
- nas regiões em que a ferramenta se desloca no sentido ascendente, a geometria do corpo de prova está superior ao modelo CAD, ou seja, há um sobremetal residual;
- os métodos de interpolação executados em 3+2 Eixos apresentaram desvios geométricos resultantes inversos para movimentos ascendentes e descendentes da curva Y da peça.

O tamanho do segmento também demonstrou influenciar na variação da velocidade de avanço e, conseqüentemente, no tempo de usinagem. Este resultado foi identificado na análise do método de interpolação Linear 3+2 Eixos, uma vez que, onde houveram reduções no tamanho do segmento de reta, também ocorreu a diminuição da velocidade de avanço real e, com o aumento dos segmentos, também houve o aumento da velocidade de avanço real.

Para as outras estratégias de usinagem adotadas, ocorre a transformação dos segmentos de retas gerados pela interpolação linear em polinômios Splines, não permitindo assim, analisar o real tamanho do segmento entre os pontos interpolados.

Sendo assim, através da análise dos pontos aqui destacados, conclui-se que, quando comparadas as estratégias de usinagem nos processos em 3+2 e Cinco Eixos, evidencia-se a superioridade em relação ao tempo de manufatura para este primeiro. Por outro lado, a estratégia de usinagem em Cinco Eixos mostrou menores oscilações em relação à exatidão geométrica.

Analisando apenas os métodos de interpolação utilizados (Linear e Linear + “CYCLE 832”) nas mesmas condições de usinagem (3+2 Eixos), verificou-se a superioridade do método Linear em obter menores desvios geométricos. Entretanto, para médias (5.000 mm/min) e altas (10.000 mm/min) velocidades de avanço, o método Linear + “CYCLE 832” obteve um melhor desempenho dinâmico e, conseqüentemente, menor tempo para a usinagem.

Com essas conclusões, espera-se que este estudo contribua para o desenvolvimento de tecnologias para o processos de manufatura de superfícies complexas em centros de usinagem que trabalham com cinco eixos.

6.1. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Devido às limitações para as diferentes estratégias de usinagem utilizadas, sugere-se para trabalhos futuros:

- O desenvolvimento de trajetórias de ferramentas com interpolações complexas para a usinagem em cinco eixos simultâneos como, por exemplo, a interpolação Spline;
- Estudo relacionado ao sincronismo dos movimentos lineares e circulares da máquina-ferramenta, buscando a otimização da exatidão geométrica do produto fabricado;

- Estudo da aceleração e desaceleração da velocidade de avanço, com maior ênfase para altas taxas de velocidades de avanços programadas.

7. REFERÊNCIAS

ALTAN, T.; LILLY, B. W.; KRUTH, J. P.; KÖNIG, W.; TÖNSHOFF, H. K.; VAN LUTTERVELT, C. A.; & KHAIRY, A. B. Advanced techniques for die and mold manufacturing. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v. 42, n. 2, p. 707-716, 1993.

ALTINTAS, Y.; ERKORKMAZ, K. Feedrate optimization for spline interpolation in high speed machine tools. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v. 52, n. 1, p. 297-302, 2003.

ANOTAIPAIBOON, W.; MAKHANOV, S. S. Curvilinear space-filling curves for five-axis machining. **Computer-Aided Design**, v. 40, n. 3, p. 350-367, 2008.

ARKIN, E. M.; FEKETE, S. P.; MITCHELL, J. SB. Approximation algorithms for lawn mowing and milling. **Computational Geometry**, v. 17, n. 1-2, p. 25-50, 2000.

ARNONE, M. **High performance machining**. Cincinnati, USA: Hanser Gardner Publications, 1998.

BANG, Y.B.; LEE, K.M.; OH, S. 5-axis micro milling machine for machining micro parts. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 25, n. 9-10, p. 888-894, 2005.

BEUDAERT, X.; LAVERNHE, S.; TOURNIER, C. 5-axis local corner rounding of linear tool path discontinuities. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 73, p. 9-16, 2013.

BEUDAERT, X.; LAVERNHE, S.; TOURNIER, C. Direct trajectory interpolation on the surface using an open CNC. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 75, n. 1-4, p. 535-546, 2014.

BHUIYA, M. S. H.; TUTUNEA-FATAN, O. R. 5D Cubic B-Spline Interpolated Compensation of Geometry-Based Errors in Five-Axis Surface Machining. **Computer-Aided Design and Applications**, v. 13, n. 3, p. 369-378, 2016.

CAMARGO, L. G.; PODDA, L.; SOUZA, A. F. de. Estudo dos métodos de trabalho em sistemas CAM para a geração de programas CNC com foco no pós-processamento. **Ferramental, Joinville**, v. 1, n. 55, p.19-25, set. 2014.

CAMPBELL, R. J.; FLYNN, P. J. A survey of free-form object representation and recognition techniques. **Computer Vision and Image Understanding**, v. 81, n. 2, p. 166-210, 2001.

CAN, A.; ÜNÜVAR, A. Five-axis tool path generation for 3D curves created by projection on B-spline surfaces. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 49, n. 9-12, p. 1047-1057, 2010.

CANDAL, M. V.; MORALES, R. A. Design of plastic pieces and their molds using CAD/CAE tools. I. **Computer Applications in Engineering Education**, v. 13, n. 4, p. 233-239, 2005.

CAO, S. K.; SONG, L.; SONG, K. F.; Lv, J.; Chen, X. S. Free-Form Surface Five-Axis Machining Tool Path and Tool Posture Simultaneous Multi-Objective Optimization Theory Research. In: **Key Engineering Materials**. Trans Tech Publications, p. 900-905, 2011.

CARVALHO, L. O. Teorema fundamental das curvas e aplicações. Maceió: Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Computação, 2006. 26f.

YEN-HUNG, C.; YUAN-SHIN, L.; FANG, S. Optimal cutter selection and machining plane determination for process planning and NC machining of complex surfaces. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 17, n. 5, p. 371, 1998.

CHEN, Z. C.; DONG, Z.; VICKERS, G. W. Automated surface subdivision and tool path generation for 31212-axis CNC machining of sculptured parts. **Computers in Industry**, v. 50, n. 3, p. 319-331, 2003.

CHENG, M.-Y.; TSAI, M.-C.; KUO, J.-C. Real-time NURBS command generators for CNC servo controllers. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 42, n. 7, p. 801-813, 2002.

CHOI, B. K.; JERARD, R.B. **Sculptured surface machining: theory and applications**. 1998.

CHU, C. H.; CHEN, J. T. Five-Axis flank machining of ruled surfaces with developable surface approximation. In: **null**. IEEE, p. 238-246, 2005.

CHU, C. H.; WU, P. H.; LEI, W. T. Tool path planning for 5-axis flank milling of ruled surfaces considering CNC linear interpolation. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 23, n. 3, p. 471-480, 2012.

CHU, W. S.; KIM, C. S.; LEE, H. T.; CHOI, J. O.; PARK, J. I.; SONG, J. H.; AHN, S. H. Hybrid manufacturing in micro/nano scale: A Review. **International journal of precision engineering and manufacturing-green technology**, v. 1, n. 1, p. 75-92, 2014.

DE SANTIAGO-PEREZ, J. J.; OSORNIO-RIOS, R. A.; ROMERO-TRONCOSO, R. J.; MORALES-VELAZQUEZ, L. FPGA-based hardware CNC interpolator of Bezier, splines, B-splines and NURBS curves for industrial applications. **Computers & Industrial Engineering**, v. 66, n. 4, p. 925-932, 2013.

DING, S.; MANNAN, M.; POO, A.; YANG, D.; HAN, Z. "Adaptive iso-planar tool path generation for machining of free-form surfaces. **Computer-Aided Design**, vol. 35, pp. 141-153, 2003.

DONGMING, G.; FEI, R.; YUWEN, S. An approach to modeling cutting forces in five-axis ball-end milling of curved geometries based on tool motion analysis. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 132, n. 4, p. 041004, 2010.

ERKORKMAZ, K.; ALTINTAS, Y. Quintic spline interpolation with minimal feed fluctuation. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 127, n. 2, p. 339-349, 2005.

FAN J.; BALL, A.; Flat end cutter orientation on a quadric in five axis. **Computer Aided Design** 53: 126-138, 2014.

FAROUKI, R. T.; LI, S. Optimal tool orientation control for 5-axis CNC milling with ball-end cutters. **Computer Aided Geometric Design**, v. 30, n. 2, p. 226-239, 2013.

FENG, H. Y.; LI, H. Constant scallop-height tool path generation for three-axis sculptured surface machining. **Computer-Aided Design**, v. 34, n. 9, p. 647-654, 2002.

FERNANDES, E. M. G. P. Computação numérica. 2 ed. **Minho: Universidade**, 414 f. 1997.

FLEISIG, R.V.; SPENCE, A.D. A constant feed and reduced angular acceleration interpolation algorithm for multi axis machining. **Computer Aided Design**, v. 33, p. 1-15, 2001.

GRANDGUILLAUME, L.; LAVERNHE, S.; QUINSAT, Y.; TOURNIER, C. Mold manufacturing optimization: A global approach of milling and polishing processes. **Procedia CIRP**, v. 31, p. 13-18, 2015.

GROOVER, M. P. **Fundamentals of modern manufacturing: materials processes, and systems**. John Wiley & Sons, 2007.

HAN, Z.; YANG, D. CH. Iso-photo based tool-path generation for machining free-form surfaces. **Journal of manufacturing science and engineering**, v. 121, n. 4, p. 656-664, 1999.

HANGOUE, J.-F. Computation of the Hausdorff distance between plane vector polylines. In: **AUTOCARTO-CONFERENCE-**. p. 1-10. 1995.

HE, W.; LEI, M.; BIN, H. Iso-parametric CNC tool path optimization based on adaptive grid generation. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 41, n. 5-6, p. 538-548, 2009.

HELLENO, A. L.; SCHÜTZER, K. Investigation of tool path interpolation on the manufacturing of die and molds with HSC technology. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 179, n. 1-3, p. 178-184, 2006.

HENG, M.; ERKORKMAZ, K. Design of a NURBS interpolator with minimal feed fluctuation and continuous feed modulation capability. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 50, n. 3, p. 281-293, 2010.

HU, P.; CHEN, L.; WANG, J.; TANG, K. Boundary-conformed tool path generation based on global reparametrization. In: **Computer-Aided Design and Computer Graphics (CAD/Graphics), 2015 14th International Conference on**. IEEE, p. 165-172. 2015.

HU, Pengcheng; CHEN, Lufeng; TANG, Kai. Efficiency-optimal iso-planar tool path generation for five-axis finishing machining of freeform surfaces. **Computer-Aided Design**, v. 83, p. 33-50, 2017.

HUO, D.; CHENG, K.; WARDLE, F. Design of a five-axis ultra-precision micro-milling machine—UltraMill. Part 1: holistic design approach, design considerations and specifications. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 47, n. 9-12, p. 867-877, 2010.

INDÚSTRIAS ROMI S.A. **Centros de usinagem vertical - 5 eixos / 5 faces - Linha ROMI DCM 620.** Disponível em: http://www.romi.com/wpcontent/uploads/2016/02/cat_romi_dcm_620_po_ak-01_baixa.pdf - Acesso em: 07 nov. 2018.

JEE, S.; KOO, T. Tool-path generation for NURBS surface machining. In: **American Control Conference, 2003. Proceedings of the 2003**. IEEE, p. 2614-2619. 2003.

JENSEN, C. G.; RED, W. E.; PI, J. Tool selection for five-axis curvature matched machining. **Computer-Aided Design**, v. 34, n. 3, p. 251-266, 2002.

JIANG, X.; SCOTT, P.; WHITEHOUSE, D. Freeform surface characterisation-a fresh strategy. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v. 56, n. 1, p. 553-556, 2007.

KENDRICK, Blake A.; DHOKIA, Vimal; NEWMAN, Stephen T. Strategies to realize decentralized manufacture through hybrid manufacturing platforms. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 43, p. 68-78, 2015.

KIM, B. H.; CHOI, B. K. Machining efficiency comparison direction-parallel tool path with contour-parallel tool path. **Computer-Aided Design**, v. 34, n. 2, p. 89-95, 2002.

LARTIGUE, C.; TOURNIER, C.; RITOU, M.; DUMIR, D. High-performance NC for HSM by means of polynomial trajectories. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v. 53, n. 1, p. 317-320, 2004.

LANGERON, J. M.; DUC, E.; LARTIGUE, C.; BOURDET, P. A new format for 5-axis tool path computation, using Bspline curves. **Computer-Aided Design**, v. 36, n. 12, p. 1219-1229, 2004.

LASEMI, A.; XUE, D.; GU, P. Recent development in CNC machining of freeform surfaces: a state-of-the-art review. **Computer-Aided Design**, v. 42, n. 7, p. 641-654, 2010.

LEE, Y.-S. Mathematical modelling using different endmills and tool placement problems for 4-and 5-axis NC complex surface machining. **International Journal of Production Research**, v. 36, n. 3, p. 785-814, 1998.

LEE, Y. S.; CHANG, T. C. Automatic cutter selection for 5-axis sculptured surface machining. **International Journal of Production Research**, v. 34, n. 4, p. 977-998, 1996.

LEI, W. T.; SUNG, M. P.; LIN, L. Y.; HUANG, J.J. Fast real-time NURBS path interpolation for CNC machine tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, n. 10, p. 1530-1541, 2007.

LI, C.; ZHANG, B.; WANG, X.; LIU, Q.; LIU, H. Triple parametric tool path interpolation for five-axis machining with three-dimensional cutter compensation. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 10, n. 9, p. 1687814018798229, 2018.

LI, L. L.; ZHANG, Y. F. Cutter selection for 5-axis milling of sculptured surfaces based on accessibility analysis. **International Journal of Production Research**, v. 44, n. 16, p. 3303-3323, 2006.

LI, S. X.; JERARD, R. B. 5-axis machining of sculptured surfaces with a flat-end cutter. **Computer-Aided Design**, v. 26, n. 3, p. 165-178, 1994.

LIVESU, M.; ELLERO, S.; MARTÍNEZ, J.; LEFEBVRE, S.; ATTENE, M. From 3D models to 3D prints: an overview of the processing pipeline. In: **Computer Graphics Forum**. p. 537-564, 2017.

MA, J. W.; SONG, D. N.; JIA, Z. Y.; HU, G. Q.; SU, W. W.; SI, L. K. Tool-path planning with constraint of cutting force fluctuation for curved surface machining. **Precision Engineering**, v. 51, p. 614-624, 2018.

MACDONALD, E.; SALAS, R.; ESPALIN, D.; PEREZ, M.; AGUILERA, E.; MUSE, D.; WICKER, R. B. 3D printing for the rapid prototyping of structural electronics. **IEEE access**, v. 2, p. 234-242, 2014.

MCMAHON, C.; BROWNE, J. J. **CADCAM: From principles to practice**. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1993.

MANOGHARAN, G.; WYSK, R. A.; HARRYSSON, O. LA. Additive manufacturing–integrated hybrid manufacturing and subtractive processes: economic model and analysis. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 29, n. 5, p. 473-488, 2016.

MARSHALL, S.; GRIFFITHS, J. G. A new cutter-path topology for milling machines. **Computer-Aided Design**, v. 26, n. 3, p. 204-214, 1994.

MEDEIROS, M. A.; DA SILVA, M. B.; MACHADO, Á. R.; BARBOSA, C. A. Estudo da usinabilidade do aço VP 100 com diferentes teores de titânio a partir da análise da influência de aspectos microestruturais do material no desgaste de flanco da ferramenta de corte. **7º congresso brasileiro de engenharia de fabricação (7º COBEF)**, 2013.

MEHRAD, V.; XUE, D.; GU, P. Prediction of surface reconstruction uncertainties for freeform surface inspection. **Measurement**, v. 46, n. 8, p. 2682-2694, 2013.

MIN, C.; GAO, X. S. Iso-scallop tool-path generation of five-axis computer numerically controlled machining for cyclide splines. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 229, n. 7, p. 1144-1156, 2015.

PALUSZNY, M.; PRAUTZSCH, H.; BOEHM, W. Bezier and B-spline techniques. **New York: Springer**, 2002.

PESSOLES, X; TOURNIER, C. Automatic polishing process of plastic injection molds on a 5-axis milling center. **Journal of materials processing technology**, v. 209, n. 7, p. 3665-3673, 2009.

PI, J.; RED, E.; JENSEN, G.. Grind-free tool path generation for five-axis surface machining. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, v. 11, n. 4, p. 337-350, 1998.

PRODANOV, C. C.; DE FREITAS, E. C.. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico-2ª Edição**. Editora Feevale, 2013.

RAO, A.; SARMA, R.. On local gouging in five-axis sculptured surface machining using flat-end tools. **Computer-Aided Design**, v. 32, n. 7, p. 409-420, 2000.

RAO, N.; ISMAIL, F.; BEDI, S. Integrated tool positioning and tool path planning for five-axis machining of sculptured surfaces. **International Journal of Production Research**, v. 38, n. 12, p. 2709-2724, 2000.

REDONNET, J. M.; DJEBALI, S.; SEGONDS, S.; SENATORE, J.; & RUBIO, W. Study of the effective cutter radius for end milling of free-form surfaces using a torus milling cutter. **Computer-Aided Design**, v. 45, n. 6, p. 951-962, 2013.

ROGERS, D. F. **An introduction to NURBS: with historical perspective**. Elsevier, 2000.

ROGERS, D. F.; ADAMS, J. A. **Mathematical elements for computer graphics**. 2nd Ed. **Singapore: Mc Graw-Hill**, 661p. 1990.

ROTH, D.; Bedi, S.; Ismail, F.; Mann, S. Surface swept by a toroidal cutter during 5-axis machining. **Computer-Aided Design**, v. 33, n. 1, p. 57-63, 2001.

SCHÜTZER, K.; SOUZA, A. F. Conceção 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. 2000.

SCHÜTZER, K.; STROH, C.; SCHULZ, H. C-Space based approach for the calculation of toolpaths for freeform surfaces in B-Spline description. **CIRP annals**, v. 59, n. 1, p. 421-424, 2010.

SENCER, B.; ISHIZAKI, K.; SHAMOTO, E. A curvature optimal sharp corner smoothing algorithm for high-speed feed motion generation of NC systems along linear tool paths. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 76, n. 9-12, p. 1977-1992, 2015.

SHE, C. H.; TSAI, Y. H. Tool Path Planning and NC Generation of Tilted Plane Machining Features for Five-axis Machining. In: **Materials Science Forum**. Trans Tech Publications, p. 309-313. 2012.

SHI, J.; BI, Q.; ZHU, L.; WANG, Y. Corner rounding of linear five-axis tool path by dual PH curves blending. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 88, p. 223-236, 2015.

SANDVIK, C., Suppement: to Turning tools and Rotating tools catalogues (including 15.1 and 15.2) - **New cutting tools - ordering information (2016.1)**. 2016

SIEMENS. SINUMERIK 840D sl / 828D, Preparação do trabalho. **Manual de Programação**. 10 / 2015.

SOUZA, A. F.; COELHO, R. T. O caminho para atingir o estado-da-arte é o bom entendimento. **Máquinas e Metais**, São Paulo, v.40, n.455, p. 82-97. 2003.

SOUZA, A. F. D.; COELHO, R. T. Experimental investigation of feed rate limitations on high speed milling aimed at industrial applications. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 32, n. 1112, p.1104-1114, 2006.

SOUZA, A. F.; MACHADO, A.; BECKERT, S. F.; DINIZ, A. E. Evaluating the roughness according to the tool path strategy when milling free form surfaces for mold application. **Procedia CIRP**, v. 14, p. 188-193, 2014.

SOUZA, A. F.; ULBRICH, C. B. L. Engenharia integrada por computador e sistemas CAD/CAM/CNC, princípios e aplicações, 2. ed., **Artliber**, São Paulo 2013.

TOENSMEIER, P. Five-axis machining is a key requirement for high-precision molds. **Moldmaking Technology**, 2006.

TSUTSUMI, M.; SAITO, A. Identification and compensation of systematic deviations particular to 5-axis machining centers. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, n. 8, p. 771-780, 2003.

UHLMANN, E.; ABACKERLI, A. J.; SCHÜTZER, K.; LEPIKSON, H. A.; HELLENO, A. L.; PAPA, M. C. O.; MEWIS, J. Simulation and analysis of error

impact on freeform surface milling. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 70, n. 1-4, p. 607-620, 2014.

VICKERS, G. W.; QUAN, K. W. Ball-mills versus end-mills for curved surface machining. **Journal of Engineering for Industry**, v. 111, n. 1, p. 22-26, 1989.

WANG, F.-C.; YANG, D. C. H. Nearly arc-length parameterized quintic-spline interpolation for precision machining. **Computer-Aided Design**, v. 25, n. 5, p. 281-288, 1993.

WANG, N.; TANG, K. Automatic generation of gouge-free and angular-velocity-compliant five-axis toolpath. **Computer-Aided Design**, v. 39, n. 10, p. 841-852, 2007.

WANG, Q.; LI, J.; ZHOU, R. R. Graphics-assisted approach to rapid collision detection for multi-axis machining. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 30, n. 9-10, p. 853-863, 2006.

WANG, Y. J.; DONG, Z.; VICKERS, G. W. A 3D curvature gouge detection and elimination method for 5-axis CNC milling of curved surfaces. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 33, n. 3-4, p. 368-378, 2007.

WUJIA, Y.; FANGHUA, N. Research on tool path planning method for five-axis NC machining based on parallel computation. In: **Automation and Logistics, 2008. ICAL 2008. IEEE International Conference on**. IEEE, 2008. p. 1887-1890.

XU, J.; ZHANG, S.; TAN, J.; LIU, X. "Non-redundant tool trajectory generation for surface finish machining based on geodesic curvature matching," **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 62, pp. 1169-1178, 2012.

YAN, Y.; ZHANG, L.; ZHANG, K.. Corner smoothing transition algorithm for five-axis linear tool path. **Procedia CIRP**, v. 56, p. 604-609, 2016.

YAU, H. T.; LIN, M. T.; TSAI, M. S. Real-time NURBS interpolation using FPGA for high speed motion control. **Computer-Aided Design**, v. 38, p. 1123-1133, 2006.

YONGZHANG, W.; XIONGBO, M.; LIANGJI, C.; ZHENYU, H. Realization methodology of a 5-axis Spline Interpolator in an open CNC system. **Chinese Journal of Aeronautics**, 20, 362-369, 2007.

ZEID, I. **CAD/CAM Theory and Practice**. Series in Mechanical Engineering. McGraw-Hill, Inc., New York, 1991.

ZHU, Y.; CHEN Z.; NING, T.; XU, R. Tool orientation optimization for 3+2-axis CNC machining of sculptured surface, **Computer-Aided Design** 77, p. 60-72, 2016.

APÊNDICE A - PROGRAMA DE MONITORAMENTO DA VELOCIDADE DE AVANÇO

```

ID=1 EVERY $AA_IW[Y]>=0 DO $R09=$VA_VACTM[Y] $R10=$VA_VACTM[Z]
$R11=$AA_IW[Y] $R12=$AA_IW[Z]
ID=2 EVERY $AA_IW[Y]>=2 DO $R13=$VA_VACTM[Y] $R14=$VA_VACTM[Z]
$R15=$AA_IW[Y] $R16=$AA_IW[Z]
ID=3 EVERY $AA_IW[Y]>=4 DO $R17=$VA_VACTM[Y] $R18=$VA_VACTM[Z]
$R19=$AA_IW[Y] $R20=$AA_IW[Z]
ID=4 EVERY $AA_IW[Y]>=6 DO $R21=$VA_VACTM[Y] $R22=$VA_VACTM[Z]
$R23=$AA_IW[Y] $R24=$AA_IW[Z]
ID=5 EVERY $AA_IW[Y]>=8 DO $R25=$VA_VACTM[Y] $R26=$VA_VACTM[Z]
$R27=$AA_IW[Y] $R28=$AA_IW[Z]
ID=6     EVERY     $AA_IW[Y]>=10     DO     $R29=$VA_VACTM[Y]
$R30=$VA_VACTM[Z] $R31=$AA_IW[Y] $R32=$AA_IW[Z]
ID=7     EVERY     $AA_IW[Y]>=12     DO     $R33=$VA_VACTM[Y]
$R34=$VA_VACTM[Z] $R35=$AA_IW[Y] $R36=$AA_IW[Z]
ID=8     EVERY     $AA_IW[Y]>=14     DO     $R37=$VA_VACTM[Y]
$R38=$VA_VACTM[Z] $R39=$AA_IW[Y] $R40=$AA_IW[Z]
ID=9     EVERY     $AA_IW[Y]>=16     DO     $R41=$VA_VACTM[Y]
$R42=$VA_VACTM[Z] $R43=$AA_IW[Y] $R44=$AA_IW[Z]
ID=10    EVERY     $AA_IW[Y]>=18     DO     $R45=$VA_VACTM[Y]
$R46=$VA_VACTM[Z] $R47=$AA_IW[Y] $R48=$AA_IW[Z]
ID=11    EVERY     $AA_IW[Y]>=20     DO     $R49=$VA_VACTM[Y]
$R50=$VA_VACTM[Z] $R51=$AA_IW[Y] $R52=$AA_IW[Z]
ID=12    EVERY     $AA_IW[Y]>=22     DO     $R53=$VA_VACTM[Y]
$R54=$VA_VACTM[Z] $R55=$AA_IW[Y] $R56=$AA_IW[Z]
ID=13    EVERY     $AA_IW[Y]>=24     DO     $R57=$VA_VACTM[Y]
$R58=$VA_VACTM[Z] $R59=$AA_IW[Y] $R60=$AA_IW[Z]
ID=14    EVERY     $AA_IW[Y]>=26     DO     $R61=$VA_VACTM[Y]
$R62=$VA_VACTM[Z] $R63=$AA_IW[Y] $R64=$AA_IW[Z]
ID=15    EVERY     $AA_IW[Y]>=28     DO     $R65=$VA_VACTM[Y]
$R66=$VA_VACTM[Z] $R67=$AA_IW[Y] $R68=$AA_IW[Z]
ID=16    EVERY     $AA_IW[Y]>=30     DO     $R69=$VA_VACTM[Y]
$R70=$VA_VACTM[Z] $R71=$AA_IW[Y] $R72=$AA_IW[Z]
ID=17    EVERY     $AA_IW[Y]>=32     DO     $R73=$VA_VACTM[Y]
$R74=$VA_VACTM[Z] $R75=$AA_IW[Y] $R76=$AA_IW[Z]
ID=18    EVERY     $AA_IW[Y]>=34     DO     $R77=$VA_VACTM[Y]
$R78=$VA_VACTM[Z] $R79=$AA_IW[Y] $R80=$AA_IW[Z]
ID=19    EVERY     $AA_IW[Y]>=36     DO     $R81=$VA_VACTM[Y]
$R82=$VA_VACTM[Z] $R83=$AA_IW[Y] $R84=$AA_IW[Z]
ID=20    EVERY     $AA_IW[Y]>=38     DO     $R85=$VA_VACTM[Y]
$R86=$VA_VACTM[Z] $R87=$AA_IW[Y] $R88=$AA_IW[Z]
ID=21    EVERY     $AA_IW[Y]>=40     DO     $R89=$VA_VACTM[Y]
$R90=$VA_VACTM[Z] $R91=$AA_IW[Y] $R92=$AA_IW[Z]
M17

```

ID=1 EVERY \$AA_IW[Y]>=42 DO \$R09=\$VA_VACTM[Y]
 \$R10=\$VA_VACTM[Z] \$R11=\$AA_IW[Y] \$R12=\$AA_IW[Z]
 ID=2 EVERY \$AA_IW[Y]>=44 DO \$R13=\$VA_VACTM[Y]
 \$R14=\$VA_VACTM[Z] \$R15=\$AA_IW[Y] \$R16=\$AA_IW[Z]
 ID=3 EVERY \$AA_IW[Y]>=48 DO \$R17=\$VA_VACTM[Y]
 \$R18=\$VA_VACTM[Z] \$R19=\$AA_IW[Y] \$R20=\$AA_IW[Z]
 ID=4 EVERY \$AA_IW[Y]>=50 DO \$R21=\$VA_VACTM[Y]
 \$R22=\$VA_VACTM[Z] \$R23=\$AA_IW[Y] \$R24=\$AA_IW[Z]
 ID=5 EVERY \$AA_IW[Y]>=52 DO \$R25=\$VA_VACTM[Y]
 \$R26=\$VA_VACTM[Z] \$R27=\$AA_IW[Y] \$R28=\$AA_IW[Z]
 ID=6 EVERY \$AA_IW[Y]>=54 DO \$R29=\$VA_VACTM[Y]
 \$R30=\$VA_VACTM[Z] \$R31=\$AA_IW[Y] \$R32=\$AA_IW[Z]
 ID=7 EVERY \$AA_IW[Y]>=56 DO \$R33=\$VA_VACTM[Y]
 \$R34=\$VA_VACTM[Z] \$R35=\$AA_IW[Y] \$R36=\$AA_IW[Z]
 ID=8 EVERY \$AA_IW[Y]>=58 DO \$R37=\$VA_VACTM[Y]
 \$R38=\$VA_VACTM[Z] \$R39=\$AA_IW[Y] \$R40=\$AA_IW[Z]
 ID=9 EVERY \$AA_IW[Y]>=60 DO \$R41=\$VA_VACTM[Y]
 \$R42=\$VA_VACTM[Z] \$R43=\$AA_IW[Y] \$R44=\$AA_IW[Z]
 ID=10 EVERY \$AA_IW[Y]>=62 DO \$R45=\$VA_VACTM[Y]
 \$R46=\$VA_VACTM[Z] \$R47=\$AA_IW[Y] \$R48=\$AA_IW[Z]
 ID=11 EVERY \$AA_IW[Y]>=64 DO \$R49=\$VA_VACTM[Y]
 \$R50=\$VA_VACTM[Z] \$R51=\$AA_IW[Y] \$R52=\$AA_IW[Z]
 ID=12 EVERY \$AA_IW[Y]>=66 DO \$R53=\$VA_VACTM[Y]
 \$R54=\$VA_VACTM[Z] \$R55=\$AA_IW[Y] \$R56=\$AA_IW[Z]
 ID=13 EVERY \$AA_IW[Y]>=68 DO \$R57=\$VA_VACTM[Y]
 \$R58=\$VA_VACTM[Z] \$R59=\$AA_IW[Y] \$R60=\$AA_IW[Z]
 ID=14 EVERY \$AA_IW[Y]>=70 DO \$R61=\$VA_VACTM[Y]
 \$R62=\$VA_VACTM[Z] \$R63=\$AA_IW[Y] \$R64=\$AA_IW[Z]
 ID=15 EVERY \$AA_IW[Y]>=72 DO \$R65=\$VA_VACTM[Y]
 \$R66=\$VA_VACTM[Z] \$R67=\$AA_IW[Y] \$R68=\$AA_IW[Z]
 ID=16 EVERY \$AA_IW[Y]>=74 DO \$R69=\$VA_VACTM[Y]
 \$R70=\$VA_VACTM[Z] \$R71=\$AA_IW[Y] \$R72=\$AA_IW[Z]
 ID=17 EVERY \$AA_IW[Y]>=76 DO \$R73=\$VA_VACTM[Y]
 \$R74=\$VA_VACTM[Z] \$R75=\$AA_IW[Y] \$R76=\$AA_IW[Z]
 ID=18 EVERY \$AA_IW[Y]>=78 DO \$R77=\$VA_VACTM[Y]
 \$R78=\$VA_VACTM[Z] \$R79=\$AA_IW[Y] \$R80=\$AA_IW[Z]
 ID=19 EVERY \$AA_IW[Y]>=80 DO \$R81=\$VA_VACTM[Y]
 \$R82=\$VA_VACTM[Z] \$R83=\$AA_IW[Y] \$R84=\$AA_IW[Z]
 ID=20 EVERY \$AA_IW[Y]>=82 DO \$R85=\$VA_VACTM[Y]
 \$R86=\$VA_VACTM[Z] \$R87=\$AA_IW[Y] \$R88=\$AA_IW[Z]
 ID=21 EVERY \$AA_IW[Y]>=84 DO \$R89=\$VA_VACTM[Y]
 \$R90=\$VA_VACTM[Z] \$R91=\$AA_IW[Y] \$R92=\$AA_IW[Z]
 ID=22 EVERY \$AA_IW[Y]>=86 DO \$R93=\$VA_VACTM[Y]
 \$R94=\$VA_VACTM[Z] \$R95=\$AA_IW[Y] \$R96=\$AA_IW[Z]
 M17
 ID=1 EVERY \$AA_IW[Y]>=88 DO \$R09=\$VA_VACTM[Y]
 \$R10=\$VA_VACTM[Z] \$R11=\$AA_IW[Y] \$R12=\$AA_IW[Z]

ID=2 EVERY \$AA_IW[Y]>=90 DO \$R13=\$VA_VACTM[Y]
 \$R14=\$VA_VACTM[Z] \$R15=\$AA_IW[Y] \$R16=\$AA_IW[Z]
 ID=3 EVERY \$AA_IW[Y]>=92 DO \$R17=\$VA_VACTM[Y]
 \$R18=\$VA_VACTM[Z] \$R19=\$AA_IW[Y] \$R20=\$AA_IW[Z]
 ID=4 EVERY \$AA_IW[Y]>=94 DO \$R21=\$VA_VACTM[Y]
 \$R22=\$VA_VACTM[Z] \$R23=\$AA_IW[Y] \$R24=\$AA_IW[Z]
 ID=5 EVERY \$AA_IW[Y]>=96 DO \$R25=\$VA_VACTM[Y]
 \$R26=\$VA_VACTM[Z] \$R27=\$AA_IW[Y] \$R28=\$AA_IW[Z]
 ID=6 EVERY \$AA_IW[Y]>=98 DO \$R29=\$VA_VACTM[Y]
 \$R30=\$VA_VACTM[Z] \$R31=\$AA_IW[Y] \$R32=\$AA_IW[Z]
 ID=7 EVERY \$AA_IW[Y]>=100 DO \$R33=\$VA_VACTM[Y]
 \$R34=\$VA_VACTM[Z] \$R35=\$AA_IW[Y] \$R36=\$AA_IW[Z]
 ID=8 EVERY \$AA_IW[Y]>=102 DO \$R37=\$VA_VACTM[Y]
 \$R38=\$VA_VACTM[Z] \$R39=\$AA_IW[Y] \$R40=\$AA_IW[Z]
 ID=9 EVERY \$AA_IW[Y]>=104 DO \$R41=\$VA_VACTM[Y]
 \$R42=\$VA_VACTM[Z] \$R43=\$AA_IW[Y] \$R44=\$AA_IW[Z]
 ID=10 EVERY \$AA_IW[Y]>=106 DO \$R45=\$VA_VACTM[Y]
 \$R46=\$VA_VACTM[Z] \$R47=\$AA_IW[Y] \$R48=\$AA_IW[Z]
 ID=11 EVERY \$AA_IW[Y]>=108 DO \$R49=\$VA_VACTM[Y]
 \$R50=\$VA_VACTM[Z] \$R51=\$AA_IW[Y] \$R52=\$AA_IW[Z]
 ID=12 EVERY \$AA_IW[Y]>=110 DO \$R53=\$VA_VACTM[Y]
 \$R54=\$VA_VACTM[Z] \$R55=\$AA_IW[Y] \$R56=\$AA_IW[Z]
 ID=13 EVERY \$AA_IW[Y]>=112 DO \$R57=\$VA_VACTM[Y]
 \$R58=\$VA_VACTM[Z] \$R59=\$AA_IW[Y] \$R60=\$AA_IW[Z]
 ID=14 EVERY \$AA_IW[Y]>=114 DO \$R61=\$VA_VACTM[Y]
 \$R62=\$VA_VACTM[Z] \$R63=\$AA_IW[Y] \$R64=\$AA_IW[Z]
 ID=15 EVERY \$AA_IW[Y]>=116 DO \$R65=\$VA_VACTM[Y]
 \$R66=\$VA_VACTM[Z] \$R67=\$AA_IW[Y] \$R68=\$AA_IW[Z]
 ID=16 EVERY \$AA_IW[Y]>=118 DO \$R69=\$VA_VACTM[Y]
 \$R70=\$VA_VACTM[Z] \$R71=\$AA_IW[Y] \$R72=\$AA_IW[Z]
 ID=17 EVERY \$AA_IW[Y]>=120 DO \$R73=\$VA_VACTM[Y]
 \$R74=\$VA_VACTM[Z] \$R75=\$AA_IW[Y] \$R76=\$AA_IW[Z]
 ID=18 EVERY \$AA_IW[Y]>=122 DO \$R77=\$VA_VACTM[Y]
 \$R78=\$VA_VACTM[Z] \$R79=\$AA_IW[Y] \$R80=\$AA_IW[Z]
 M17

APÊNDICE B - PROGRAMA DA TRAJETÓRIA LINEAR - X = 5 MM

```

N1 G40 G17 G710 G94 G90 G60
G601 FNORM
N3 ;(*- FERR: T2 - ESFERICA8 -*)
N4 ; _camtolerance=.005
N5 M58 ;(DESTRAVA EIXO B)
N6 M50 ;(DESTRAVA EIXO C)
N7 TRAF00F
N8 CYCLE800("0",)
N9 G0 G53 Z610. D0
N10 G0 G53 X-310. Y0.0 D0
N11 T="ESFERICA8" D1
N12 M6
N13 G53 Z610. D0
N14 ;
N15 G0 B0.0 C=DC(0.0)
N16
N17 TRAF00F
N18 G54
N19 M59 ;(TRAVA EIXO B)
N20 M51 ;(TRAVA EIXO C)
N21 G0 X5. Y-5.641 Z29.051 D1
N22 Z4.488
R1=$A_HOUR
R2=$A_MINUTE
R3=$A_SECOND
R4=$A_MSECOND
N23 G1 Y-5.428 Z4.317 F=R0
N24 Y-5.204 Z4.161
N25 Y-4.97 Z4.021
N26 Y-4.727 Z3.896
N27 Y-4.476 Z3.789
N28 Y-4.218 Z3.699
N29 Y-3.954 Z3.627
N30 Y-3.687 Z3.573
N31 Y-3.416 Z3.537
N32 Y-3.143 Z3.52
N33 Y-2.87 Z3.522
N34 Y-2.598 Z3.542
N35 Y-2.327 Z3.581
N36 Y-2.06 Z3.638
N37 Y-1.798 Z3.714
N38 Y-1.541 Z3.807
N39 Y-1.291 Z3.917
N40 Y-1.049 Z4.044
N41 Y-.817 Z4.187
N42 Y-.595 Z4.346
N43 Y-.384 Z4.52
N44 Y-.185 Z4.707
N45 Y0.0 Z4.908
N46 Y.375 Z5.343
N47 Y.75 Z5.76
N48 Y1.125 Z6.158
N49 Y1.5 Z6.538
N50 Y1.875 Z6.902
N51 Y2.25 Z7.25
N52 Y2.625 Z7.581
N53 Y3. Z7.897
N54 Y3.375 Z8.197
N55 Y3.75 Z8.484
N56 Y4.125 Z8.757
N57 Y4.5 Z9.016
N58 Y4.875 Z9.263
N59 Y5.25 Z9.497
N60 Y5.625 Z9.716
N61 Y6. Z9.924
N62 Y6.375 Z10.121
N63 Y6.75 Z10.306
N64 Y7.125 Z10.479
N65 Y7.5 Z10.64
N66 Y7.875 Z10.792
N67 Y8.25 Z10.933
N68 Y8.625 Z11.065
N69 Y9. Z11.188
N70 Y9.375 Z11.303
N71 Y9.75 Z11.408
N72 Y10.125 Z11.505
N73 Y10.5 Z11.594
N74 Y10.875 Z11.675
N75 Y11.25 Z11.749
N76 Y11.625 Z11.816
N77 Y12. Z11.875
N78 Y12.375 Z11.928
N79 Y12.75 Z11.973
N80 Y13.125 Z12.011
N81 Y13.5 Z12.043
N82 Y13.875 Z12.069
N83 Y14.25 Z12.089
N84 Y14.625 Z12.103
N85 Y15. Z12.11
N86 Y15.375 Z12.115

```

N87 Y15.75 Z12.111	N135 Y58.5 Z4.549
N88 Y16.125 Z12.104	N136 Y59.25 Z4.592
N89 Y16.5 Z12.092	N137 Y60. Z4.649
N90 Y17.25 Z12.055	N138 Y60.75 Z4.719
N91 Y18. Z12.	N139 Y61.5 Z4.803
N92 Y18.375 Z11.966	N140 Y62.25 Z4.901
N93 Y18.75 Z11.929	N141 Y63. Z5.014
N94 Y19.125 Z11.889	N142 Y63.75 Z5.14
N95 Y19.5 Z11.843	N143 Y64.5 Z5.282
N96 Y20.25 Z11.745	N144 Y65.25 Z5.437
N97 Y21. Z11.633	N145 Y66. Z5.607
N98 Y21.75 Z11.509	N146 Y66.75 Z5.792
N99 Y22.5 Z11.375	N147 Y67.5 Z5.989
N100 Y23.25 Z11.231	N148 Y68.25 Z6.2
N101 Y24. Z11.078	N149 Y69. Z6.424
N102 Y24.75 Z10.917	N150 Y69.75 Z6.662
N103 Y25.5 Z10.747	N151 Y70.5 Z6.912
N104 Y26.25 Z10.573	N152 Y71.25 Z7.176
N105 Y27. Z10.392	N153 Y72. Z7.452
N106 Y28.5 Z10.016	N154 Y72.75 Z7.741
N107 Y30. Z9.623	N155 Y73.5 Z8.041
N108 Y31.5 Z9.22	N156 Y74.25 Z8.353
N109 Y33. Z8.811	N157 Y75. Z8.676
N110 Y36. Z7.987	N158 Y75.75 Z9.012
N111 Y37.5 Z7.582	N159 Y76.5 Z9.355
N112 Y39. Z7.187	N160 Y77.25 Z9.708
N113 Y40.5 Z6.804	N161 Y78. Z10.07
N114 Y42. Z6.441	N162 Y78.75 Z10.439
N115 Y42.75 Z6.266	N163 Y79.5 Z10.817
N116 Y43.5 Z6.096	N164 Y80.25 Z11.202
N117 Y45. Z5.777	N165 Y81. Z11.593
N118 Y45.75 Z5.627	N166 Y82.5 Z12.387
N119 Y46.5 Z5.485	N167 Y84. Z13.193
N120 Y47.25 Z5.351	N168 Y85.5 Z14.001
N121 Y48. Z5.225	N169 Y87. Z14.801
N122 Y48.75 Z5.107	N170 Y88.5 Z15.583
N123 Y49.5 Z4.999	N171 Y89.25 Z15.965
N124 Y50.25 Z4.9	N172 Y90. Z16.34
N125 Y51. Z4.81	N173 Y90.75 Z16.703
N126 Y51.75 Z4.731	N174 Y91.5 Z17.057
N127 Y52.5 Z4.663	N175 Y92.25 Z17.396
N128 Y53.25 Z4.605	N176 Y93. Z17.721
N129 Y54. Z4.56	N177 Y93.375 Z17.878
N130 Y54.75 Z4.525	N178 Y93.75 Z18.029
N131 Y55.5 Z4.505	N179 Y94.5 Z18.319
N132 Y56.25 Z4.496	N180 Y94.875 Z18.455
N133 Y57. Z4.501	N181 Y95.25 Z18.587
N134 Y57.75 Z4.518	N182 Y95.625 Z18.714

N183 Y96. Z18.834
N184 Y96.375 Z18.947
N185 Y96.75 Z19.054
N186 Y97.125 Z19.154
N187 Y97.5 Z19.247
N188 Y97.875 Z19.333
N189 Y98.25 Z19.411
N190 Y98.625 Z19.481
N191 Y99. Z19.543
N192 Y99.375 Z19.597
N193 Y99.75 Z19.642
N194 Y100.125 Z19.68
N195 Y100.5 Z19.709
N196 Y100.875 Z19.73
N197 Y101.25 Z19.741
N198 Y101.625 Z19.743
N199 Y102. Z19.736
N200 Y102.375 Z19.719
N201 Y102.75 Z19.692
N202 Y103.125 Z19.655
N203 Y103.5 Z19.607
N204 Y103.875 Z19.549
N205 Y104.25 Z19.479
N206 Y104.625 Z19.398
N207 Y105. Z19.304
N208 Y105.375 Z19.197
N209 Y105.75 Z19.078
N210 Y106.125 Z18.946
N211 Y106.5 Z18.802
N212 Y106.875 Z18.645
N213 Y107.25 Z18.476
N214 Y107.625 Z18.294
N215 Y108. Z18.097
N216 Y108.375 Z17.888
N217 Y108.75 Z17.666
N218 Y109.125 Z17.428
N219 Y109.5 Z17.177
N220 Y109.875 Z16.912
N221 Y110.25 Z16.631
N222 Y110.625 Z16.336
N223 Y111. Z16.024
N224 Y111.375 Z15.698
N225 Y111.75 Z15.354
N226 Y112.125 Z14.995
N227 Y112.5 Z14.616
N228 Y112.875 Z14.223
N229 Y113.25 Z13.813
N230 Y113.625 Z13.386
N231 Y114. Z12.943
N232 Y114.375 Z12.482
N233 Y114.75 Z12.006
N234 Y115.125 Z11.513
N235 Y115.5 Z11.003
N236 Y115.875 Z10.475
N237 Y116.25 Z9.928
N238 Y116.625 Z9.365
N239 Y117. Z8.784
N240 Y117.375 Z8.189
N241 Y117.75 Z7.578
N242 Y118.125 Z6.947
N243 Y118.5 Z6.297
N244 Y118.875 Z5.63
N245 Y119.25 Z4.947
N246 Y119.625 Z4.245
N247 Y120. Z3.523
N248 Y120.126 Z3.3
N249 Y120.269 Z3.085
N250 Y120.426 Z2.882
N251 Y120.597 Z2.69
N252 Y120.781 Z2.511
N253 Y120.978 Z2.346
N254 Y121.186 Z2.195
N255 Y121.404 Z2.059
N256 Y121.631 Z1.94
N257 Y121.867 Z1.836
N258 Y122.109 Z1.75
N259 Y122.356 Z1.681
N260 Y122.608 Z1.63
N261 Y122.863 Z1.598
N262 Y123.12 Z1.583
N263 Y123.377 Z1.587
N264 Y123.633 Z1.609
N265 Y123.887 Z1.649
N266 Y124.137 Z1.708
N267 Y124.382 Z1.784
N268 Y124.622 Z1.877
N269 Y124.854 Z1.987
N270 Z3.451
R5=\$A_HOUR
R6=\$A_MINUTE
R7=\$A_SECOND
R8=\$A_MSECOND
N282 M30

APÊNDICE C - PROGRAMA DA TRAJETÓRIA LINEAR - X = 15 MM

```

N1 G40 G17 G710 G94 G90 G60
G601 FNORM
N2 ;(*- OPER: X15-1 -*)
N3 ;(*- FERR: T2 - ESFERICA8 -*)
N4 ; _camtolerance=.005
N5 M58 ;(DESTRAVA EIXO B)
N6 M50 ;(DESTRAVA EIXO C)
N7 TRAF00F
N8 CYCLE800("0",)
N9 G0 G53 Z610. D0
N10 G0 G53 X-310. Y0.0 D0
N11 T="ESFERICA8" D1
N12 M6
N13 G53 Z610. D0
N14 ;
N15 G0 B0.0 C=DC(0.0)
N16
N17 TRAF00F
N18 G54
N19 M59 ;(TRAVA EIXO B)
N20 M51 ;(TRAVA EIXO C)
N21 G0 X15. Y-5.616 Z29.051
S12000 D1 M3
N22 Z7.654
R1=$A_HOUR
R2=$A_MINUTE
R3=$A_SECOND
R4=$A_MSECOND
N23 G1 Y-5.396 Z7.492 M8 F=R0.
N24 Y-5.165 Z7.347
N25 Y-4.924 Z7.217
N26 Y-4.676 Z7.104
N27 Y-4.42 Z7.008
N28 Y-4.158 Z6.93
N29 Y-3.892 Z6.87
N30 Y-3.622 Z6.829
N31 Y-3.35 Z6.805
N32 Y-3.076 Z6.801
N33 Y-2.804 Z6.815
N34 Y-2.533 Z6.848
N35 Y-2.264 Z6.899
N36 Y-2. Z6.968
N37 Y-1.741 Z7.055
N38 Y-1.489 Z7.16
N39 Y-1.244 Z7.282
N40 Y-1.009 Z7.42
N41 Y-.783 Z7.573
N42 Y-.568 Z7.742
N43 Y-.366 Z7.925
N44 Y-.176 Z8.122
N45 Y0.0 Z8.331
N46 Y.375 Z8.808
N47 Y.75 Z9.259
N48 Y1.125 Z9.682
N49 Y1.5 Z10.083
N50 Y1.875 Z10.46
N51 Y2.25 Z10.818
N52 Y2.625 Z11.158
N53 Y3. Z11.476
N54 Y3.375 Z11.778
N55 Y3.75 Z12.063
N56 Y4.125 Z12.332
N57 Y4.5 Z12.585
N58 Y4.875 Z12.824
N59 Y5.25 Z13.048
N60 Y5.625 Z13.259
N61 Y6. Z13.456
N62 Y6.375 Z13.641
N63 Y6.75 Z13.814
N64 Y7.125 Z13.975
N65 Y7.5 Z14.125
N66 Y7.875 Z14.265
N67 Y8.25 Z14.394
N68 Y8.625 Z14.515
N69 Y9. Z14.626
N70 Y9.375 Z14.728
N71 Y9.75 Z14.821
N72 Y10.125 Z14.907
N73 Y10.5 Z14.984
N74 Y10.875 Z15.053
N75 Y11.25 Z15.114
N76 Y11.625 Z15.168
N77 Y12. Z15.215
N78 Y12.375 Z15.254
N79 Y12.75 Z15.286
N80 Y13.125 Z15.312
N81 Y13.5 Z15.331
N82 Y13.875 Z15.344
N83 Y14.25 Z15.35
N84 Y14.625 Z15.351

```

N85 Y15. Z15.345
N86 Y15.375 Z15.334
N87 Y15.75 Z15.318
N88 Y16.125 Z15.296
N89 Y16.5 Z15.269
N90 Y16.875 Z15.238
N91 Y17.25 Z15.202
N92 Y17.625 Z15.162
N93 Y18. Z15.117
N94 Y18.375 Z15.069
N95 Y18.75 Z15.016
N96 Y19.125 Z14.959
N97 Y19.5 Z14.899
N98 Y20.25 Z14.769
N99 Y21. Z14.623
N100 Y21.75 Z14.466
N101 Y22.5 Z14.297
N102 Y23.25 Z14.119
N103 Y24. Z13.931
N104 Y24.75 Z13.734
N105 Y25.5 Z13.531
N106 Y26.25 Z13.321
N107 Y27. Z13.103
N108 Y27.75 Z12.883
N109 Y28.5 Z12.659
N110 Y30. Z12.2
N111 Y33. Z11.264
N112 Y34.5 Z10.798
N113 Y36. Z10.339
N114 Y37.5 Z9.892
N115 Y39. Z9.465
N116 Y39.75 Z9.259
N117 Y40.5 Z9.059
N118 Y41.25 Z8.865
N119 Y42. Z8.679
N120 Y42.75 Z8.5
N121 Y43.5 Z8.33
N122 Y44.25 Z8.168
N123 Y45. Z8.014
N124 Y45.75 Z7.872
N125 Y46.5 Z7.738
N126 Y47.25 Z7.615
N127 Y48. Z7.503
N128 Y48.75 Z7.402
N129 Y49.5 Z7.313
N130 Y50.25 Z7.235
N131 Y51. Z7.17
N132 Y51.75 Z7.118
N133 Y52.5 Z7.078
N134 Y53.25 Z7.053
N135 Y54. Z7.04
N136 Y54.75 Z7.043
N137 Y55.5 Z7.06
N138 Y56.25 Z7.093
N139 Y57. Z7.141
N140 Y57.75 Z7.204
N141 Y58.5 Z7.283
N142 Y59.25 Z7.376
N143 Y60. Z7.486
N144 Y60.75 Z7.61
N145 Y61.5 Z7.751
N146 Y62.25 Z7.907
N147 Y63. Z8.08
N148 Y63.375 Z8.172
N149 Y63.75 Z8.269
N150 Y64.5 Z8.474
N151 Y65.25 Z8.696
N152 Y66. Z8.934
N153 Y66.75 Z9.189
N154 Y67.5 Z9.459
N155 Y68.25 Z9.744
N156 Y69. Z10.044
N157 Y69.75 Z10.36
N158 Y70.5 Z10.689
N159 Y71.25 Z11.032
N160 Y72. Z11.389
N161 Y72.75 Z11.759
N162 Y73.5 Z12.142
N163 Y74.25 Z12.536
N164 Y75. Z12.943
N165 Y75.75 Z13.36
N166 Y76.5 Z13.789
N167 Y77.25 Z14.226
N168 Y78. Z14.671
N169 Y78.75 Z15.123
N170 Y79.5 Z15.583
N171 Y81. Z16.521
N172 Y84. Z18.429
N173 Y85.5 Z19.379
N174 Y86.25 Z19.847
N175 Y87. Z20.308
N176 Y87.75 Z20.764
N177 Y88.5 Z21.211
N178 Y89.25 Z21.649
N179 Y90. Z22.076
N180 Y90.75 Z22.49

N181 Y91.5 Z22.889
N182 Y91.875 Z23.083
N183 Y92.25 Z23.272
N184 Y93. Z23.638
N185 Y93.75 Z23.983
N186 Y94.125 Z24.149
N187 Y94.5 Z24.308
N188 Y94.875 Z24.463
N189 Y95.25 Z24.611
N190 Y95.625 Z24.754
N191 Y96. Z24.89
N192 Y96.375 Z25.02
N193 Y96.75 Z25.142
N194 Y97.125 Z25.257
N195 Y97.5 Z25.365
N196 Y97.875 Z25.465
N197 Y98.25 Z25.558
N198 Y98.625 Z25.643
N199 Y99. Z25.72
N200 Y99.375 Z25.789
N201 Y99.75 Z25.85
N202 Y100.125 Z25.903
N203 Y100.5 Z25.948
N204 Y100.875 Z25.985
N205 Y101.25 Z26.013
N206 Y101.625 Z26.032
N207 Y102. Z26.043
N208 Y102.375 Z26.046
N209 Y102.75 Z26.039
N210 Y103.125 Z26.023
N211 Y103.5 Z25.998
N212 Y103.875 Z25.964
N213 Y104.25 Z25.92
N214 Y104.625 Z25.866
N215 Y105. Z25.802
N216 Y105.375 Z25.727
N217 Y105.75 Z25.641
N218 Y106.125 Z25.543
N219 Y106.5 Z25.434
N220 Y106.875 Z25.313
N221 Y107.25 Z25.179
N222 Y107.625 Z25.034
N223 Y108. Z24.877
N224 Y108.375 Z24.707
N225 Y108.75 Z24.525
N226 Y109.125 Z24.329
N227 Y109.5 Z24.12
N228 Y109.875 Z23.897
N229 Y110.25 Z23.66
N230 Y110.625 Z23.41
N231 Y111. Z23.146
N232 Y111.375 Z22.866
N233 Y111.75 Z22.57
N234 Y112.125 Z22.258
N235 Y112.5 Z21.93
N236 Y112.875 Z21.582
N237 Y113.25 Z21.218
N238 Y113.625 Z20.834
N239 Y114. Z20.431
N240 Y114.375 Z20.006
N241 Y114.75 Z19.563
N242 Y114.937 Z19.334
N243 Y115.125 Z19.096
N244 Y115.312 Z18.857
N245 Y115.5 Z18.609
N246 Y115.687 Z18.358
N247 Y115.875 Z18.1
N248 Y116.062 Z17.838
N249 Y116.25 Z17.569
N250 Y116.437 Z17.295
N251 Y116.625 Z17.015
N252 Y117. Z16.436
N253 Y117.187 Z16.14
N254 Y117.375 Z15.834
N255 Y117.562 Z15.526
N256 Y117.75 Z15.208
N257 Y118.125 Z14.556
N258 Y118.5 Z13.879
N259 Y118.875 Z13.174
N260 Y119.25 Z12.443
N261 Y119.625 Z11.686
N262 Y120. Z10.898
N263 Y120.126 Z10.656
N264 Y120.268 Z10.423
N265 Y120.425 Z10.2
N266 Y120.598 Z9.988
N267 Y120.784 Z9.788
N268 Y120.984 Z9.602
N269 Y121.196 Z9.429
N270 Y121.419 Z9.272
N271 Y121.652 Z9.13
N272 Y121.895 Z9.005
N273 Y122.145 Z8.896
N274 Y122.403 Z8.804
N275 Y122.666 Z8.731
N276 Y122.933 Z8.675

N277 Y123.204 Z8.638
N278 Y123.476 Z8.62
N279 Y123.75
N280 Y124.022 Z8.639
N281 Y124.293 Z8.676
N282 Y124.56 Z8.731
N283 Y124.823 Z8.805

N284 Y125.08 Z8.897
N285 Y125.331 Z9.006
R5=\$A_HOUR
R6=\$A_MINUTE
R7=\$A_SECOND
R8=\$A_MSECOND
N297 M30

APÊNDICE D - PROGRAMA DA TRAJETÓRIA LINEAR - X = 25 MM

```

N1 G40 G17 G710 G94 G90 G60
G601 FNORM
N2 ;(*- OPER: X25-1 -*)
N3 ;(*- FERR: T2 - ESFERICA8 -*)
N4 ; _camtolerance=.005
N5 M58 ;(DESTRAVA EIXO B)
N6 M50 ;(DESTRAVA EIXO C)
N7 TRAF00F
N8 CYCLE800("0",)
N9 G0 G53 Z610. D0
N10 G0 G53 X-310. Y0.0 D0
N11 T="ESFERICA8" D1
N12 M6
N13 G53 Z610. D0
N14 ;
N15 G0 B0.0 C=DC(0.0)
N16
N17 TRAF00F
N18 G54
N19 M59 ;(TRAVA EIXO B)
N20 M51 ;(TRAVA EIXO C)
N21 G0 X25. Y-5.638 Z29.051
N22 Z5.263
R1=$A_HOUR
R2=$A_MINUTE
R3=$A_SECOND
R4=$A_MSECOND
N23 G1 Y-5.424 Z5.093 M8 F=R0
N24 Y-5.198 Z4.939
N25 Y-4.963 Z4.8
N26 Y-4.719 Z4.678
N27 Y-4.467 Z4.573
N28 Y-4.208 Z4.485
N29 Y-3.944 Z4.415
N30 Y-3.676 Z4.363
N31 Y-3.405 Z4.329
N32 Y-3.132 Z4.314
N33 Y-2.859 Z4.318
N34 Y-2.587 Z4.341
N35 Y-2.317 Z4.382
N36 Y-2.05 Z4.441
N37 Y-1.788 Z4.518
N38 Y-1.532 Z4.613
N39 Y-1.283 Z4.726
N40 Y-1.042 Z4.855
N41 Y-.811 Z5.
N42 Y-.59 Z5.16
N43 Y-.381 Z5.336
N44 Y-.184 Z5.525
N45 Y0.0 Z5.727
N46 Y.375 Z6.169
N47 Y.75 Z6.591
N48 Y1.125 Z6.992
N49 Y1.5 Z7.375
N50 Y1.875 Z7.736
N51 Y2.25 Z8.079
N52 Y2.625 Z8.406
N53 Y3. Z8.715
N54 Y3.375 Z9.009
N55 Y3.75 Z9.287
N56 Y4.125 Z9.549
N57 Y4.5 Z9.798
N58 Y4.875 Z10.032
N59 Y5.25 Z10.252
N60 Y5.625 Z10.461
N61 Y6. Z10.656
N62 Y6.375 Z10.839
N63 Y6.75 Z11.009
N64 Y7.125 Z11.167
N65 Y7.5 Z11.314
N66 Y7.875 Z11.45
N67 Y8.25 Z11.576
N68 Y8.625 Z11.69
N69 Y9. Z11.795
N70 Y9.375 Z11.891
N71 Y9.75 Z11.978
N72 Y10.125 Z12.056
N73 Y10.5 Z12.126
N74 Y10.875 Z12.187
N75 Y11.25 Z12.241
N76 Y11.625 Z12.287
N77 Y12. Z12.325
N78 Y12.375 Z12.356
N79 Y12.75 Z12.38
N80 Y13.125 Z12.397
N81 Y13.5 Z12.407
N82 Y13.875 Z12.41
N83 Y14.25 Z12.407
N84 Y14.625 Z12.398
N85 Y15. Z12.382

```

N86 Y15.375 Z12.361
N87 Y15.75 Z12.334
N88 Y16.125 Z12.301
N89 Y16.5 Z12.265
N90 Y17.25 Z12.176
N91 Y18. Z12.069
N92 Y18.375 Z12.01
N93 Y18.75 Z11.945
N94 Y19.125 Z11.879
N95 Y19.5 Z11.807
N96 Y20.25 Z11.656
N97 Y21. Z11.49
N98 Y21.75 Z11.313
N99 Y22.5 Z11.126
N100 Y23.25 Z10.929
N101 Y24. Z10.724
N102 Y24.75 Z10.511
N103 Y25.5 Z10.294
N104 Y26.25 Z10.069
N105 Y27. Z9.84
N106 Y28.5 Z9.376
N107 Y30. Z8.904
N108 Y33. Z7.957
N109 Y34.5 Z7.494
N110 Y36. Z7.044
N111 Y37.5 Z6.612
N112 Y38.25 Z6.405
N113 Y39. Z6.204
N114 Y39.75 Z6.009
N115 Y40.5 Z5.821
N116 Y41.25 Z5.641
N117 Y42. Z5.469
N118 Y42.75 Z5.305
N119 Y43.5 Z5.15
N120 Y44.25 Z5.004
N121 Y45. Z4.869
N122 Y45.75 Z4.743
N123 Y46.5 Z4.627
N124 Y47.25 Z4.523
N125 Y48. Z4.429
N126 Y48.75 Z4.348
N127 Y49.5 Z4.277
N128 Y50.25 Z4.219
N129 Y51. Z4.172
N130 Y51.75 Z4.138
N131 Y52.5 Z4.117
N132 Y53.25 Z4.108
N133 Y54. Z4.114
N134 Y54.75 Z4.132
N135 Y55.5 Z4.166
N136 Y56.25 Z4.213
N137 Y57. Z4.275
N138 Y57.75 Z4.35
N139 Y58.5 Z4.44
N140 Y59.25 Z4.543
N141 Y60. Z4.66
N142 Y60.75 Z4.792
N143 Y61.5 Z4.937
N144 Y62.25 Z5.096
N145 Y63. Z5.27
N146 Y63.75 Z5.458
N147 Y64.5 Z5.66
N148 Y65.25 Z5.877
N149 Y66. Z6.106
N150 Y66.75 Z6.35
N151 Y67.5 Z6.606
N152 Y68.25 Z6.875
N153 Y69. Z7.156
N154 Y69.75 Z7.449
N155 Y70.5 Z7.753
N156 Y71.25 Z8.069
N157 Y72. Z8.395
N158 Y72.75 Z8.731
N159 Y73.5 Z9.078
N160 Y74.25 Z9.435
N161 Y75. Z9.798
N162 Y75.75 Z10.17
N163 Y76.5 Z10.548
N164 Y77.25 Z10.934
N165 Y78. Z11.326
N166 Y79.5 Z12.121
N167 Y81. Z12.931
N168 Y84. Z14.565
N169 Y85.5 Z15.37
N170 Y86.25 Z15.764
N171 Y87. Z16.154
N172 Y87.75 Z16.536
N173 Y88.5 Z16.911
N174 Y89.25 Z17.276
N175 Y90. Z17.631
N176 Y90.75 Z17.974
N177 Y91.125 Z18.141
N178 Y91.5 Z18.303
N179 Y91.875 Z18.463
N180 Y92.25 Z18.619
N181 Y93. Z18.918

N182 Y93.75 Z19.199
N183 Y94.125 Z19.333
N184 Y94.5 Z19.46
N185 Y94.875 Z19.583
N186 Y95.25 Z19.701
N187 Y96. Z19.918
N188 Y96.375 Z20.016
N189 Y96.75 Z20.108
N190 Y97.125 Z20.194
N191 Y97.5 Z20.272
N192 Y97.875 Z20.342
N193 Y98.25 Z20.405
N194 Y98.625 Z20.46
N195 Y99. Z20.508
N196 Y99.375 Z20.547
N197 Y99.75 Z20.577
N198 Y100.125 Z20.599
N199 Y100.5 Z20.613
N200 Y100.875 Z20.617
N201 Y101.25 Z20.613
N202 Y101.625 Z20.599
N203 Y102. Z20.576
N204 Y102.375 Z20.544
N205 Y102.75 Z20.502
N206 Y103.125 Z20.45
N207 Y103.5 Z20.387
N208 Y103.875 Z20.313
N209 Y104.25 Z20.228
N210 Y104.625 Z20.132
N211 Y105. Z20.022
N212 Y105.375 Z19.9
N213 Y105.75 Z19.765
N214 Y106.125 Z19.617
N215 Y106.5 Z19.456
N216 Y106.875 Z19.282
N217 Y107.25 Z19.096
N218 Y107.625 Z18.895
N219 Y108. Z18.68
N220 Y108.375 Z18.453
N221 Y108.75 Z18.212
N222 Y109.125 Z17.955
N223 Y109.5 Z17.684
N224 Y109.875 Z17.399
N225 Y110.25 Z17.097
N226 Y110.625 Z16.78
N227 Y111. Z16.446
N228 Y111.375 Z16.096
N229 Y111.75 Z15.729
N230 Y112.125 Z15.345
N231 Y112.5 Z14.943
N232 Y112.875 Z14.523
N233 Y113.062 Z14.31
N234 Y113.25 Z14.087
N235 Y113.437 Z13.865
N236 Y113.625 Z13.635
N237 Y114. Z13.166
N238 Y114.375 Z12.68
N239 Y114.75 Z12.177
N240 Y115.125 Z11.657
N241 Y115.5 Z11.121
N242 Y115.875 Z10.568
N243 Y116.25 Z9.999
N244 Y116.625 Z9.415
N245 Y117. Z8.817
N246 Y117.375 Z8.204
N247 Y117.75 Z7.575
N248 Y118.125 Z6.931
N249 Y118.5 Z6.272
N250 Y118.875 Z5.603
N251 Y119.25 Z4.92
N252 Y119.625 Z4.221
N253 Y120. Z3.508
N254 Y120.128 Z3.285
N255 Y120.271 Z3.072
N256 Y120.429 Z2.869
N257 Y120.601 Z2.678
N258 Y120.787 Z2.5
N259 Y120.984 Z2.336
N260 Y121.193 Z2.186
N261 Y121.412 Z2.052
N262 Y121.64 Z1.933
N263 Y121.876 Z1.831
N264 Y122.118 Z1.746
N265 Y122.366 Z1.679
N266 Y122.619 Z1.629
N267 Y122.874 Z1.598
N268 Y123.13 Z1.585
N269 Y123.387 Z1.59
N270 Y123.643 Z1.613
N271 Y123.897 Z1.655
N272 Y124.147 Z1.715
N273 Y124.392 Z1.792
N274 Y124.631 Z1.887
N275 Y124.862 Z1.998
N276 Z3.451
R5=\$A_HOUR

R6=\$A_MINUTE
R7=\$A_SECOND

R8=\$A_MSECOND
N288 M30

APÊNDICE E - PROGRAMA DA TRAJETÓRIA "CYCLE 832" - X = 5 MM

```

N1 G40 G17 G710 G94 G90 G60
G601 FNORM
N3 ;(*- FERR: T2 - ESFERICA8 -*)
N4 ; _camtolerance=.005
N5 M58 ;(DESTRAVA EIXO B)
N6 M50 ;(DESTRAVA EIXO C)
N7 TRAF00F
N8 CYCLE800(,"0",)
N9 G0 G53 Z610. D0
N10 G0 G53 X-310. Y0.0 D0
N11 T="ESFERICA8" D1
N12 M6
N13 G53 Z610. D0
N14 ;
N15 G0 B0.0 C=DC(0.0)
N16 CYCLE832(0.005,1,1)
N17 TRAF00F
N18 G54
N19 M59 ;(TRAVA EIXO B)
N20 M51 ;(TRAVA EIXO C)
N21 G0 X5. Y-5.641 Z29.051 D1
N22 Z4.488
R1=$A_HOUR
R2=$A_MINUTE
R3=$A_SECOND
R4=$A_MSECOND
N23 G1 Y-5.428 Z4.317 F=R0
N24 Y-5.204 Z4.161
N25 Y-4.97 Z4.021
N26 Y-4.727 Z3.896
N27 Y-4.476 Z3.789
N28 Y-4.218 Z3.699
N29 Y-3.954 Z3.627
N30 Y-3.687 Z3.573
N31 Y-3.416 Z3.537
N32 Y-3.143 Z3.52
N33 Y-2.87 Z3.522
N34 Y-2.598 Z3.542
N35 Y-2.327 Z3.581
N36 Y-2.06 Z3.638
N37 Y-1.798 Z3.714
N38 Y-1.541 Z3.807
N39 Y-1.291 Z3.917
N40 Y-1.049 Z4.044
N41 Y-.817 Z4.187
N42 Y-.595 Z4.346
N43 Y-.384 Z4.52
N44 Y-.185 Z4.707
N45 Y0.0 Z4.908
N46 Y.375 Z5.343
N47 Y.75 Z5.76
N48 Y1.125 Z6.158
N49 Y1.5 Z6.538
N50 Y1.875 Z6.902
N51 Y2.25 Z7.25
N52 Y2.625 Z7.581
N53 Y3. Z7.897
N54 Y3.375 Z8.197
N55 Y3.75 Z8.484
N56 Y4.125 Z8.757
N57 Y4.5 Z9.016
N58 Y4.875 Z9.263
N59 Y5.25 Z9.497
N60 Y5.625 Z9.716
N61 Y6. Z9.924
N62 Y6.375 Z10.121
N63 Y6.75 Z10.306
N64 Y7.125 Z10.479
N65 Y7.5 Z10.64
N66 Y7.875 Z10.792
N67 Y8.25 Z10.933
N68 Y8.625 Z11.065
N69 Y9. Z11.188
N70 Y9.375 Z11.303
N71 Y9.75 Z11.408
N72 Y10.125 Z11.505
N73 Y10.5 Z11.594
N74 Y10.875 Z11.675
N75 Y11.25 Z11.749
N76 Y11.625 Z11.816
N77 Y12. Z11.875
N78 Y12.375 Z11.928
N79 Y12.75 Z11.973
N80 Y13.125 Z12.011
N81 Y13.5 Z12.043
N82 Y13.875 Z12.069
N83 Y14.25 Z12.089
N84 Y14.625 Z12.103
N85 Y15. Z12.11
N86 Y15.375 Z12.115

```

N87 Y15.75 Z12.111	N135 Y58.5 Z4.549
N88 Y16.125 Z12.104	N136 Y59.25 Z4.592
N89 Y16.5 Z12.092	N137 Y60. Z4.649
N90 Y17.25 Z12.055	N138 Y60.75 Z4.719
N91 Y18. Z12.	N139 Y61.5 Z4.803
N92 Y18.375 Z11.966	N140 Y62.25 Z4.901
N93 Y18.75 Z11.929	N141 Y63. Z5.014
N94 Y19.125 Z11.889	N142 Y63.75 Z5.14
N95 Y19.5 Z11.843	N143 Y64.5 Z5.282
N96 Y20.25 Z11.745	N144 Y65.25 Z5.437
N97 Y21. Z11.633	N145 Y66. Z5.607
N98 Y21.75 Z11.509	N146 Y66.75 Z5.792
N99 Y22.5 Z11.375	N147 Y67.5 Z5.989
N100 Y23.25 Z11.231	N148 Y68.25 Z6.2
N101 Y24. Z11.078	N149 Y69. Z6.424
N102 Y24.75 Z10.917	N150 Y69.75 Z6.662
N103 Y25.5 Z10.747	N151 Y70.5 Z6.912
N104 Y26.25 Z10.573	N152 Y71.25 Z7.176
N105 Y27. Z10.392	N153 Y72. Z7.452
N106 Y28.5 Z10.016	N154 Y72.75 Z7.741
N107 Y30. Z9.623	N155 Y73.5 Z8.041
N108 Y31.5 Z9.22	N156 Y74.25 Z8.353
N109 Y33. Z8.811	N157 Y75. Z8.676
N110 Y36. Z7.987	N158 Y75.75 Z9.012
N111 Y37.5 Z7.582	N159 Y76.5 Z9.355
N112 Y39. Z7.187	N160 Y77.25 Z9.708
N113 Y40.5 Z6.804	N161 Y78. Z10.07
N114 Y42. Z6.441	N162 Y78.75 Z10.439
N115 Y42.75 Z6.266	N163 Y79.5 Z10.817
N116 Y43.5 Z6.096	N164 Y80.25 Z11.202
N117 Y45. Z5.777	N165 Y81. Z11.593
N118 Y45.75 Z5.627	N166 Y82.5 Z12.387
N119 Y46.5 Z5.485	N167 Y84. Z13.193
N120 Y47.25 Z5.351	N168 Y85.5 Z14.001
N121 Y48. Z5.225	N169 Y87. Z14.801
N122 Y48.75 Z5.107	N170 Y88.5 Z15.583
N123 Y49.5 Z4.999	N171 Y89.25 Z15.965
N124 Y50.25 Z4.9	N172 Y90. Z16.34
N125 Y51. Z4.81	N173 Y90.75 Z16.703
N126 Y51.75 Z4.731	N174 Y91.5 Z17.057
N127 Y52.5 Z4.663	N175 Y92.25 Z17.396
N128 Y53.25 Z4.605	N176 Y93. Z17.721
N129 Y54. Z4.56	N177 Y93.375 Z17.878
N130 Y54.75 Z4.525	N178 Y93.75 Z18.029
N131 Y55.5 Z4.505	N179 Y94.5 Z18.319
N132 Y56.25 Z4.496	N180 Y94.875 Z18.455
N133 Y57. Z4.501	N181 Y95.25 Z18.587
N134 Y57.75 Z4.518	N182 Y95.625 Z18.714

N183 Y96. Z18.834
N184 Y96.375 Z18.947
N185 Y96.75 Z19.054
N186 Y97.125 Z19.154
N187 Y97.5 Z19.247
N188 Y97.875 Z19.333
N189 Y98.25 Z19.411
N190 Y98.625 Z19.481
N191 Y99. Z19.543
N192 Y99.375 Z19.597
N193 Y99.75 Z19.642
N194 Y100.125 Z19.68
N195 Y100.5 Z19.709
N196 Y100.875 Z19.73
N197 Y101.25 Z19.741
N198 Y101.625 Z19.743
N199 Y102. Z19.736
N200 Y102.375 Z19.719
N201 Y102.75 Z19.692
N202 Y103.125 Z19.655
N203 Y103.5 Z19.607
N204 Y103.875 Z19.549
N205 Y104.25 Z19.479
N206 Y104.625 Z19.398
N207 Y105. Z19.304
N208 Y105.375 Z19.197
N209 Y105.75 Z19.078
N210 Y106.125 Z18.946
N211 Y106.5 Z18.802
N212 Y106.875 Z18.645
N213 Y107.25 Z18.476
N214 Y107.625 Z18.294
N215 Y108. Z18.097
N216 Y108.375 Z17.888
N217 Y108.75 Z17.666
N218 Y109.125 Z17.428
N219 Y109.5 Z17.177
N220 Y109.875 Z16.912
N221 Y110.25 Z16.631
N222 Y110.625 Z16.336
N223 Y111. Z16.024
N224 Y111.375 Z15.698
N225 Y111.75 Z15.354
N226 Y112.125 Z14.995
N227 Y112.5 Z14.616
N228 Y112.875 Z14.223
N229 Y113.25 Z13.813
N230 Y113.625 Z13.386
N231 Y114. Z12.943
N232 Y114.375 Z12.482
N233 Y114.75 Z12.006
N234 Y115.125 Z11.513
N235 Y115.5 Z11.003
N236 Y115.875 Z10.475
N237 Y116.25 Z9.928
N238 Y116.625 Z9.365
N239 Y117. Z8.784
N240 Y117.375 Z8.189
N241 Y117.75 Z7.578
N242 Y118.125 Z6.947
N243 Y118.5 Z6.297
N244 Y118.875 Z5.63
N245 Y119.25 Z4.947
N246 Y119.625 Z4.245
N247 Y120. Z3.523
N248 Y120.126 Z3.3
N249 Y120.269 Z3.085
N250 Y120.426 Z2.882
N251 Y120.597 Z2.69
N252 Y120.781 Z2.511
N253 Y120.978 Z2.346
N254 Y121.186 Z2.195
N255 Y121.404 Z2.059
N256 Y121.631 Z1.94
N257 Y121.867 Z1.836
N258 Y122.109 Z1.75
N259 Y122.356 Z1.681
N260 Y122.608 Z1.63
N261 Y122.863 Z1.598
N262 Y123.12 Z1.583
N263 Y123.377 Z1.587
N264 Y123.633 Z1.609
N265 Y123.887 Z1.649
N266 Y124.137 Z1.708
N267 Y124.382 Z1.784
N268 Y124.622 Z1.877
N269 Y124.854 Z1.987
N270 Z3.451
R5=\$A_HOUR
R6=\$A_MINUTE
R7=\$A_SECOND
R8=\$A_MSECOND
N282 M30

APÊNDICE F - PROGRAMA DA TRAJETÓRIA "CYCLE 832" - X = 15 MM

```

N1 G40 G17 G710 G94 G90 G60
G601 FNORM
N2 ;(*- OPER: X15-1 -*)
N3 ;(*- FERR: T2 - ESFERICA8 -*)
N4 ; _camtolerance=.005
N5 M58 ;(DESTRAVA EIXO B)
N6 M50 ;(DESTRAVA EIXO C)
N7 TRAF00F
N8 CYCLE800("0",)
N9 G0 G53 Z610. D0
N10 G0 G53 X-310. Y0.0 D0
N11 T="ESFERICA8" D1
N12 M6
N13 G53 Z610. D0
N14 ;
N15 G0 B0.0 C=DC(0.0)
N16 CYCLE832(0.005,1,1)
N17 TRAF00F
N18 G54
N19 M59 ;(TRAVA EIXO B)
N20 M51 ;(TRAVA EIXO C)
N21 G0 X15. Y-5.616 Z29.051
N22 Z7.654
R1=$A_HOUR
R2=$A_MINUTE
R3=$A_SECOND
R4=$A_MSECOND
N23 G1 Y-5.396 Z7.492 M8 F=R0
N24 Y-5.165 Z7.347
N25 Y-4.924 Z7.217
N26 Y-4.676 Z7.104
N27 Y-4.42 Z7.008
N28 Y-4.158 Z6.93
N29 Y-3.892 Z6.87
N30 Y-3.622 Z6.829
N31 Y-3.35 Z6.805
N32 Y-3.076 Z6.801
N33 Y-2.804 Z6.815
N34 Y-2.533 Z6.848
N35 Y-2.264 Z6.899
N36 Y-2. Z6.968
N37 Y-1.741 Z7.055
N38 Y-1.489 Z7.16
N39 Y-1.244 Z7.282
N40 Y-1.009 Z7.42
N41 Y-.783 Z7.573
N42 Y-.568 Z7.742
N43 Y-.366 Z7.925
N44 Y-.176 Z8.122
N45 Y0.0 Z8.331
N46 Y.375 Z8.808
N47 Y.75 Z9.259
N48 Y1.125 Z9.682
N49 Y1.5 Z10.083
N50 Y1.875 Z10.46
N51 Y2.25 Z10.818
N52 Y2.625 Z11.158
N53 Y3. Z11.476
N54 Y3.375 Z11.778
N55 Y3.75 Z12.063
N56 Y4.125 Z12.332
N57 Y4.5 Z12.585
N58 Y4.875 Z12.824
N59 Y5.25 Z13.048
N60 Y5.625 Z13.259
N61 Y6. Z13.456
N62 Y6.375 Z13.641
N63 Y6.75 Z13.814
N64 Y7.125 Z13.975
N65 Y7.5 Z14.125
N66 Y7.875 Z14.265
N67 Y8.25 Z14.394
N68 Y8.625 Z14.515
N69 Y9. Z14.626
N70 Y9.375 Z14.728
N71 Y9.75 Z14.821
N72 Y10.125 Z14.907
N73 Y10.5 Z14.984
N74 Y10.875 Z15.053
N75 Y11.25 Z15.114
N76 Y11.625 Z15.168
N77 Y12. Z15.215
N78 Y12.375 Z15.254
N79 Y12.75 Z15.286
N80 Y13.125 Z15.312
N81 Y13.5 Z15.331
N82 Y13.875 Z15.344
N83 Y14.25 Z15.35
N84 Y14.625 Z15.351
N85 Y15. Z15.345

```

N86 Y15.375 Z15.334
N87 Y15.75 Z15.318
N88 Y16.125 Z15.296
N89 Y16.5 Z15.269
N90 Y16.875 Z15.238
N91 Y17.25 Z15.202
N92 Y17.625 Z15.162
N93 Y18. Z15.117
N94 Y18.375 Z15.069
N95 Y18.75 Z15.016
N96 Y19.125 Z14.959
N97 Y19.5 Z14.899
N98 Y20.25 Z14.769
N99 Y21. Z14.623
N100 Y21.75 Z14.466
N101 Y22.5 Z14.297
N102 Y23.25 Z14.119
N103 Y24. Z13.931
N104 Y24.75 Z13.734
N105 Y25.5 Z13.531
N106 Y26.25 Z13.321
N107 Y27. Z13.103
N108 Y27.75 Z12.883
N109 Y28.5 Z12.659
N110 Y30. Z12.2
N111 Y33. Z11.264
N112 Y34.5 Z10.798
N113 Y36. Z10.339
N114 Y37.5 Z9.892
N115 Y39. Z9.465
N116 Y39.75 Z9.259
N117 Y40.5 Z9.059
N118 Y41.25 Z8.865
N119 Y42. Z8.679
N120 Y42.75 Z8.5
N121 Y43.5 Z8.33
N122 Y44.25 Z8.168
N123 Y45. Z8.014
N124 Y45.75 Z7.872
N125 Y46.5 Z7.738
N126 Y47.25 Z7.615
N127 Y48. Z7.503
N128 Y48.75 Z7.402
N129 Y49.5 Z7.313
N130 Y50.25 Z7.235
N131 Y51. Z7.17
N132 Y51.75 Z7.118
N133 Y52.5 Z7.078
N134 Y53.25 Z7.053
N135 Y54. Z7.04
N136 Y54.75 Z7.043
N137 Y55.5 Z7.06
N138 Y56.25 Z7.093
N139 Y57. Z7.141
N140 Y57.75 Z7.204
N141 Y58.5 Z7.283
N142 Y59.25 Z7.376
N143 Y60. Z7.486
N144 Y60.75 Z7.61
N145 Y61.5 Z7.751
N146 Y62.25 Z7.907
N147 Y63. Z8.08
N148 Y63.375 Z8.172
N149 Y63.75 Z8.269
N150 Y64.5 Z8.474
N151 Y65.25 Z8.696
N152 Y66. Z8.934
N153 Y66.75 Z9.189
N154 Y67.5 Z9.459
N155 Y68.25 Z9.744
N156 Y69. Z10.044
N157 Y69.75 Z10.36
N158 Y70.5 Z10.689
N159 Y71.25 Z11.032
N160 Y72. Z11.389
N161 Y72.75 Z11.759
N162 Y73.5 Z12.142
N163 Y74.25 Z12.536
N164 Y75. Z12.943
N165 Y75.75 Z13.36
N166 Y76.5 Z13.789
N167 Y77.25 Z14.226
N168 Y78. Z14.671
N169 Y78.75 Z15.123
N170 Y79.5 Z15.583
N171 Y81. Z16.521
N172 Y84. Z18.429
N173 Y85.5 Z19.379
N174 Y86.25 Z19.847
N175 Y87. Z20.308
N176 Y87.75 Z20.764
N177 Y88.5 Z21.211
N178 Y89.25 Z21.649
N179 Y90. Z22.076
N180 Y90.75 Z22.49
N181 Y91.5 Z22.889

N182 Y91.875 Z23.083
N183 Y92.25 Z23.272
N184 Y93. Z23.638
N185 Y93.75 Z23.983
N186 Y94.125 Z24.149
N187 Y94.5 Z24.308
N188 Y94.875 Z24.463
N189 Y95.25 Z24.611
N190 Y95.625 Z24.754
N191 Y96. Z24.89
N192 Y96.375 Z25.02
N193 Y96.75 Z25.142
N194 Y97.125 Z25.257
N195 Y97.5 Z25.365
N196 Y97.875 Z25.465
N197 Y98.25 Z25.558
N198 Y98.625 Z25.643
N199 Y99. Z25.72
N200 Y99.375 Z25.789
N201 Y99.75 Z25.85
N202 Y100.125 Z25.903
N203 Y100.5 Z25.948
N204 Y100.875 Z25.985
N205 Y101.25 Z26.013
N206 Y101.625 Z26.032
N207 Y102. Z26.043
N208 Y102.375 Z26.046
N209 Y102.75 Z26.039
N210 Y103.125 Z26.023
N211 Y103.5 Z25.998
N212 Y103.875 Z25.964
N213 Y104.25 Z25.92
N214 Y104.625 Z25.866
N215 Y105. Z25.802
N216 Y105.375 Z25.727
N217 Y105.75 Z25.641
N218 Y106.125 Z25.543
N219 Y106.5 Z25.434
N220 Y106.875 Z25.313
N221 Y107.25 Z25.179
N222 Y107.625 Z25.034
N223 Y108. Z24.877
N224 Y108.375 Z24.707
N225 Y108.75 Z24.525
N226 Y109.125 Z24.329
N227 Y109.5 Z24.12
N228 Y109.875 Z23.897
N229 Y110.25 Z23.66
N230 Y110.625 Z23.41
N231 Y111. Z23.146
N232 Y111.375 Z22.866
N233 Y111.75 Z22.57
N234 Y112.125 Z22.258
N235 Y112.5 Z21.93
N236 Y112.875 Z21.582
N237 Y113.25 Z21.218
N238 Y113.625 Z20.834
N239 Y114. Z20.431
N240 Y114.375 Z20.006
N241 Y114.75 Z19.563
N242 Y114.937 Z19.334
N243 Y115.125 Z19.096
N244 Y115.312 Z18.857
N245 Y115.5 Z18.609
N246 Y115.687 Z18.358
N247 Y115.875 Z18.1
N248 Y116.062 Z17.838
N249 Y116.25 Z17.569
N250 Y116.437 Z17.295
N251 Y116.625 Z17.015
N252 Y117. Z16.436
N253 Y117.187 Z16.14
N254 Y117.375 Z15.834
N255 Y117.562 Z15.526
N256 Y117.75 Z15.208
N257 Y118.125 Z14.556
N258 Y118.5 Z13.879
N259 Y118.875 Z13.174
N260 Y119.25 Z12.443
N261 Y119.625 Z11.686
N262 Y120. Z10.898
N263 Y120.126 Z10.656
N264 Y120.268 Z10.423
N265 Y120.425 Z10.2
N266 Y120.598 Z9.988
N267 Y120.784 Z9.788
N268 Y120.984 Z9.602
N269 Y121.196 Z9.429
N270 Y121.419 Z9.272
N271 Y121.652 Z9.13
N272 Y121.895 Z9.005
N273 Y122.145 Z8.896
N274 Y122.403 Z8.804
N275 Y122.666 Z8.731
N276 Y122.933 Z8.675
N277 Y123.204 Z8.638

N278 Y123.476 Z8.62
N279 Y123.75
N280 Y124.022 Z8.639
N281 Y124.293 Z8.676
N282 Y124.56 Z8.731
N283 Y124.823 Z8.805
N284 Y125.08 Z8.897

N285 Y125.331 Z9.006
R5=\$A_HOUR
R6=\$A_MINUTE
R7=\$A_SECOND
R8=\$A_MSECOND
N297 M30

APÊNDICE G - PROGRAMA DA TRAJETÓRIA "CYCLE 832" - X = 25 MM

```

N1 G40 G17 G710 G94 G90 G60
G601 FNORM
N2 ;(*- OPER: X25-1 -*)
N3 ;(*- FERR: T2 - ESFERICA8 -*)
N4 ;_camtolerance=.005
N5 M58 ;(DESTRAVA EIXO B)
N6 M50 ;(DESTRAVA EIXO C)
N7 TRAF00F
N8 CYCLE800("0",)
N9 G0 G53 Z610. D0
N10 G0 G53 X-310. Y0.0 D0
N11 T="ESFERICA8" D1
N12 M6
N13 G53 Z610. D0
N14 ;
N15 G0 B0.0 C=DC(0.0)
N16 CYCLE832(0.005,1,1)
N17 TRAF00F
N18 G54
N19 M59 ;(TRAVA EIXO B)
N20 M51 ;(TRAVA EIXO C)
N21 G0 X25. Y-5.638 Z29.051
N22 Z5.263
R1=$A_HOUR
R2=$A_MINUTE
R3=$A_SECOND
R4=$A_MSECOND
N23 G1 Y-5.424 Z5.093 M8 F=R0
N24 Y-5.198 Z4.939
N25 Y-4.963 Z4.8
N26 Y-4.719 Z4.678
N27 Y-4.467 Z4.573
N28 Y-4.208 Z4.485
N29 Y-3.944 Z4.415
N30 Y-3.676 Z4.363
N31 Y-3.405 Z4.329
N32 Y-3.132 Z4.314
N33 Y-2.859 Z4.318
N34 Y-2.587 Z4.341
N35 Y-2.317 Z4.382
N36 Y-2.05 Z4.441
N37 Y-1.788 Z4.518
N38 Y-1.532 Z4.613
N39 Y-1.283 Z4.726
N40 Y-1.042 Z4.855
N41 Y-.811 Z5.
N42 Y-.59 Z5.16
N43 Y-.381 Z5.336
N44 Y-.184 Z5.525
N45 Y0.0 Z5.727
N46 Y.375 Z6.169
N47 Y.75 Z6.591
N48 Y1.125 Z6.992
N49 Y1.5 Z7.375
N50 Y1.875 Z7.736
N51 Y2.25 Z8.079
N52 Y2.625 Z8.406
N53 Y3. Z8.715
N54 Y3.375 Z9.009
N55 Y3.75 Z9.287
N56 Y4.125 Z9.549
N57 Y4.5 Z9.798
N58 Y4.875 Z10.032
N59 Y5.25 Z10.252
N60 Y5.625 Z10.461
N61 Y6. Z10.656
N62 Y6.375 Z10.839
N63 Y6.75 Z11.009
N64 Y7.125 Z11.167
N65 Y7.5 Z11.314
N66 Y7.875 Z11.45
N67 Y8.25 Z11.576
N68 Y8.625 Z11.69
N69 Y9. Z11.795
N70 Y9.375 Z11.891
N71 Y9.75 Z11.978
N72 Y10.125 Z12.056
N73 Y10.5 Z12.126
N74 Y10.875 Z12.187
N75 Y11.25 Z12.241
N76 Y11.625 Z12.287
N77 Y12. Z12.325
N78 Y12.375 Z12.356
N79 Y12.75 Z12.38
N80 Y13.125 Z12.397
N81 Y13.5 Z12.407
N82 Y13.875 Z12.41
N83 Y14.25 Z12.407
N84 Y14.625 Z12.398
N85 Y15. Z12.382

```

N86 Y15.375 Z12.361
N87 Y15.75 Z12.334
N88 Y16.125 Z12.301
N89 Y16.5 Z12.265
N90 Y17.25 Z12.176
N91 Y18. Z12.069
N92 Y18.375 Z12.01
N93 Y18.75 Z11.945
N94 Y19.125 Z11.879
N95 Y19.5 Z11.807
N96 Y20.25 Z11.656
N97 Y21. Z11.49
N98 Y21.75 Z11.313
N99 Y22.5 Z11.126
N100 Y23.25 Z10.929
N101 Y24. Z10.724
N102 Y24.75 Z10.511
N103 Y25.5 Z10.294
N104 Y26.25 Z10.069
N105 Y27. Z9.84
N106 Y28.5 Z9.376
N107 Y30. Z8.904
N108 Y33. Z7.957
N109 Y34.5 Z7.494
N110 Y36. Z7.044
N111 Y37.5 Z6.612
N112 Y38.25 Z6.405
N113 Y39. Z6.204
N114 Y39.75 Z6.009
N115 Y40.5 Z5.821
N116 Y41.25 Z5.641
N117 Y42. Z5.469
N118 Y42.75 Z5.305
N119 Y43.5 Z5.15
N120 Y44.25 Z5.004
N121 Y45. Z4.869
N122 Y45.75 Z4.743
N123 Y46.5 Z4.627
N124 Y47.25 Z4.523
N125 Y48. Z4.429
N126 Y48.75 Z4.348
N127 Y49.5 Z4.277
N128 Y50.25 Z4.219
N129 Y51. Z4.172
N130 Y51.75 Z4.138
N131 Y52.5 Z4.117
N132 Y53.25 Z4.108
N133 Y54. Z4.114
N134 Y54.75 Z4.132
N135 Y55.5 Z4.166
N136 Y56.25 Z4.213
N137 Y57. Z4.275
N138 Y57.75 Z4.35
N139 Y58.5 Z4.44
N140 Y59.25 Z4.543
N141 Y60. Z4.66
N142 Y60.75 Z4.792
N143 Y61.5 Z4.937
N144 Y62.25 Z5.096
N145 Y63. Z5.27
N146 Y63.75 Z5.458
N147 Y64.5 Z5.66
N148 Y65.25 Z5.877
N149 Y66. Z6.106
N150 Y66.75 Z6.35
N151 Y67.5 Z6.606
N152 Y68.25 Z6.875
N153 Y69. Z7.156
N154 Y69.75 Z7.449
N155 Y70.5 Z7.753
N156 Y71.25 Z8.069
N157 Y72. Z8.395
N158 Y72.75 Z8.731
N159 Y73.5 Z9.078
N160 Y74.25 Z9.435
N161 Y75. Z9.798
N162 Y75.75 Z10.17
N163 Y76.5 Z10.548
N164 Y77.25 Z10.934
N165 Y78. Z11.326
N166 Y79.5 Z12.121
N167 Y81. Z12.931
N168 Y84. Z14.565
N169 Y85.5 Z15.37
N170 Y86.25 Z15.764
N171 Y87. Z16.154
N172 Y87.75 Z16.536
N173 Y88.5 Z16.911
N174 Y89.25 Z17.276
N175 Y90. Z17.631
N176 Y90.75 Z17.974
N177 Y91.125 Z18.141
N178 Y91.5 Z18.303
N179 Y91.875 Z18.463
N180 Y92.25 Z18.619
N181 Y93. Z18.918

N182 Y93.75 Z19.199
N183 Y94.125 Z19.333
N184 Y94.5 Z19.46
N185 Y94.875 Z19.583
N186 Y95.25 Z19.701
N187 Y96. Z19.918
N188 Y96.375 Z20.016
N189 Y96.75 Z20.108
N190 Y97.125 Z20.194
N191 Y97.5 Z20.272
N192 Y97.875 Z20.342
N193 Y98.25 Z20.405
N194 Y98.625 Z20.46
N195 Y99. Z20.508
N196 Y99.375 Z20.547
N197 Y99.75 Z20.577
N198 Y100.125 Z20.599
N199 Y100.5 Z20.613
N200 Y100.875 Z20.617
N201 Y101.25 Z20.613
N202 Y101.625 Z20.599
N203 Y102. Z20.576
N204 Y102.375 Z20.544
N205 Y102.75 Z20.502
N206 Y103.125 Z20.45
N207 Y103.5 Z20.387
N208 Y103.875 Z20.313
N209 Y104.25 Z20.228
N210 Y104.625 Z20.132
N211 Y105. Z20.022
N212 Y105.375 Z19.9
N213 Y105.75 Z19.765
N214 Y106.125 Z19.617
N215 Y106.5 Z19.456
N216 Y106.875 Z19.282
N217 Y107.25 Z19.096
N218 Y107.625 Z18.895
N219 Y108. Z18.68
N220 Y108.375 Z18.453
N221 Y108.75 Z18.212
N222 Y109.125 Z17.955
N223 Y109.5 Z17.684
N224 Y109.875 Z17.399
N225 Y110.25 Z17.097
N226 Y110.625 Z16.78
N227 Y111. Z16.446
N228 Y111.375 Z16.096
N229 Y111.75 Z15.729
N230 Y112.125 Z15.345
N231 Y112.5 Z14.943
N232 Y112.875 Z14.523
N233 Y113.062 Z14.31
N234 Y113.25 Z14.087
N235 Y113.437 Z13.865
N236 Y113.625 Z13.635
N237 Y114. Z13.166
N238 Y114.375 Z12.68
N239 Y114.75 Z12.177
N240 Y115.125 Z11.657
N241 Y115.5 Z11.121
N242 Y115.875 Z10.568
N243 Y116.25 Z9.999
N244 Y116.625 Z9.415
N245 Y117. Z8.817
N246 Y117.375 Z8.204
N247 Y117.75 Z7.575
N248 Y118.125 Z6.931
N249 Y118.5 Z6.272
N250 Y118.875 Z5.603
N251 Y119.25 Z4.92
N252 Y119.625 Z4.221
N253 Y120. Z3.508
N254 Y120.128 Z3.285
N255 Y120.271 Z3.072
N256 Y120.429 Z2.869
N257 Y120.601 Z2.678
N258 Y120.787 Z2.5
N259 Y120.984 Z2.336
N260 Y121.193 Z2.186
N261 Y121.412 Z2.052
N262 Y121.64 Z1.933
N263 Y121.876 Z1.831
N264 Y122.118 Z1.746
N265 Y122.366 Z1.679
N266 Y122.619 Z1.629
N267 Y122.874 Z1.598
N268 Y123.13 Z1.585
N269 Y123.387 Z1.59
N270 Y123.643 Z1.613
N271 Y123.897 Z1.655
N272 Y124.147 Z1.715
N273 Y124.392 Z1.792
N274 Y124.631 Z1.887
N275 Y124.862 Z1.998
N276 Z3.451
R5=\$A_HOUR

R6=\$A_MINUTE
R7=\$A_SECOND
R8=\$A_MSECOND
N277 G0 Z29.051
N278 ;End of Path
N279 G53 Z610. D0
N280 CYCLE832()
N281 M5 M9

N282 ;End of Program
N283 M58 ;(DESTRAVA EIXO B)
N284 M50 ;(DESTRAVA EIXO C)
N285 G0 B0.0 C=DC(0.0)
N286 T0
N287 M6
N288 M30

APÊNDICE H - PROGRAMA DA TRAJETÓRIA CINCO EIXOS - X = 5 MM

```

N1 G40 G17 G710 G94 G90 G60      N40 X5.043 Y-.531 Z3.495
G601 FNORM                        N41 X5.019 Y-.342 Z3.691
N2 ;(*- OPER: 5XL1 -*)           N42 X5.005 Y-.165 Z3.898
N3 ;(*- FERR: T2 - ESFERICA8 -*) N43 X5. Y0.0 Z4.116
N4 ; _camtolerance=.005          N44 Y.375 Z4.642 B49.058
N5 M58 ;(DESTRAVA EIXO B)        C=DC(309.529)
N6 M50 ;(DESTRAVA EIXO C)        N45 Y.75 Z5.148 B46.921
N7 TRAFOOF                        C=DC(308.728)
N8 CYCLE800("0",)               N46 Y1.125 Z5.635 B44.926
N9 G0 G53 Z610. D0              C=DC(308.03)
N10 G0 G53 X-310. Y0.0 D0        N47 Y1.5 Z6.102 B43.051
N11 T="ESFERICA8" D1            C=DC(307.435)
N12 M6                            N48 Y1.875 Z6.549 B41.28
N13 G53 Z610. D0                C=DC(306.946)
N14 ;                             N49 Y2.25 Z6.975 B39.601
N15 G0 B51.384 C=DC(310.405)     C=DC(306.562)
N16 CYCLE832(0.005,1,1)         N50 Y2.625 Z7.382 B38.002
N17 TRAORI                       C=DC(306.283)
N18 G54                           N51 Y3. Z7.769 B36.476
R1=$A_HOUR                       C=DC(306.108)
R2=$A_MINUTE                     N52 Y3.375 Z8.137 B35.015
R3=$A_SECOND                     C=DC(306.037)
R4=$A_MSECOND                   N53 Y3.75 Z8.487 B33.618
N19 G0 X33.997 Y-36.77 Z36.051  C=DC(306.067)
N20 X7.053 Y-5.116 Z2.849        N54 Y4.125 Z8.819 B32.283
N21 G1 X6.913 Y-4.92 Z2.721 M8  C=DC(306.191)
F=R0                              N55 Y4.5 Z9.134 B31.003
N22 X6.774 Y-4.714 Z2.608        C=DC(306.414)
N23 X6.636 Y-4.499 Z2.512        N56 Y4.875 Z9.432 B29.772
N24 X6.499 Y-4.276 Z2.432        C=DC(306.741)
N25 X6.366 Y-4.046 Z2.37         N57 Y5.25 Z9.715 B28.583
N26 X6.235 Y-3.81 Z2.325         C=DC(307.178)
N27 X6.109 Y-3.57 Z2.298         N58 Y5.625 Z9.982 B27.433
N28 X5.986 Y-3.326 Z2.289        C=DC(307.735)
N29 X5.869 Y-3.079 Z2.297        N59 Y6. Z10.235 B26.319
N30 X5.758 Y-2.831 Z2.323        C=DC(308.422)
N31 X5.652 Y-2.583 Z2.367        N60 Y6.375 Z10.473 B25.24
N32 X5.553 Y-2.336 Z2.428        C=DC(309.248)
N33 X5.461 Y-2.091 Z2.506        N61 Y6.75 Z10.697 B24.193
N34 X5.376 Y-1.85 Z2.601          C=DC(310.228)
N35 X5.299 Y-1.613 Z2.713        N62 Y7.125 Z10.907 B23.18
N36 X5.23 Y-1.381 Z2.84          C=DC(311.376)
N37 X5.17 Y-1.156 Z2.983         N63 Y7.5 Z11.104 B22.202
N38 X5.119 Y-.938 Z3.14          C=DC(312.708)
N39 X5.076 Y-.73 Z3.311

```

N64	Y7.875	Z11.287	B21.271	N88	Y17.25	Z12.831	B15.469
C=DC(314.206)				C=DC(9.73)			
N65	Y8.25	Z11.457	B20.41	N89	Y18.	Z12.781	B15.907
C=DC(315.816)				C=DC(12.497)			
N66	Y8.625	Z11.615	B19.614	N90	Y18.75	Z12.715	B16.382
C=DC(317.537)				C=DC(14.921)			
N67	Y9.	Z11.761	B18.882	N91	Y19.5	Z12.634	B16.882
C=DC(319.37)				C=DC(17.022)			
N68	Y9.375	Z11.895	B18.21	N92	Y20.25	Z12.539	B17.397
C=DC(321.314)				C=DC(18.819)			
N69	Y9.75	Z12.02	B17.597	N93	Y21.	Z12.43	B17.917
C=DC(323.368)				C=DC(20.335)			
N70	Y10.125	Z12.134	B17.041	N94	Y21.75	Z12.31	B18.432
C=DC(325.531)				C=DC(21.593)			
N71	Y10.5	Z12.239	B16.54	N95	Y22.5	Z12.18	B18.935
C=DC(327.798)				C=DC(22.615)			
N72	Y10.875	Z12.335	B16.094	N96	Y23.25	Z12.039	B19.429
C=DC(330.165)				C=DC(23.466)			
N73	Y11.25	Z12.422	B15.701	N97	Y24.	Z11.891	B19.915
C=DC(332.626)				C=DC(24.177)			
N74	Y11.625	Z12.501	B15.36	N98	Y24.75	Z11.734	B20.389
C=DC(335.173)				C=DC(24.76)			
N75	Y12.	Z12.571	B15.072	N99	Y25.5	Z11.57	B20.847
C=DC(337.796)				C=DC(25.222)			
N76	Y12.375	Z12.633	B14.835	N100	Y26.25	Z11.4	B21.285
C=DC(340.485)				C=DC(25.573)			
N77	Y12.75	Z12.688	B14.649	N101	Y27.	Z11.224	B21.701
C=DC(343.211)				C=DC(25.82)			
N78	Y13.125	Z12.735	B14.515	N102	Y28.5	Z10.858	B22.475
C=DC(345.922)				C=DC(26.095)			
N79	Y13.5	Z12.775	B14.43	N103	Y30.	Z10.476	B23.176
C=DC(348.591)				C=DC(26.152)			
N80	Y13.875	Z12.808	B14.39	N104	Y31.5	Z10.085	B23.793
C=DC(351.199)				C=DC(26.012)			
N81	Y14.25	Z12.834	B14.393	N105	Y33.	Z9.686	B24.318
C=DC(353.725)				C=DC(25.693)			
N82	Y14.625	Z12.853	B14.434	N106	Y36.	Z8.886	B25.064
C=DC(356.153)				C=DC(24.555)			
N83	Y15.	Z12.867	B14.509	N107	Y37.5	Z8.492	B25.277
C=DC(358.472)				C=DC(23.759)			
N84	Y15.375	Z12.874	B14.614	N108	Y39.	Z8.109	B25.39
C=DC(.671)				C=DC(22.837)			
N85	Y15.75	Z12.876	B14.746	N109	Y40.5	Z7.738	B25.402
C=DC(2.743)				C=DC(21.785)			
N86	Y16.125	Z12.872	B14.902	N110	Y41.25	Z7.559	B25.371
C=DC(4.686)				C=DC(21.206)			
N87	Y16.5	Z12.863	B15.076	N111	Y42.	Z7.385	B25.316
C=DC(6.497)				C=DC(20.591)			

N112	Y42.75	Z7.215	B25.237	N136	Y60.75	Z5.603	B19.592
C=DC(19.937)				C=DC(347.997)			
N113	Y43.5	Z7.051	B25.135	N137	Y61.5	Z5.671	B19.385
C=DC(19.243)				C=DC(345.971)			
N114	Y44.25	Z6.892	B25.01	N138	Y62.25	Z5.751	B19.192
C=DC(18.508)				C=DC(343.897)			
N115	Y45.	Z6.74	B24.864	N139	Y63.	Z5.843	B19.017
C=DC(17.728)				C=DC(341.778)			
N116	Y45.75	Z6.594	B24.696	N140	Y63.75	Z5.948	B18.861
C=DC(16.901)				C=DC(339.613)			
N117	Y46.5	Z6.456	B24.509	N141	Y64.5	Z6.066	B18.724
C=DC(16.031)				C=DC(337.408)			
N118	Y47.25	Z6.324	B24.305	N142	Y65.25	Z6.198	B18.598
C=DC(15.115)				C=DC(335.201)			
N119	Y48.	Z6.2	B24.084	N143	Y66.	Z6.342	B18.48
C=DC(14.151)				C=DC(333.009)			
N120	Y48.75	Z6.085	B23.848	N144	Y66.75	Z6.498	B18.367
C=DC(13.134)				C=DC(330.831)			
N121	Y49.5	Z5.977	B23.599	N145	Y67.5	Z6.667	B18.259
C=DC(12.06)				C=DC(328.67)			
N122	Y50.25	Z5.879	B23.339	N146	Y68.25	Z6.848	B18.155
C=DC(10.925)				C=DC(326.524)			
N123	Y51.	Z5.789	B23.068	N147	Y69.	Z7.042	B18.054
C=DC(9.724)				C=DC(324.393)			
N124	Y51.75	Z5.709	B22.79	N148	Y69.75	Z7.247	B17.955
C=DC(8.453)				C=DC(322.276)			
N125	Y52.5	Z5.639	B22.506	N149	Y70.5	Z7.464	B17.859
C=DC(7.108)				C=DC(320.172)			
N126	Y53.25	Z5.579	B22.218	N150	Y71.25	Z7.692	B17.764
C=DC(5.683)				C=DC(318.081)			
N127	Y54.	Z5.529	B21.93	N151	Y72.	Z7.932	B17.669
C=DC(4.174)				C=DC(316.)			
N128	Y54.75	Z5.491	B21.644	N152	Y72.75	Z8.183	B17.576
C=DC(2.577)				C=DC(313.928)			
N129	Y55.5	Z5.464	B21.362	N153	Y73.5	Z8.445	B17.482
C=DC(.902)				C=DC(311.864)			
N130	Y56.25	Z5.449	B21.085	N154	Y74.25	Z8.717	B17.383
C=DC(359.186)				C=DC(309.812)			
N131	Y57.	Z5.446	B20.814	N155	Y75.	Z9.	B17.278
C=DC(357.431)				C=DC(307.768)			
N132	Y57.75	Z5.453	B20.55	N156	Y75.75	Z9.292	B17.165
C=DC(355.633)				C=DC(305.731)			
N133	Y58.5	Z5.473	B20.295	N157	Y76.5	Z9.594	B17.046
C=DC(353.793)				C=DC(303.699)			
N134	Y59.25	Z5.504	B20.049	N158	Y77.25	Z9.904	B16.919
C=DC(351.907)				C=DC(301.666)			
N135	Y60.	Z5.548	B19.814	N159	Y78.	Z10.223	B16.784
C=DC(349.975)				C=DC(299.632)			

N160	Y78.75	Z10.55	B16.643	N184	Y95.25	Z17.957	B10.589
C=DC(297.594)				C=DC(238.019)			
N161	Y79.5	Z10.884	B16.496	N185	Y95.625	Z18.073	B10.392
C=DC(295.547)				C=DC(235.468)			
N162	Y80.25	Z11.225	B16.342	N186	Y96.	Z18.183	B10.198
C=DC(293.491)				C=DC(232.751)			
N163	Y81.	Z11.572	B16.183	N187	Y96.375	Z18.286	B10.009
C=DC(291.423)				C=DC(229.863)			
N164	Y81.75	Z11.926	B16.018	N188	Y96.75	Z18.382	B9.83
C=DC(289.341)				C=DC(226.803)			
N165	Y82.5	Z12.283	B15.833	N189	Y97.125	Z18.471	B9.664
C=DC(287.234)				C=DC(223.57)			
N166	Y83.25	Z12.645	B15.625	N190	Y97.5	Z18.552	B9.513
C=DC(285.093)				C=DC(220.168)			
N167	Y84.	Z13.009	B15.396	N191	Y97.875	Z18.626	B9.383
C=DC(282.91)				C=DC(216.605)			
N168	Y84.75	Z13.374	B15.15	N192	Y98.25	Z18.692	B9.276
C=DC(280.679)				C=DC(212.893)			
N169	Y85.5	Z13.739	B14.887	N193	Y98.625	Z18.749	B9.195
C=DC(278.394)				C=DC(209.049)			
N170	Y86.25	Z14.104	B14.612	N194	Y99.	Z18.798	B9.143
C=DC(276.049)				C=DC(205.094)			
N171	Y87.	Z14.466	B14.327	N195	Y99.375	Z18.837	B9.124
C=DC(273.641)				C=DC(201.089)			
N172	Y87.75	Z14.826	B14.035	N196	Y99.75	Z18.868	B9.137
C=DC(271.165)				C=DC(197.073)			
N173	Y88.5	Z15.181	B13.739	N197	Y100.125	Z18.89	B9.183
C=DC(268.619)				C=DC(193.056)			
N174	Y89.25	Z15.532	B13.442	N198	Y100.5	Z18.903	B9.263
C=DC(265.999)				C=DC(189.05)			
N175	Y90.	Z15.876	B13.145	N199	Y100.875	Z18.906	B9.378
C=DC(263.302)				C=DC(185.066)			
N176	Y90.75	Z16.212	B12.823	N200	Y101.25	Z18.898	B9.528
C=DC(260.442)				C=DC(181.116)			
N177	Y91.5	Z16.539	B12.473	N201	Y101.625	Z18.881	B9.714
C=DC(257.37)				C=DC(177.212)			
N178	Y92.25	Z16.853	B12.104	N202	Y102.	Z18.853	B9.936
C=DC(254.07)				C=DC(173.364)			
N179	Y93.	Z17.154	B11.726	N203	Y102.375	Z18.813	B10.197
C=DC(250.527)				C=DC(169.581)			
N180	Y93.75	Z17.44	B11.349	N204	Y102.75	Z18.762	B10.497
C=DC(246.729)				C=DC(165.87)			
N181	Y94.125	Z17.576	B11.163	N205	Y103.125	Z18.699	B10.837
C=DC(244.731)				C=DC(162.24)			
N182	Y94.5	Z17.709	B10.978	N206	Y103.312	Z18.662	B11.023
C=DC(242.644)				C=DC(160.456)			
N183	Y94.875	Z17.836	B10.785	N207	Y103.5	Z18.622	B11.22
C=DC(240.409)				C=DC(158.695)			

N208	Y103.687	Z18.579	B11.427	N232	Y108.187	Z16.494	B17.452
C=DC(156.955)				C=DC(127.626)			
N209	Y103.875	Z18.532	B11.646	N233	Y108.375	Z16.362	B17.724
C=DC(155.237)				C=DC(126.729)			
N210	Y104.062	Z18.481	B11.875	N234	Y108.562	Z16.226	B17.998
C=DC(153.546)				C=DC(125.842)			
N211	Y104.25	Z18.427	B12.11	N235	Y108.75	Z16.086	B18.274
C=DC(151.916)				C=DC(124.966)			
N212	Y104.437	Z18.37	B12.348	N236	Y108.937	Z15.943	B18.552
C=DC(150.35)				C=DC(124.099)			
N213	Y104.625	Z18.309	B12.588	N237	Y109.125	Z15.795	B18.831
C=DC(148.846)				C=DC(123.241)			
N214	Y104.812	Z18.245	B12.831	N238	Y109.312	Z15.643	B19.111
C=DC(147.399)				C=DC(122.392)			
N215	Y105.	Z18.177	B13.076	N239	Y109.5	Z15.487	B19.392
C=DC(146.005)				C=DC(121.552)			
N216	Y105.187	Z18.106	B13.323	N240	Y109.687	Z15.326	B19.674
C=DC(144.661)				C=DC(120.72)			
N217	Y105.375	Z18.032	B13.572	N241	Y109.875	Z15.162	B19.955
C=DC(143.363)				C=DC(119.896)			
N218	Y105.562	Z17.954	B13.822	N242	Y110.062	Z14.994	B20.236
C=DC(142.108)				C=DC(119.078)			
N219	Y105.75	Z17.873	B14.074	N243	Y110.25	Z14.821	B20.517
C=DC(140.894)				C=DC(118.268)			
N220	Y105.937	Z17.788	B14.326	N244	Y110.437	Z14.645	B20.797
C=DC(139.716)				C=DC(117.464)			
N221	Y106.125	Z17.7	B14.58	N245	Y110.625	Z14.464	B21.076
C=DC(138.573)				C=DC(116.665)			
N222	Y106.312	Z17.608	B14.835	N246	Y110.812	Z14.279	B21.354
C=DC(137.462)				C=DC(115.872)			
N223	Y106.5	Z17.513	B15.091	N247	Y111.	Z14.09	B21.629
C=DC(136.38)				C=DC(115.085)			
N224	Y106.687	Z17.414	B15.348	N248	Y111.375	Z13.7	B22.173
C=DC(135.325)				C=DC(113.522)			
N225	Y106.875	Z17.312	B15.606	N249	Y111.75	Z13.295	B22.703
C=DC(134.295)				C=DC(111.974)			
N226	Y107.062	Z17.206	B15.865	N250	Y112.125	Z12.874	B23.219
C=DC(133.288)				C=DC(110.437)			
N227	Y107.25	Z17.097	B16.126	N251	Y112.5	Z12.438	B23.737
C=DC(132.302)				C=DC(108.89)			
N228	Y107.437	Z16.984	B16.387	N252	Y112.875	Z11.986	B24.267
C=DC(131.336)				C=DC(107.326)			
N229	Y107.625	Z16.867	B16.651	N253	Y113.25	Z11.518	B24.805
C=DC(130.386)				C=DC(105.742)			
N230	Y107.812	Z16.746	B16.916	N254	Y113.625	Z11.034	B25.352
C=DC(129.452)				C=DC(104.137)			
N231	Y108.	Z16.622	B17.183	N255	Y114.	Z10.533	B25.907
C=DC(128.533)				C=DC(102.508)			

N256	Y114.375	Z10.017	B26.468	N267	Y118.5	Z3.267	B34.409
C=DC(100.854)				C=DC(80.274)			
N257	Y114.75	Z9.485	B27.034	N268	Y118.687	Z2.912	B34.899
C=DC(99.173)				C=DC(79.221)			
N258	Y115.125	Z8.938	B27.61	N269	Y118.734	Z2.823	B35.024
C=DC(97.462)				C=DC(78.957)			
N259	Y115.5	Z8.376	B28.215	N270	X5.879	Y123.241	Z9.374
C=DC(95.713)				N271 G0 X9.461 Y141.591 Z36.051			
N260	Y115.875	Z7.796	B28.852	N272 ;End of Path			
C=DC(93.927)				R5=\$A_HOUR			
N261	Y116.25	Z7.2	B29.523	R6=\$A_MINUTE			
C=DC(92.101)				R7=\$A_SECOND			
N262	Y116.625	Z6.587	B30.229	R8=\$A_MSECOND			
C=DC(90.235)				N273 TRAF00F			
N263	Y117.	Z5.957	B30.974	N274 G53 Z610. D0			
C=DC(88.327)				N275 CYCLE832()			
N264	Y117.375	Z5.309	B31.76	N276 M5 M9			
C=DC(86.377)				N277 ;End of Program			
N265	Y117.75	Z4.645	B32.592	N278 G0 B0.0 C=DC(0.0)			
C=DC(84.385)				N279			
N266	Y118.125	Z3.964	B33.473	N280			
C=DC(82.35)				N281 M30			

APÊNDICE I - PROGRAMA DA TRAJETÓRIA CINCO EIXOS - X = 15 MM

```

N1 G40 G17 G710 G94 G90 G60
G601 FNORM
N2 ;(*- OPER: 5XL2 -*)
N3 ;(*- FERR: T2 - ESFERICA8 -*)
N4 ;_camtolerance=.005
N5 M58 ;(DESTRAVA EIXO B)
N6 M50 ;(DESTRAVA EIXO C)
N7 TRAFOOF
N8 CYCLE800("0",)
N9 G0 G53 Z610. D0
N10 G0 G53 X-310. Y0.0 D0
N11 T="ESFERICA8" D1
N12 M6
N13 G53 Z610. D0
N14 ;
N15 G0 B0.0 C=DC(0.0)
N16 CYCLE832(0.005,1,1)
N17 TRAORI
N18 G54
R1=$A_HOUR
R2=$A_MINUTE
R3=$A_SECOND
R4=$A_MSECOND
N19 G0 X15. Y0.0 Z36.051
N20 Z16.331
N21 G1 Z8.331 M8 F=R0
N22 Y.375 Z8.808
N23 Y.75 Z9.259
N24 Y1.125 Z9.682
N25 Y1.5 Z10.083
N26 Y1.875 Z10.46
N27 Y2.25 Z10.818
N28 Y2.625 Z11.158
N29 Y3. Z11.476
N30 Y3.375 Z11.778
N31 Y3.75 Z12.063
N32 Y4.125 Z12.332
N33 Y4.5 Z12.585
N34 Y4.875 Z12.824
N35 Y5.25 Z13.048
N36 Y5.625 Z13.259
N37 Y6. Z13.456
N38 Y6.375 Z13.641
N39 Y6.75 Z13.814
N40 Y7.125 Z13.975
N41 Y7.5 Z14.125
N42 Y7.875 Z14.265
N43 Y8.25 Z14.394
N44 Y8.625 Z14.515
N45 Y9. Z14.626
N46 Y9.375 Z14.728
N47 Y9.75 Z14.821
N48 Y10.125 Z14.907
N49 Y10.5 Z14.984
N50 Y10.875 Z15.053
N51 Y11.25 Z15.114
N52 Y11.625 Z15.168
N53 Y12. Z15.215
N54 Y12.375 Z15.254
N55 Y12.75 Z15.286
N56 Y13.125 Z15.312
N57 Y13.5 Z15.331
N58 Y13.875 Z15.344
N59 Y14.25 Z15.35
N60 Y14.625 Z15.351
N61 Y15. Z15.345
N62 Y15.375 Z15.334
N63 Y15.75 Z15.318
N64 Y16.125 Z15.296
N65 Y16.5 Z15.269
N66 Y16.875 Z15.238
N67 Y17.25 Z15.202
N68 Y17.625 Z15.162
N69 Y18. Z15.117
N70 Y18.375 Z15.069
N71 Y18.75 Z15.016
N72 Y19.125 Z14.959
N73 Y19.5 Z14.899
N74 Y20.25 Z14.769
N75 Y21. Z14.623
N76 Y21.75 Z14.466
N77 Y22.5 Z14.297
N78 Y23.25 Z14.119
N79 Y24. Z13.931
N80 Y24.75 Z13.734
N81 Y25.5 Z13.531
N82 Y26.25 Z13.321
N83 Y27. Z13.103
N84 Y27.75 Z12.883
N85 Y28.5 Z12.659

```

N86 Y30. Z12.2
N87 Y33. Z11.264
N88 Y34.5 Z10.798
N89 Y36. Z10.339
N90 Y37.5 Z9.892
N91 Y39. Z9.465
N92 Y39.75 Z9.259
N93 Y40.5 Z9.059
N94 Y41.25 Z8.865
N95 Y42. Z8.679
N96 Y42.75 Z8.5
N97 Y43.5 Z8.33
N98 Y44.25 Z8.168
N99 Y45. Z8.014
N100 Y45.75 Z7.872
N101 Y46.5 Z7.738
N102 Y47.25 Z7.615
N103 Y48. Z7.503
N104 Y48.75 Z7.402
N105 Y49.5 Z7.313
N106 Y50.25 Z7.235
N107 Y51. Z7.17
N108 Y51.75 Z7.118
N109 Y52.5 Z7.078
N110 Y53.25 Z7.053
N111 Y54. Z7.04
N112 Y54.75 Z7.043
N113 Y55.5 Z7.06
N114 Y56.25 Z7.093
N115 Y57. Z7.141
N116 Y57.75 Z7.204
N117 Y58.5 Z7.283
N118 Y59.25 Z7.376
N119 Y60. Z7.486
N120 Y60.75 Z7.61
N121 Y61.5 Z7.751
N122 Y62.25 Z7.907
N123 Y63. Z8.08
N124 Y63.375 Z8.172
N125 Y63.75 Z8.269
N126 Y64.5 Z8.474
N127 Y65.25 Z8.696
N128 Y66. Z8.934
N129 Y66.75 Z9.189
N130 Y67.5 Z9.459
N131 Y68.25 Z9.744
N132 Y69. Z10.044
N133 Y69.75 Z10.36
N134 Y70.5 Z10.689
N135 Y71.25 Z11.032
N136 Y72. Z11.389
N137 Y72.75 Z11.759
N138 Y73.5 Z12.142
N139 Y74.25 Z12.536
N140 Y75. Z12.943
N141 Y75.75 Z13.36
N142 Y76.5 Z13.789
N143 Y77.25 Z14.226
N144 Y78. Z14.671
N145 Y78.75 Z15.123
N146 Y79.5 Z15.583
N147 Y81. Z16.521
N148 Y84. Z18.429
N149 Y85.5 Z19.379
N150 Y86.25 Z19.847
N151 Y87. Z20.308
N152 Y87.75 Z20.764
N153 Y88.5 Z21.211
N154 Y89.25 Z21.649
N155 Y90. Z22.076
N156 Y90.75 Z22.49
N157 Y91.5 Z22.889
N158 Y91.875 Z23.083
N159 Y92.25 Z23.272
N160 Y93. Z23.638
N161 Y93.75 Z23.983
N162 Y94.125 Z24.149
N163 Y94.5 Z24.308
N164 Y94.875 Z24.463
N165 Y95.25 Z24.611
N166 Y95.625 Z24.754
N167 Y96. Z24.89
N168 Y96.375 Z25.02
N169 Y96.75 Z25.142
N170 Y97.125 Z25.257
N171 Y97.5 Z25.365
N172 Y97.875 Z25.465
N173 Y98.25 Z25.558
N174 Y98.625 Z25.643
N175 Y99. Z25.72
N176 Y99.375 Z25.789
N177 Y99.75 Z25.85
N178 Y100.125 Z25.903
N179 Y100.5 Z25.948
N180 Y100.875 Z25.985
N181 Y101.25 Z26.013

N182 Y101.625 Z26.032
N183 Y102. Z26.043
N184 Y102.375 Z26.046
N185 Y102.75 Z26.039
N186 Y103.125 Z26.023
N187 Y103.5 Z25.998
N188 Y103.875 Z25.964
N189 Y104.25 Z25.92
N190 Y104.625 Z25.866
N191 Y105. Z25.802
N192 Y105.375 Z25.727
N193 Y105.75 Z25.641
N194 Y106.125 Z25.543
N195 Y106.5 Z25.434
N196 Y106.875 Z25.313
N197 Y107.25 Z25.179
N198 Y107.625 Z25.034
N199 Y108. Z24.877
N200 Y108.375 Z24.707
N201 Y108.75 Z24.525
N202 Y109.125 Z24.329
N203 Y109.5 Z24.12
N204 Y109.875 Z23.897
N205 Y110.25 Z23.66
N206 Y110.625 Z23.41
N207 Y111. Z23.146
N208 Y111.375 Z22.866
N209 Y111.75 Z22.57
N210 Y112.125 Z22.258
N211 Y112.5 Z21.93
N212 Y112.875 Z21.582
N213 Y113.25 Z21.218
N214 Y113.625 Z20.834

N215 Y114. Z20.431
N216 Y114.375 Z20.006
N217 Y114.75 Z19.563
N218 Y114.937 Z19.334
N219 Y115.125 Z19.096
N220 Y115.312 Z18.857
N221 Y115.5 Z18.609
N222 Y115.687 Z18.358
N223 Y115.875 Z18.1
N224 Y116.062 Z17.838
N225 Y116.25 Z17.569
N226 Y116.437 Z17.295
N227 Y116.625 Z17.015
N228 Y117. Z16.436
N229 Y117.187 Z16.14
N230 Y117.375 Z15.834
N231 Y117.562 Z15.526
N232 Y117.75 Z15.208
N233 Y118.125 Z14.556
N234 Y118.5 Z13.879
N235 Y118.875 Z13.174
N236 Y119.25 Z12.443
N237 Y119.625 Z11.686
N238 Y120. Z10.898
N239 Z18.898
N240 G0 Z36.051
N241 ;End of Path
R5=\$A_HOUR
R6=\$A_MINUTE
R7=\$A_SECOND
R8=\$A_MSECOND
N250 M30

APÊNDICE J - PROGRAMA DA TRAJETÓRIA CINCO EIXOS - X = 25 MM

```

N1 G40 G17 G710 G94 G90 G60
G601 FNORM
N2 ;(*- OPER: 5XL3 -*)
N3 ;(*- FERR: T2 - ESFERICA8 -*)
N4 ; _camtolerance=.005
N5 M58 ;(DESTRAVA EIXO B)
N6 M50 ;(DESTRAVA EIXO C)
N7 TRAFOOF
N8 CYCLE800("0",)
N9 G0 G53 Z610. D0
N10 G0 G53 X-310. Y0.0 D0
N11 T="ESFERICA8" D1
N12 M6
N13 G53 Z610. D0
N14 ;
N15 G0 B0.0 C=DC(0.0)
N16 CYCLE832(0.005,1,1)
N17 TRAORI
N18 G54
R1=$A_HOUR
R2=$A_MINUTE
R3=$A_SECOND
R4=$A_MSECOND
N19 G0 X25. Y-5.639 Z36.051
S12000 D1 M3
N20 Z5.28
N21 G1 Y-5.425 Z5.11 M8 F2500.
N22 Y-5.201 Z4.955
N23 Y-4.966 Z4.815
N24 Y-4.722 Z4.692
N25 Y-4.47 Z4.586
N26 Y-4.212 Z4.497
N27 Y-3.948 Z4.427
N28 Y-3.68 Z4.374
N29 Y-3.409 Z4.34
N30 Y-3.136 Z4.324
N31 Y-2.863 Z4.327
N32 Y-2.591 Z4.349
N33 Y-2.321 Z4.389
N34 Y-2.054 Z4.447
N35 Y-1.792 Z4.524
N36 Y-1.535 Z4.618
N37 Y-1.286 Z4.73
N38 Y-1.045 Z4.858
N39 Y-.813 Z5.002
N40 Y-.592 Z5.162
N41 Y-.382 Z5.337
N42 Y-.184 Z5.525
N43 Y0.0 Z5.727
N44 Y.375 Z6.167 B.094
N45 Y.75 Z6.585 B.188
N46 Y1.125 Z6.983 B.281
N47 Y1.5 Z7.36 B.375
N48 Y1.875 Z7.718 B.469
N49 Y2.25 Z8.058 B.563
N50 Y2.625 Z8.381 B.656
N51 Y3. Z8.686 B.75
N52 Y3.375 Z8.975 B.844
N53 Y3.75 Z9.249 B.938
N54 Y4.125 Z9.508 B1.031
N55 Y4.5 Z9.752 B1.125
N56 Y4.875 Z9.983 B1.219
N57 Y5.25 Z10.2 B1.313
N58 Y5.625 Z10.404 B1.406
N59 Y6. Z10.595 B1.5
N60 Y6.375 Z10.774 B1.594
N61 Y6.75 Z10.94 B1.688
N62 Y7.125 Z11.095 B1.781
N63 Y7.5 Z11.238 B1.875
N64 Y7.875 Z11.37 B1.969
N65 Y8.25 Z11.491 B2.063
N66 Y8.625 Z11.602 B2.156
N67 Y9. Z11.703 B2.25
N68 Y9.375 Z11.795 B2.344
N69 Y9.75 Z11.878 B2.438
N70 Y10.125 Z11.952 B2.531
N71 Y10.5 Z12.018 B2.625
N72 Y10.875 Z12.076 B2.719
N73 Y11.25 Z12.126 B2.813
N74 Y11.625 Z12.167 B2.906
N75 Y12. Z12.202 B3.
N76 Y12.375 Z12.229 B3.094
N77 Y12.75 Z12.249 B3.188
N78 Y13.125 Z12.262 B3.281
N79 Y13.5 Z12.268 B3.375
N80 Y13.875 Z12.267 B3.469
N81 Y14.25 Z12.26 B3.563
N82 Y14.625 Z12.247 B3.656
N83 Y15. Z12.227 B3.75
N84 Y15.375 Z12.202 B3.844

```

N85 Y15.75 Z12.171 B3.938
N86 Y16.125 Z12.135 B4.031
N87 Y16.5 Z12.094 B4.125
N88 Y16.875 Z12.048 B4.219
N89 Y17.25 Z11.997 B4.313
N90 Y17.625 Z11.942 B4.406
N91 Y18. Z11.882 B4.5
N92 Y18.75 Z11.751 B4.688
N93 Y19.5 Z11.605 B4.875
N94 Y20.25 Z11.445 B5.063
N95 Y21. Z11.272 B5.25
N96 Y21.75 Z11.087 B5.438
N97 Y22.5 Z10.892 B5.625
N98 Y23.25 Z10.688 B5.813
N99 Y24. Z10.476 B6.
N100 Y24.75 Z10.257 B6.188
N101 Y25.5 Z10.031 B6.375
N102 Y26.25 Z9.801 B6.563
N103 Y27. Z9.566 B6.75
N104 Y27.75 Z9.327 B6.938
N105 Y28.5 Z9.087 B7.125
N106 Y30. Z8.602 B7.5
N107 Y31.5 Z8.116 B7.875
N108 Y33. Z7.634 B8.25
N109 Y33.75 Z7.396 B8.438
N110 Y34.5 Z7.161 B8.625
N111 Y35.25 Z6.929 B8.813
N112 Y36. Z6.702 B9.
N113 Y36.75 Z6.479 B9.188
N114 Y37.5 Z6.262 B9.375
N115 Y38.25 Z6.05 B9.563
N116 Y39. Z5.845 B9.75
N117 Y39.75 Z5.647 B9.938
N118 Y40.5 Z5.456 B10.125
N119 Y41.25 Z5.273 B10.313
N120 Y42. Z5.098 B10.5
N121 Y42.75 Z4.932 B10.688
N122 Y43.5 Z4.774 B10.875
N123 Y44.25 Z4.626 B11.063
N124 Y45. Z4.488 B11.25
N125 Y45.75 Z4.36 B11.438
N126 Y46.5 Z4.242 B11.625
N127 Y47.25 Z4.135 B11.813
N128 Y48. Z4.04 B12.
N129 Y48.75 Z3.955 B12.188
N130 Y49.5 Z3.883 B12.375
N131 Y50.25 Z3.822 B12.563
N132 Y51. Z3.773 B12.75
N133 Y51.75 Z3.737 B12.938
N134 Y52.5 Z3.713 B13.125
N135 Y53.25 Z3.703 B13.313
N136 Y54. Z3.706 B13.5
N137 Y54.75 Z3.722 B13.688
N138 Y55.5 Z3.752 B13.875
N139 Y56.25 Z3.797 B14.063
N140 Y57. Z3.855 B14.25
N141 Y57.75 Z3.926 B14.438
N142 Y58.5 Z4.012 B14.625
N143 Y59.25 Z4.111 B14.813
N144 Y60. Z4.223 B15.
N145 Y60.75 Z4.349 B15.188
N146 Y61.5 Z4.489 B15.375
N147 Y62.25 Z4.642 B15.563
N148 Y63. Z4.809 B15.75
N149 Y63.75 Z4.99 B15.938
N150 Y64.5 Z5.184 B16.125
N151 Y65.25 Z5.392 B16.313
N152 Y66. Z5.613 B16.5
N153 Y66.75 Z5.846 B16.688
N154 Y67.5 Z6.091 B16.875
N155 Y68.25 Z6.348 B17.063
N156 Y69. Z6.617 B17.25
N157 Y69.75 Z6.896 B17.438
N158 Y70.5 Z7.186 B17.625
N159 Y71.25 Z7.486 B17.813
N160 Y72. Z7.795 B18.
N161 Y72.75 Z8.114 B18.188
N162 Y73.5 Z8.442 B18.375
N163 Y74.25 Z8.778 B18.563
N164 Y75. Z9.121 B18.75
N165 Y75.75 Z9.471 B18.938
N166 Y76.5 Z9.827 B19.125
N167 Y77.25 Z10.188 B19.313
N168 Y78. Z10.555 B19.5
N169 Y79.5 Z11.299 B19.875
N170 Y81. Z12.053 B20.25
N171 Y82.5 Z12.81 B20.625
N172 Y84. Z13.562 B21.
N173 Y84.75 Z13.934 B21.188
N174 Y85.5 Z14.3 B21.375
N175 Y86.25 Z14.661 B21.563
N176 Y87. Z15.016 B21.75
N177 Y87.75 Z15.363 B21.938
N178 Y88.5 Z15.702 B22.125
N179 Y89.25 Z16.031 B22.313
N180 Y90. Z16.35 B22.5

N181 Y90.75 Z16.657 B22.688
N182 Y91.5 Z16.95 B22.875
N183 Y92.25 Z17.228 B23.063
N184 Y92.625 Z17.361 B23.156
N185 Y93. Z17.489 B23.25
N186 Y93.375 Z17.613 B23.344
N187 Y93.75 Z17.733 B23.438
N188 Y94.125 Z17.847 B23.531
N189 Y94.5 Z17.957 B23.625
N190 Y94.875 Z18.061 B23.719
N191 Y95.25 Z18.159 B23.813
N192 Y95.625 Z18.252 B23.906
N193 Y96. Z18.338 B24.
N194 Y96.375 Z18.417 B24.094
N195 Y96.75 Z18.49 B24.188
N196 Y97.125 Z18.555 B24.281
N197 Y97.5 Z18.613 B24.375
N198 Y97.875 Z18.664 B24.469
N199 Y98.25 Z18.707 B24.563
N200 Y98.625 Z18.742 B24.656
N201 Y99. Z18.769 B24.75
N202 Y99.375 Z18.787 B24.844
N203 Y99.75 Z18.797 B24.938
N204 Y100.125 Z18.799 B25.031
N205 Y100.5 Z18.791 B25.125
N206 Y100.875 Z18.775 B25.219
N207 Y101.25 Z18.75 B25.313
N208 Y101.625 Z18.715 B25.406
N209 Y102. Z18.671 B25.5
N210 Y102.375 Z18.616 B25.594
N211 Y102.75 Z18.551 B25.688
N212 Y103.125 Z18.476 B25.781
N213 Y103.5 Z18.389 B25.875
N214 Y103.875 Z18.291 B25.969
N215 Y104.25 Z18.181 B26.063
N216 Y104.625 Z18.058 B26.156
N217 Y105. Z17.922 B26.25
N218 Y105.375 Z17.773 B26.344
N219 Y105.75 Z17.612 B26.438
N220 Y106.125 Z17.437 B26.531
N221 Y106.5 Z17.25 B26.625
N222 Y106.875 Z17.049 B26.719
N223 Y107.25 Z16.835 B26.813
N224 Y107.625 Z16.608 B26.906
N225 Y108. Z16.367 B27.
N226 Y108.375 Z16.112 B27.094
N227 Y108.75 Z15.843 B27.188
N228 Y109.125 Z15.559 B27.281
N229 Y109.5 Z15.261 B27.375
N230 Y109.875 Z14.948 B27.469
N231 Y110.25 Z14.619 B27.563
N232 Y110.625 Z14.276 B27.656
N233 Y111. Z13.916 B27.75
N234 Y111.375 Z13.541 B27.844
N235 Y111.75 Z13.149 B27.938
N236 Y112.125 Z12.743 B28.031
N237 Y112.5 Z12.321 B28.125
N238 Y112.875 Z11.883 B28.219
N239 Y113.25 Z11.432 B28.313
N240 Y113.625 Z10.966 B28.406
N241 Y114. Z10.486 B28.5
N242 Y114.375 Z9.992 B28.594
N243 Y114.75 Z9.485 B28.688
N244 Y115.125 Z8.964 B28.781
N245 Y115.5 Z8.43 B28.875
N246 Y115.875 Z7.884 B28.969
N247 Y116.25 Z7.327 B29.063
N248 Y116.625 Z6.759 B29.156
N249 Y117. Z6.181 B29.25
N250 Y117.375 Z5.592 B29.344
N251 Y117.75 Z4.994 B29.438
N252 Y118.125 Z4.386 B29.531
N253 Y118.5 Z3.77 B29.625
N254 Y118.875 Z3.145 B29.719
N255 Y119.062 Z2.83 B29.766
N256 Y119.109 Z2.751 B29.777
N257 Y119.111 Z2.748 B29.778
N258 X28.973 Z9.692
N259 G0 X44.056 Z36.051
N260 ;End of Path
R5=\$A_HOUR
R6=\$A_MINUTE
R7=\$A_SECOND
R8=\$A_MSECOND
N261 TRAF00F
N269 M30