



CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO E TECNOLOGIA

INDUSTRIAL

Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial

Dissertação de Mestrado

**ESTUDO DOS IMPACTOS DA TOLERÂNCIA
CAM E DA RESOLUÇÃO DE PROGRAMAS CN
SOBRE A PRECISÃO DE TRAJETÓRIAS DE
FERRAMENTA PARA MICROFRESAMENTO**

Apresentada por: Marcus Vinícius Pascoal Ramos

Orientador: Dr. Guilherme Oliveira de Souza

Janeiro de 2019

Marcus Vinícius Pascoal Ramos

**ESTUDO DOS IMPACTOS DA TOLERÂNCIA
CAM E DA RESOLUÇÃO DE PROGRAMAS CN
SOBRE A PRECISÃO DE TRAJETÓRIAS DE
FERRAMENTA PARA MICROFRESAMENTO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Tecnologia Industrial, Curso de Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial do CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC, como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial**.

Área de conhecimento: Engenharia e Tecnologia de Processos

Orientador: Dr. Guilherme Oliveira de Souza

Salvador

2019

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

R165e Ramos, Marcus Vinicius Pascoal

Estudos dos impactos da tolerância CAM e da resolução de programas CN sobre a precisão de trajetórias de ferramentas para microfresamento / Marcus Vinicius Pascoal Ramos. – Salvador, 2019.

128 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Oliveira de Souza.

Dissertação (Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2019.
Inclui referências.

1. Microfresamento. 2. Software CAM. 3. Trajetória de ferramenta. 4. Tolerância. I. Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Souza, Guilherme Oliveira de. III. Título.

CDD: 671.35

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC

Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia Industrial

A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, aprova a Defesa de Mestrado, intitulada "Estudo dos impactos da tolerância CAM e da Resolução de Programas CN sobre a Precisão de Trajetórias de Ferramenta para Microfresamento" apresentada no dia 29 de janeiro de 2019, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial.

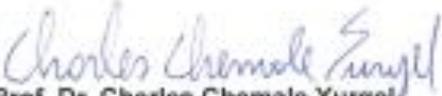
Orientador:


Prof. Dr. **Guilherme Oliveira de Souza**
SENAI CIMATEC

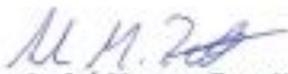
Membro Interno:


Prof. Dr. **Rodrigo Santiago Coelho**
SENAI CIMATEC

Membro Externo:


Prof. Dr. **Charles Chemale Yurgel**
FIEB

Membro Externo:


Prof. Dr. **André Marcon Zanatta**
SENAI MG

Dedico este trabalho à minha mãe, Rose Mary Pascoal.

Agradecimentos

A conclusão desta dissertação contou com o apoio de diversas pessoas, sem as quais nada disso seria possível. Por estas, serei eternamente grato!

Ao professor orientador Guilherme Souza pela paciência nas orientações, forma de conduzir e inspirar, além dos incentivos que tornaram possível a conclusão deste trabalho.

À minha família, pelo apoio, compreensão, alegria e estímulo constante.

À minha namorada, Fabiana Farine, pela paciência, companheirismo e pelo tempo de convívio, muitas vezes sacrificado para realização deste trabalho.

Aos colegas de trabalho do Instituto Federal da Bahia (IFBA), Leandro Miranda, Thiago Souto e Maurício Porto, pelo apoio e incentivo constantes.

Ao professor Élvio Prado, amigo e colega de trabalho, que durante o período de convívio no IFBA me apresentou o \LaTeX , além de ter contribuído com suas sábias orientações, sobretudo, por me dar lições de vida.

Aos colegas do SENAI CIMATEC, em especial, a Leandro Roseira, pelo companheirismo durante todo o curso e desenvolvimento deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Tecnologia Industrial do SENAI CIMATEC (PPGGETEC) na forma de seus professores e funcionários.

Por fim, a difícil tarefa de, em poucas palavras, transmitir um agradecimento especial à minha mãe, Rose Mary Pascoal, que durante anos me ensinou a viver com dignidade e correr atrás dos meus objetivos, a nunca desistir. Te agradeço, mãe, pelo apoio incondicional demonstrado e ajuda na superação dos obstáculos que ao longo desta caminhada foram surgindo. Neste momento a emoção me cala, mas com a certeza de oferecer-lhe esta vitória.

Salvador, Brasil
dia 4 de abril de 2019

Marcus Vinícius Pascoal Ramos

Resumo

Nas operações de microfresamento uma das grandes preocupações é com a precisão das trajetórias de ferramenta geradas pelos softwares CAM, que precisa atender aos requisitos de precisão micrométricos e submicrométricos. Neste sentido, com a finalidade de avaliar tal aspecto, o critério adotado nesta dissertação para medir esta precisão é o do cálculo dos desvios de trajetória de ferramenta. Desta forma, considerando que a tolerância CAM está diretamente relacionada com a precisão da trajetória gerada, esta pesquisa possui como principal objetivo, estudar os impactos da variação deste fator, bem como dos efeitos da resolução de programas CN sobre a precisão de trajetórias de ferramenta para aplicações em microfresamento. Para isto, foram realizados experimentos utilizando softwares CAM comercialmente disponíveis, com condições representativas das escalas micrométrica e submicrométrica, levando em consideração a influência dos fatores, raio de curvatura convexa de uma geometria, diâmetro da ferramenta, tolerância CAM e resolução de programas CN, além dos impactos de se gerarem trajetórias de ferramenta a partir de arquivos CAD importados em formatos padronizados. A avaliação dos resultados permitiu concluir que, não foram identificadas diferenças significativas para os fatores isolados e suas interações, exceto para a tolerância CAM. A tolerância de 0,01 mm apresentou o maior desvio, entretanto, para as tolerâncias de 0,001 mm e 0,0001 mm, não foram evidenciadas diferenças estatísticas significativas. Do efeito da resolução sobre a precisão de trajetórias foi possível notar que, de modo geral, de nada adianta criar um programa ou gerar trajetórias de ferramenta no software CAM com tolerâncias rigorosas para máquinas CNC's que limitam a resolução deste programa. Para os diferentes softwares CAM avaliados, os resultados remetem à possibilidade de se gerarem trajetórias de ferramenta em softwares que não possuem módulos dedicados à estas aplicações. Por fim, a análise da importação de arquivos em formatos padronizados nos desvios de trajetória de ferramenta não pôde ser concluída, pois, devido ao fato da geometria utilizada ser cilíndrica e de fácil conversão, os desvios foram iguais, portanto, não sendo possível realizar uma análise comparativa entre os softwares.

Palavras chave: Microfresamento; CAM; Trajetória de Ferramenta; Tolerância.

Abstract

In micromilling operations, one of the main concerns is the precision of the tool paths generation by the CAM software, which must meet micrometric and submicron precision requirements. In this sense, in order to evaluate this aspect, the criterion adopted in this dissertation to measure this precision is the calculation of tool path deviations. Thus, considering that the tolerance CAM is directly related to the precision of the trajectory generated, this research has as main objective, to study the impacts of the variation of this factor, as well as the effects of the resolution of NC programs on the precision of tool path for micromilling applications. For this, experiments were performed using commercially available CAM software, with conditions representative of the micrometric and submicrometric scales, taking into account the influence of the factors, convex radius of curvature of a geometry, tool diameter, tolerance CAM and program NC resolution, besides of the impacts of generating tool path from imported CAD files in standardized formats. The evaluation of the results allowed to conclude that, no significant differences were identified for the isolated factors and their interactions, except for the tolerance CAM. The tolerance of 0.01 mm showed the greatest deviation, however, for the tolerances of 0.001 mm and 0.0001 mm, no significant statistical differences were evidenced. From the effect of the resolution on the accuracy of trajectories it was possible to notice that, in general, there is no point in creating a program or generating tool trajectories in the CAM software with strict tolerances for CNC machines that limit the resolution of this program. For the different softwares CAM evaluated, the results refer to the possibility of generating tool trajectories in software that do not have modules dedicated to these applications. Finally, the analysis of the import of files in standardized formats in the tool path deviations could not be completed, because, due to the fact that the geometry used was cylindrical and easy to convert, the deviations were the same, so it was not possible to perform a comparative analysis between software.

Keywords: Micromilling; CAM; Tool Path; Tolerance.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Justificativa	3
1.2	Objetivo	4
1.3	Delineamento Experimental	5
1.4	Organização da Dissertação	6
2	Referencial Teórico	7
2.1	Microusinagem	7
2.2	Microfresamento	11
2.3	Microfresamento <i>versus</i> Fresamento Convencional	16
2.4	Efeito de Escala e Amassamento no Microfresamento	18
2.4.1	Raio da Aresta de Corte	20
2.4.2	Efeitos da Microestrutura do Material	22
2.5	Formação de Rebarbas no Microfresamento	24
2.6	Programação Auxiliada por Computador	26
2.7	Introdução aos Sistemas CAM (<i>Computer Aided Manufacturing</i>)	29
2.8	Trajatória de Ferramenta e Tolerância CAM	36
2.9	Sistemas CAM Comerciais	39
2.10	Características Desejáveis no Software CAM para Aplicações em Microfresamento	46
3	Trabalho Experimental e Desenvolvimento da Pesquisa	52
3.1	Cálculo dos Desvios de Trajetória	52
3.1.1	Desvio CC de Trajetória de Ferramenta (Δ_{cc})	54
3.1.2	Desvio Cordal de Trajetória de Ferramenta (Δ_{co})	58
3.2	Método para Análise da Precisão das Trajetórias de Ferramenta	63
3.3	Tolerância CAM e Fatores Geométricos Sobre a Precisão da Trajetória de Ferramenta	64
3.4	Resolução de Programas CN e Tolerância de Trajetória CAM	66
3.5	Cálculo dos Desvios de Trajetória em Softwares CAM Distintos	67
3.6	Procedimento de Importação e Exportação de Arquivos em Formatos Padronizados	68
4	Resultados e Discussões	70
4.1	Análise da Variação dos Fatores nos Desvios de Trajetória da Ferramenta	70
4.1.1	Análise de Significância dos Fatores	70
4.1.2	Análise dos Efeitos Principais	72
4.1.3	Análise de Interações Entre os Fatores	73
4.2	Análise dos Efeitos da Resolução dos Programas CN e Tolerância CAM sobre os Desvios de Trajetória de Ferramenta	74
4.3	Análise dos Desvios de Trajetórias Geradas em Diferentes Softwares CAM	78
4.4	Análise da Influência da Troca de Dados Geométricos nos Desvios	83
5	Considerações finais	85
5.1	Sugestão Para Trabalhos Futuros	87

Apêndice A Softwares CAD-CAM Comerciais	88
A.1 Principais Desenvolvedores de Softwares CAD-CAM e Seus Produtos . . .	88
Apêndice B Análise de Variância para os Desvios	90
B.1 Análise de Variância (ANOVA) para o Desvio Médio do programa CN . . .	90
B.2 Análise de Variância (ANOVA) para o Desvio Máximo do Programa CN .	90
Apêndice C Desvios de Trajetória de Ferramenta	91
C.1 Desvios de Trajetória Calculados para o Software <i>Inventor HSM</i>	91
C.2 Desvios de Trajetória Calculados para cada Software CAM	92
C.3 Desvios de Trajetória Calculados pelos Softwares CAM - Formatos IGES e STEP	93
Referências	94

Lista de Tabelas

4.1	Desvios médios calculados em função da tolerância CAM e resolução de programas CN	78
4.2	Desvios máximos calculados em função da tolerância CAM e resolução de programas CN	78
4.3	Percentual de erros de precisão de trajetória em cada software CAM para a tolerância de 0,0001 mm	82
A.1	Softwares CAD-CAM Comerciais (<i>Continua</i>)	88
B.1	Análise de Variância para o Desvio Médio do programa CN	90
B.2	Análise de Variância para o Desvio Máximo do programa CN	90
C.1	Desvios de Trajetória para o Programa CN - Raio de Geometria de 10 mm	91
C.2	Desvios de Trajetória para o Programa CN - Raio de Geometria de 1 mm	91
C.3	Desvios de Trajetória para o Programa CN - Raio de Geometria de 0,5 mm	92
C.4	Desvios de Trajetória Calculados para cada Software CAM - Raio de Geometria 0,5 mm e Diâmetro de Ferramenta de 0,1 mm	92
C.5	Desvios de Trajetória Calculados pelos Softwares CAM para Trajetórias Geradas em Arquivos no Formato IGES	93
C.6	Desvios de Trajetória Calculados pelos Softwares CAM para Trajetórias Geradas em Arquivos no Formato STEP	93

Lista de Figuras

1.1	Criação de um programa CN a partir do modelo CAD	2
2.1	Microcomponentes: a) microlentes, b) microengrenagem e c) microconector para sensor de temperatura	8
2.2	À esquerda, microfábrica tele-operada portátil, à direita, microtorno	9
2.3	Fresa de topo reto de 6 mm de diâmetro (à esquerda) e microfresa de 200 μm (à direita)	12
2.4	Comparação entre uma microbroca e a pata de uma formiga (à esquerda), comparação entre uma microfresa e um fio de cabelo (à direita)	12
2.5	Evolução do número de publicações sobre microfresamento	13
2.6	Evolução do número de publicações sobre microfresamento por ano	13
2.7	Número de artigos publicados sobre microfresamento por país	14
2.8	À esquerda: Evolução do número de publicações sobre microfresamento por ano. Palavra-chave: <i>micromilling</i> . À direita: Evolução do número de publicações sobre microfresamento por ano. Palavra-chave: <i>micro</i> e <i>milling</i>	15
2.9	Número de publicações sobre microfresamento por país. Palavra-chave: <i>micro</i> e <i>milling</i> e <i>micromilling</i>	16
2.10	Principais países com registro de patentes no período de 2008 a 2018	16
2.11	Detalhe do raio de arredondamento da aresta de corte na macrousinagem	17
2.12	a) Aresta de corte no fresamento convencional e b) Aresta de corte no microfresamento	17
2.13	Influência do raio de aresta de corte no microfresamento quando $h < h_{min}$	21
2.14	Influência do raio de aresta de corte no microfresamento quando $h = h_{min}$	21
2.15	Influência do raio de aresta de corte no microfresamento quando $h > h_{min}$	21
2.16	Processo de simulação da formação do cavaco, considerando em a) $h = 0,1 r_h$ ($0,2 \mu\text{m}$); b) $h = 0,2 r_h$ ($0,4 \mu\text{m}$) e c) $h = 0,3 r_h$ ($0,6 \mu\text{m}$)	22
2.17	Relação entre o tamanho de grão e a espessura de usinagem em macroescala (a) e microescala (b)	23
2.18	Grãos de aço carbono 1045: a) Material convencional e b) Material com refino de grão	24
2.19	Formação de rebarba no microfresamento	25
2.20	Resultado do microfresamento da liga de titânio TiAl6V4. a) Superfície com severa formação de rebarbas e b) Superfície com redução na formação de rebarbas	25
2.21	Rebarba de topo (<i>top burr</i>) no microfresamento: a) Fresamento concordante (<i>down milling</i>) e b) Fresamento discordante (<i>up milling</i>)	26
2.22	Testes sendo realizados no computador <i>Whirlwind</i> no MIT em 1951	27
2.23	Sistema de projeto assistido por computador (CAD) - General Motors DAC-1	27
2.24	Erro radial e de corda na trajetória de ferramenta em uma curva paramétrica	36
2.25	Tamanhos dos segmentos de reta de um programa CN	37
2.26	Pontos de referência na ferramenta de corte para as coordenadas CL	38
2.27	Diferentes posição de usinagem em uma superfície	38
2.28	Cálculo do ponto CL a partir do ponto CC	39
2.29	Análise global de mercado para softwares CAM no segmento high-end	40

2.30	À esquerda, o software <i>Cimatron</i> simulando a usinagem, à direita, a peça já usinada	44
3.1	Esquema dos experimentos realizados	52
3.2	Representação para o cálculo do desvio CC de trajetória de ferramenta	55
3.3	Representação geométrica do triângulo <i>ABC</i> para determinação do ângulo de direção normal θ	55
3.4	Representação geométrica do triângulo <i>GDC</i> para a determinação de X_{cc} e Z_{cc}	55
3.5	Representação geométrica do triângulo <i>AB'C'</i> para a determinação de $Z_{c'}$	57
3.6	Representação geométrica do triângulo <i>EFG</i> para o cálculo do desvio de trajetória de ferramenta (Δ_{cc})	57
3.7	Representação para o cálculo do desvio cordal de trajetória de ferramenta	58
3.8	Representação geométrica do triângulo <i>GHI</i> para determinação do ângulo de direção normal θ	59
3.9	Representação geométrica do triângulo <i>JKI</i> para a determinação de X_{co} e Z_{co}	59
3.10	Representação geométrica do triângulo <i>GH'I'</i> para a determinação de $Z_{Cco'}$	60
3.11	Representação geométrica do triângulo <i>MNI'</i> para a determinação da posição ideal local $X_{co'}$ e $Z_{co'}$	61
3.12	Representação do triângulo <i>JLM</i> para o cálculo do desvio cordal de trajetória de ferramenta (Δ_{co})	62
3.13	Representação dos fatores e níveis de controle utilizados	65
3.14	Diagrama esquemático do experimento	66
3.15	Fatores de controle, níveis e respostas da pesquisa para análise dos fatores geométricos de peça, ferramenta e tolerância CAM	66
3.16	Fatores de controle, níveis e respostas da pesquisa para análise da resolução e tolerância CAM	67
3.17	Diagrama esquemático do experimento	68
3.18	Fatores de controle, níveis e respostas para análise de desvios dos softwares CAM	68
3.19	Esquema utilizado para cálculos dos desvios a partir de formatos padronizados	69
4.1	Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para os fatores analisados sobre os desvios médios de trajetória obtidos a partir do programa CN	70
4.2	Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para os fatores analisados sobre os desvios máximos de trajetória obtidos a partir do programa CN	72
4.3	Gráfico de efeitos principais para os desvios médios obtidos a partir do programa CN	72
4.4	Gráfico de efeitos principais para os desvios máximos obtidos a partir do programa CN	72
4.5	Gráfico de interação para os desvios médios obtidos a partir do programa CN	73
4.6	Gráfico de interação para os desvios máximos obtidos a partir do programa CN	73
4.7	Gráfico de Pareto para os desvios médios obtidos a partir do programa CN	75
4.8	Gráfico de efeitos principais para os desvios médios obtidos a partir do programa CN	75
4.9	Gráfico de Pareto do fator tolerância para os desvios médios obtidos a partir do programa CN	76
4.10	Gráfico de efeitos principais do fator tolerância para os desvios médios obtidos a partir do programa CN	77

4.11	Gráfico de Pareto do fator resolução para os desvios médios obtidos a partir do programa CN	77
4.12	Gráfico de efeitos principais do fator resolução para os desvios médios obtidos a partir do programa CN	77
4.13	Gráfico de Pareto dos fatores software CAM e tolerância para os desvios médios obtidos a partir do programa CN	79
4.14	Gráfico de efeitos principais dos fatores software CAM e tolerância para os desvios médios obtidos a partir do programa CN	79
4.15	Gráfico de barras dos desvios médios calculados pelos softwares CAM . . .	79
4.16	Gráfico de barras dos desvios médios calculados pelos softwares CAM para a tolerância de 0,0001 mm	80
4.17	Gráfico de Pareto dos fatores software CAM e tolerância para os desvios máximos obtidos a partir do programa CN	80
4.18	Gráfico de efeitos principais dos fatores software CAM e tolerância para os desvios máximos obtidos a partir do programa CN	81
4.19	Gráfico de barras dos desvios máximos calculados pelos softwares CAM . .	82
4.20	Gráfico de barras dos desvios máximos calculado pelos softwares CAM para a tolerância de 0,0001 mm	82
4.21	Gráfico de barras dos desvios médios calculados pelos softwares CAM para trajetórias geradas em arquivos no formato IGES	83
4.22	Gráfico de barras dos desvios máximos calculados pelos softwares CAM para trajetórias geradas em arquivos no formato IGES	84

Lista de Siglas

ADAPT ...	<i>Adaptation of APT</i>
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
APT	<i>Automatic Programming Tool/Ferramenta Programada Automaticamente</i>
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
CAD	<i>Computer Aided Design/Projeto Auxiliado por computador</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering/Engenharia Auxiliada por Computador</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing/Manufatura Auxiliada por Computador</i>
CAPP	<i>Computer Aided Process Planning/Planejamento Auxiliado por Computador</i>
CAQ	<i>Computer Aided Quality/Qualidade Auxiliada por Computador</i>
CAX	<i>Computer Aided Technologies/Tecnologias Auxiliadas por Computador</i>
CC	<i>Cutter Contact/Pontos de contato da ferramenta</i>
CL	<i>Cutter Location/Pontos de localização da ferramenta</i>
CLDATA .	<i>Cutter Location Data/Arquivo com pontos de localização da ferramenta</i>
CN	<i>Numerical Control/Comando ou Controle Numérico</i>
CNC	<i>Computer Numerical Control/Comando Numérico Computadorizado</i>
DAC	<i>Design Augmented by Computer/Projeto Ampliado por Computador</i>
DoE	<i>Design of Experiments/Projeto de experimentos</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung/Instituto Alemão de Normalização</i>
ECM	<i>Electrochemical Machining/Usinagem eletroquímica</i>
EDM	<i>Electrical Discharge Machining/Eletroerosão</i>
FEM	<i>Finite Element Method/Método dos Elementos Finitos</i>
HSM(C) ..	<i>High Speed Machining (or Cutting)/Usinagem a alta velocidade de corte</i>
IBM	<i>International Business Machines</i>
IDDyn	<i>Índice de Desempenho Dinâmico</i>
IGES	<i>International Graphics Exchange Standard</i>
IPT	<i>Fraunhofer Institute for Production Technology</i>
ISO	<i>International Standards Organization/Organização Internacional de Padrões</i>
MEMS	<i>Microelectromechanical Systems/Sistemas Microeletromecânicos</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MST	<i>Microsystems Technology/Tecnologia de Microsistemas</i>
NURBS ...	<i>Non Uniform B-Splines</i>
SAGE	<i>Semi-Automatic Ground Environment</i>
STEP	<i>Standard for the Exchange of Product Model Data</i>
STL	<i>Stereolithography/Estereografia</i>
VDA-FS ..	<i>Verband Der Automobilindustrie – Flächenschnittstelle</i>

Introdução

Atualmente, é quase impossível avaliar como seriam alguns dispositivos sem que o processo de miniaturização estivesse inserido nestas tecnologias. Com o passar dos anos, o potencial de miniaturização dos produtos continuou a crescer ao tempo em que surgiram inúmeros desafios técnicos associados. As peças foram diminuindo, na proporção em que aumentaram em complexidade. Essa tendência à miniaturização de produtos e componentes de produtos, cujas dimensões podem ser medidas em micrômetros ($1 \mu\text{m} = 10^{-3} \text{ mm}$), alimenta a demanda por novas tecnologias de microengenharia motivadas pela busca de melhores desempenhos, menores custos e alta qualidade.

As crescentes demandas relacionadas ao uso de diferentes materiais e geometrias complexas levaram ao desenvolvimento de uma variedade de processos de microfabricação, alguns dos quais derivam de seus processos convencionais em macroescala, como por exemplo, microtorneamento, microfresamento e microfuração. Dentre estas tecnologias, a usinagem é um dos principais processos de fabricação utilizados para a fabricação de micropeças e, em particular, o microfresamento vem recebendo destaque.

Sua vantagem mais atraente advém da capacidade de fabricação de geometrias tridimensionais complexas, em vários materiais, formas e interfaces funcionais, além da possibilidade da usinagem de componentes com elevada esbeltez (*aspect ratios*). Importantes áreas de aplicação desta tecnologia são as de equipamentos médicos e implantes dentários, desenvolvimento de aeronaves, eletrodomésticos, indústrias automotivas, de telecomunicações, de informática e eletrônica (SCHMIDT; TRITSCHLER, 2004) (RODRIGUES, 2014) (GHERMAN et al., 2017) (KATHAVATE; CHEKE; ADKINE, 2015)(THEPSONTHI; ÖZEL, 2014) (POPOV, 2006).

Quando comparado com a eletroerosão e processos de usinagem a laser, o microfresamento permite uma das maiores taxas de remoção de material e melhor acabamento superficial (FLEISCHER; KOTSCHENREUTHER, 2007).

No entanto, a aplicação industrial do microfresamento ainda depende de mais conhecimento e compreensão dos fenômenos envolvidos neste processo, como, por exemplo, no desgaste e desalinhamento da ferramenta, formação de rebarbas, vibrações, estratégias de usinagem e na qualidade da superfície resultante (UHLMANN E.; ROEDER, 2011) (KATHAVATE; CHEKE; ADKINE, 2015).

Ao ampliar a aplicação desta tecnologia, várias restrições de fabricação ainda permanecem, pois, ainda existem grandes desafios a serem superados quando se remete aos resultados

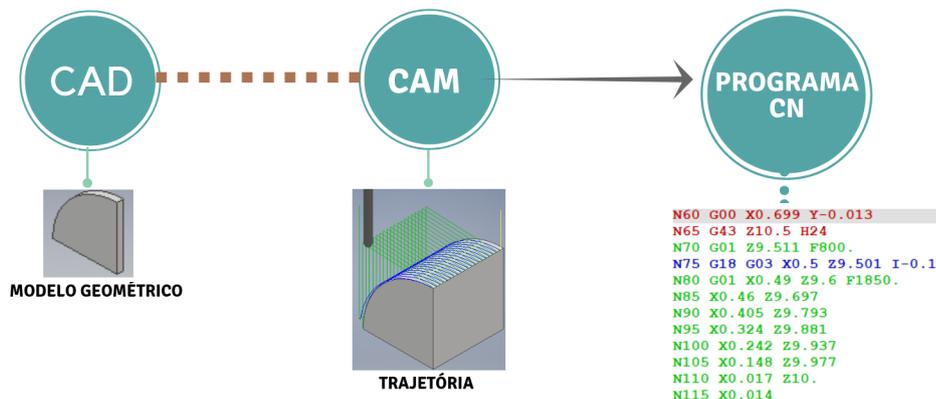
esperados e o que é conseguido na prática. Problemas relacionados ao efeito de escala (*size effect*), requisitos dimensionais e de superfície, estritamente dependentes da peça, ferramenta de corte e máquinas-ferramenta, são exemplos.

Para apoiar adequadamente essa tecnologia, devido à escala micro e à complexidade das geometrias processadas, é necessário suporte computacional para a sua realização, o que é feito por meio de tecnologias CNC (Comando Numérico Computadorizado), CAD (*Computer Aided Design*) e CAM (*Computer Aided Manufacturing*). O papel desta última tecnologia é o de gerar trajetórias de ferramenta que serão posteriormente transformadas em programas CN (Comando Numérico) para serem executados em máquinas CNC.

As trajetórias de ferramenta são calculadas a partir de um modelo geométrico 3D gerado em um software CAD em um processo conhecido como *Tool Path Generation* (Geração de Trajetória de Ferramenta). Para isto, os sistemas CAM disponibilizam rotinas parametrizáveis que, além do modelo geométrico da peça, levam em consideração outras informações, como as da geometria de ferramenta, do padrão de movimentação a ser adotado, das grandezas de penetração a_p (profundidade de usinagem) e a_e (penetração de trabalho) e da tolerância geométrica. Este último parâmetro deve informar o quanto é tolerável que a trajetória de ferramenta calculada pelo CAM se afaste da geometria de referência, o modelo CAD da peça e, portanto, tem forte relação com a precisão da operação de fresamento que utilizará o programa CN gerado.

O que resulta desse processo é um arquivo nativo, conhecido como CLDATA (*Cutter Location Data File*) que consiste basicamente de uma sucessão de pontos de localização de ferramenta, conhecidos como CL (*Cutter Location*), pelos quais a ferramenta deve passar. O programa CN é criado a partir do arquivo CLDATA na etapa de pós-processamento, que traduz a trajetória de ferramenta para uma linguagem apropriada para o CNC da máquina em que a operação será executada (CHOI; JERARD, 2012). A Figura 1.1 ilustra o processo de geração do programa CN a partir de um modelo geométrico CAD.

Figura 1.1: Criação de um programa CN a partir do modelo CAD



Fonte: elaborado pelo autor

Para o microfresamento, além de características específicas que os softwares CAD-CAM devem possuir, alguns fatores devem ser levados em consideração, como por exemplo, erros que podem ocorrer durante a tradução do modelo CAD para o software CAM, capacidade de homogeneizar as solicitações sobre a ferramenta durante o corte, o algoritmo usado para calcular a trajetória em sistemas CAM precisa produzir trajetórias de ferramenta otimizadas e com tolerâncias de movimento mais rigorosas, além de considerar o sobrematerial remanescente entre as etapas do processo (GHERMAN et al., 2017). Dentre estes fatores, uma das grandes preocupações é com a utilização de tolerâncias CAM e resolução de programas CN que garantam a precisão necessária das trajetórias de ferramenta para os requisitos específicos do microfresamento.

Neste sentido, esta dissertação aborda, de modo particular, os impactos de se adotar diferentes valores de tolerância CAM e de resolução de programas CN sobre a precisão de trajetórias de ferramenta para microfresamento e analisa as consequências de se gerarem trajetórias de ferramenta a partir de modelos CAD importados por meio de arquivos de formatos padronizados.

1.1 Justificativa

Apesar do aumento significativo no número de trabalhos publicadas nos últimos anos, o microfresamento ainda é considerado um assunto relativamente recente, que carece de pesquisas e investimentos para o seu desenvolvimento tecnológico. Investigações realizadas por Câmara (2012) e Campos (2014) retratam que o baixo número de trabalhos publicados relacionadas ao tema microfresamento, principalmente no Brasil, sugere que o atual conhecimento ainda não é suficientemente avançado para enfrentar os desafios envolvidos nesta tecnologia.

Some-se a isso, o fato de que, ainda que o mercado de softwares CAM seja altamente fragmentado e competitivo, poucos softwares comercialmente disponíveis assumem serem dedicados ou possuírem módulos especiais voltados às operações em microescala, com estratégias, tolerâncias apertadas e algoritmos especiais para cálculo de trajetórias de ferramenta que atendam aos requisitos específicos oriundos deste processo. Sobre esse aspecto, Gherman et al. (2017), afirmam que um software CAM para operações de usinagem em escala convencional nem sempre apresentará resultados satisfatórios em operações de microescala.

Outro grande entrave está relacionado ao suporte e informações disponíveis sobre os softwares CAM para aplicações em microescala. Existe grande dificuldade para os usuários extraírem ao máximo o que o software pode proporcionar e definir quais possíveis benefícios podem ser alcançados com a utilização dos recursos disponíveis e qual a influência destes

recursos sobre o processo de microusinagem.

Estudos sobre os impactos da tolerância CAM e da resolução de programas CN sobre a precisão de trajetórias de ferramenta aplicados às operações de microfresamento são ainda mais limitados, mesmo que os recentes avanços tecnológicos justifiquem sua necessidade.

Nesse contexto, a importância dessa dissertação justifica-se pela necessidade de se desenvolver pesquisas que ajudem a compreender melhor os princípios fundamentais da microusinagem, contribuindo com a produção de conhecimentos voltados à interação entre softwares CAM e o microfresamento, ao ponto em que auxilia no desenvolvimento deste processo, já que poucos estudos relacionados podem ser encontrados.

1.2 Objetivo

O principal objetivo deste trabalho é o de estudar os impactos da variação da tolerância CAM e da resolução de programas CN sobre a precisão de trajetórias de ferramenta para microfresamento.

Para a consecução do objetivo geral, foi necessário:

- Analisar o efeito da variação da tolerância CAM, do raio de curvatura da superfície usinada e do diâmetro da fresa sobre a precisão de trajetórias de ferramenta para microfresamento.
- Analisar o efeito da variação da resolução das coordenadas de posição dos programas CN sobre a precisão de trajetórias de ferramenta para microfresamento.
- Avaliar a influência da tolerância de trajetória CAM sobre a precisão de trajetória de ferramenta para diferentes softwares CAM comerciais.
- Avaliar a influência da troca de dados geométricos entre softwares CAM de fabricantes diferentes nos desvios de trajetórias de ferramenta.

1.3 Delineamento Experimental

Os passos gerais para elaboração desta pesquisa foram dispostos em cálculos matemáticos, etapas experimentais utilizando softwares CAM e análise estatísticas dos dados. O critério utilizado neste trabalho para medir a precisão das trajetórias de ferramenta foi calcular os desvios de trajetórias de ferramenta. Os programas CN gerados, constituídos por pontos que representam a trajetória da ferramenta ao longo da geometria a ser usinada, foram utilizados para o cálculo destes desvios. Portanto, para todas as condições experimentais aqui descritas, foram realizados os cálculos dos desvios, respostas desta pesquisa, que possibilitaram a análise estatística dos dados.

Neste contexto, o primeiro experimento foi realizado com a finalidade de possibilitar a análise de fatores geométricos de peça e ferramenta sobre a precisão de trajetórias de ferramenta geradas pelo software CAM *Inventor HSM*. Para isso, foram criados modelos CAD representativos em macro e microescala, variando, desta forma, o raio da geometria do modelo, além do diâmetro da fresa e tolerância CAM. Foram geradas trajetórias de ferramenta para estas condições e, em seguida, calculados os desvios de trajetória de ferramenta.

Posteriormente, o segundo experimento consistiu em avaliar os efeitos da variação da resolução das coordenadas de posição dos programas CN e da tolerância CAM, sobre a precisão de trajetórias de ferramenta para microfresamento. O software utilizado nesta análise foi o *Inventor HSM*, configurado com variações nos valores de resolução e tolerâncias CAM.

Uma análise dos desvios em trajetórias de ferramenta geradas por diferentes softwares CAM foi realizada no terceiro experimento. Foi verificada a capacidade dos softwares CAM *Cimatron*, *Inventor HSM*, *CATIA*, *NX CAM* em gerarem trajetórias precisas, respeitando os valores da banda de tolerância definida. Em cada software foi modelada uma geometria CAD de 1/4 de cilindro, com raio de curvatura convexa de 0,5 mm, utilizando diâmetro de ferramenta de 0,1 mm na geração de trajetórias.

Por fim, foram avaliadas as implicações da geração de trajetórias de ferramenta em modelos CAD importados a partir de arquivos em formatos padronizados, criados para possibilitar a troca de arquivos entre sistemas CAD-CAM de fabricantes diferentes. Para tal, foi criada uma geometria representativa nos softwares CAD, *Cimatron*, *Inventor HSM*, *CATIA*, *NX CAM* e *Solidworks*, essa geometria foi exportada nos formatos STEP e IGES, em seguida, importada para o software *Inventor HSM*.

1.4 Organização da Dissertação

Este documento apresenta 5 capítulos e está estruturado da seguinte forma:

- **Capítulo 1 - Introdução:** Contextualiza o âmbito no qual a pesquisa proposta está inserida. Apresenta, portanto, a definição do problema, delimitação experimental, objetivos, justificativas e como esta dissertação de mestrado está estruturada;
- **Capítulo 2 - Referencial Teórico:** Neste capítulo são apresentados os principais conceitos inerentes aos processos de microusinagem, dando maior enfoque ao microfresamento. Também são apresentados aspectos relacionados à programação auxiliado por computador e sistemas CAM.
- **Capítulo 3 - Trabalho Experimental e Desenvolvimento da Pesquisa:** São discutidos os procedimentos experimentais e os métodos utilizadas para obtenção dos resultados encontrados. Para melhor organização, este capítulo foi dividido nas seguintes etapas: Cálculo do desvio de trajetória, método para análise da precisão das trajetórias de ferramenta, influência da tolerância CAM e fatores geométricos sobre a precisão de trajetória de ferramenta, resolução de programas CN e tolerância CAM, cálculo dos desvios de trajetória em softwares CAM distintos e procedimento para importação e exportação de arquivos em formatos padronizados.
- **Capítulo 4 - Resultados e Discussões:** Retrata as discussões e apresenta os principais resultados acerca do cálculo e tratamento estatístico das variáveis envolvidas nos desvios de trajetórias de ferramenta dos softwares CAD-CAM estudados;
- **Capítulo 5 - Considerações Finais:** Apresenta as conclusões, contribuições e sugestões de atividades de pesquisa a serem desenvolvidas no futuro.

Referencial Teórico

De modo geral, neste capítulo são apresentados os principais conceitos sobre os processos de microusinagem, em particular, para o microfresamento. Serão apresentadas as principais características que o diferem do fresamento convencional, além dos efeitos decorrentes da redução de escala de usinagem. Este capítulo também apresenta uma breve revisão dos principais conceitos da programação auxiliada por computador e surgimento dos sistemas CAD-CAM, com maior ênfase aos sistemas CAM, onde, além de uma discussão ampla sobre os softwares CAM comerciais e seus recursos para microfresamento, serão apresentados aspectos relacionados à geração de trajetórias de ferramenta e tolerância CAM.

2.1 Microusinagem

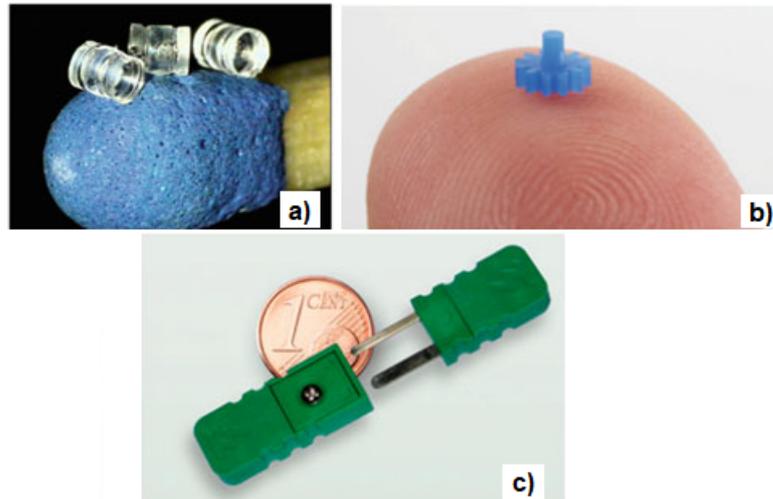
Os processos de manufatura já estão presentes na vida das pessoas há algumas décadas. A partir de meados do século XVIII, na Inglaterra, a Revolução Industrial iniciou um regime de grandes transformações econômicas e sociais, acompanhando uma eminente e acelerada evolução tecnológica. A princípio, os principais equipamentos utilizados nessa época, como por exemplo as máquinas a vapor, pesavam toneladas e ocupavam grandes espaços físicos nas instalações. Naquela época, tais equipamentos eram considerados altamente tecnológicos, muito diferente da tendência mundial de hoje, que com o surgimento de novas tecnologias de fabricação aliado à crescente tendência à miniaturização de produtos, vem desenvolvendo novos dispositivos nas mais diversas áreas industriais (JAIN, 2013).

Em 1960 surgiram os microcomponentes com a indústria de relógios. Na década de 70, a mecânica de precisão, considerada estratégica, passou a direcionar o desenvolvimento do processo de miniaturização de dispositivos e equipamentos. O ano de 1980 ficou marcado pelo crescimento mundial de pesquisas voltadas para a microtecnologia, no desenvolvimento dos Sistemas Microeletromecânicos (*Microelectromechanical Systems - MEMS*), como é conhecido nos Estados Unidos e a Tecnologia de Microsistemas (*Microsystems Technology - MST*) na Europa. Em 1990, as tecnologias baseadas na usinagem química de silício foram amplamente empregadas na indústria eletrônica (RODRIGUES, 2014).

Os componentes miniaturizados com alta precisão dimensional então se expandiram para diversas indústrias, tais como a de equipamentos médicos e implantes dentários, de desenvolvimento de aeronaves, de eletrodomésticos, automotiva, de telecomunicações, de informática e eletrônica. Diversos termos vêm sendo aplicados para definir esses itens miniaturizados. O termo sistemas microeletromecânicos enfatiza a miniaturização

dos sistemas que consistem em componentes eletrônicos e mecânicos. A tecnologia de microsistemas é um termo mais geral que se refere aos produtos bem como às tecnologias de fabricação para produzi-los, não se limitando aos produtos eletromecânicos (GROOVER, 2017). A Figura 2.1 ilustra alguns exemplos de dispositivos microfabricados.

Figura 2.1: Microcomponentes: a) microlentes, b) microengrenagem e c) microconector para sensor de temperatura



Fonte: (PAGANO; FASSI, 2017)

Em 2014, Mounier apresentou uma estimativa de que em 2019 o mercado de sistemas microeletrônicos e mecânicos chegaria a quase 25 bilhões de dólares. Essa relevância econômica tem sido um gatilho para muitas indústrias prosseguirem, aplicarem e desenvolverem novas tecnologias para micromanufatura. Neste direcionamento, a microusinagem transformou-se então em um importante processo de fabricação destes dispositivos, de maneira a obter microestruturas complexas que exigem uma variedade de materiais, formas e interfaces funcionais (ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009)(MASUZAWA, 2000). Peças medindo cerca de $500 \mu\text{m}$, com furos de $125 \mu\text{m}$ de diâmetro e espessura da parede de 25 a $50 \mu\text{m}$ agora são comuns (VOGLER; DEVOR; KAPOOR, 2003).

Todavia, apesar de promissor, em rápido crescimento e com um amplo campo de aplicações, o mercado carece, não somente, da fabricação de micropeças, mas também do incremento de características complexas em grandes componentes, de modo a criar recursos com características que melhoram ou otimizem sua funcionalidade (JAIN, 2013).

Na área médica, por exemplo, os dispositivos médicos para eliminação ou alívio da dor devem ser os menores possíveis, pois quanto menores forem estes dispositivos, menos invasivos, menor será a probabilidade de infecções, além de propiciarem uma cicatrização mais rápida (JAIN, 2013). A microusinagem é também um dos métodos mais promissores para a fabricação direta e rápida de dispositivos para esta área (THEPSONTHI; ÖZEL, 2014).

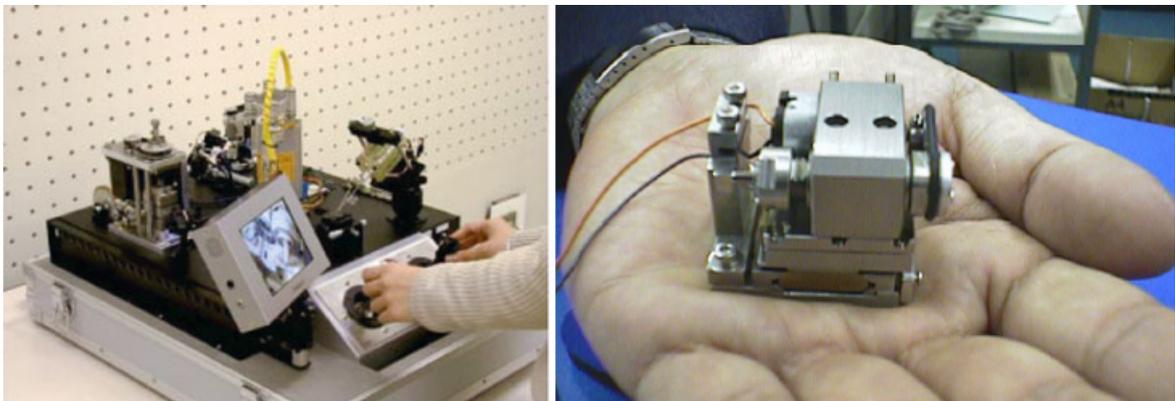
Para as indústrias aeroespacial e automobilística, existe interesse em introduzir microsensores, sistemas complexos de injeção de combustível, dispositivos de segurança, micromotores e microatuadores em seus produtos novos e nos já existentes (JAIN, 2013).

Outros exemplos de uso da microtecnologia no nosso cotidiano podem ser encontrados nos acelerômetros dos *air bags* dos automóveis, nos cabeçotes de discos magnéticos de computadores, em filtros eletrônicos para celulares, nos cabeçotes de impressão de impressoras a jato de tinta, microperfuração de furos de 100 μm de diâmetro para fibras ópticas e dos sistemas portáteis de diagnóstico médico (FERREIRA; FERNANDES, 2003) (RODRIGUES, 2014) (VOGLER; DEVOR; KAPOOR, 2003).

Além da microfabricação de componentes, vários sistemas de fabricação altamente miniaturizados, conhecidos como microfábricas, estão sendo desenvolvidos. Baseadas na miniaturização de componentes e máquinas convencionais desenvolvidos em módulos multiusos, estes sistemas evoluíram e foram implementados em aplicações industriais. Podendo chegar ao tamanho da mão de um ser humano, diversas vantagens podem ser destacadas: portabilidade, flexibilidade, redução de espaço e energia, menor custo com material, redução do custo operacional e de manutenção. Além disso, a menor quantidade de resíduos gerados garante uma produção mais limpa e sustentável em termos de impacto ambiental. No entanto, tais sistemas ainda carecem de estudos relacionados à tecnologia, principalmente no que tange o monitoramento, rigidez e vibrações das microfábricas (PAGANO; FASSI, 2017).

O primeiro protótipo de uma microfábrica foi desenvolvido no Japão em 1999 pelo Laboratório de Engenharia Mecânica Tsukuba, em seguida, em 1996 o mesmo laboratório desenvolveu um microtorno, medindo 32 mm de comprimento, por 25 mm de largura e 30,5 mm altura, pesando apenas 100 g, conforme ilustra a Figura 2.2.

Figura 2.2: À esquerda, microfábrica tele-operada portátil, à direita, microtorno



Fonte: (PAGANO; FASSI, 2017)

Toda a microfábrica foi instalada dentro de uma caixa portátil de 625 mm de comprimento, por 490 mm de largura e 380 mm de altura, com um peso de aproximadamente 34 kg, incluindo, além do microtorno, prensa e fresadora, outras máquinas de usinagem e componentes miniaturizados. As máquinas foram tele-operadas com dois *joysticks* e ajuda visual. O consumo de energia foi de apenas 60 W (PAGANO; FASSI, 2017).

Mesmo na comunidade acadêmica e de pesquisa, as definições de microusinagem variam muito. Não existe uma definição aceita que possa ser aplicada para cobrir adequadamente todos os aspectos do microcorte. De acordo com Gherman et al. (2017), ao definir microusinagem, vários fatores devem ser levados em consideração, incluindo, mas não limitado a: o tamanho da ferramenta e do recurso a ser fabricado, a máquina-ferramenta específica e os acessórios utilizados.

Para Masuzawa (2000), o termo micro em microusinagem indica micrômetro e representa um intervalo de 1 μm a 999 μm . No entanto, essa definição não considera fatores associados ao processo, como por exemplo, as dimensões das peças e da ferramenta de corte, acarretando em confusão na diferenciação entre a usinagem nas escalas micro e macro. Dentro do campo da usinagem, também pode ser entendida como a usinagem que não pode ser realizada pelo método convencional. Ainda, conforme o mesmo autor, o conceito de microusinagem pode variar em função da época, pessoa, método de fabricação e tipo de material.

De acordo com Gherman et al. (2017), o microcorte, incluindo fresamento e furação, geralmente é definido quando as características a serem produzidas estão dentro da faixa de 1 μm a 100 μm . Já o macrocorte ocorre quando os recursos usinados são maiores do que 100 μm . As características produzidas com menos de 1 μm são geralmente definidas como resultantes de nanousinagem.

Em geral, a microusinagem é definida com base nas dimensões da ferramenta de corte, que devem estar dentro do intervalo de 1 μm a 1000 μm . No entanto, o aspecto mais importante que caracteriza esse tipo de operação está relacionado ao fato da espessura do cavaco e do tamanho do grão do material da peça estarem na mesma ordem de grandeza do raio de aresta da ferramenta de corte (CÂMARA, 2012).

Diferentemente dos outros autores citados, para Simoneau, Ng e Elbestawi (2006) a microestrutura do material também pode ser utilizada para definir a microusinagem. Nesse caso, a espessura de usinagem (*uncut chip thickness*) deve ser correlacionada com o tamanho médio de grão do material da peça.

De maneira literal, é comum a definição do termo “micro”, representado pela letra grega μ (mi), como sendo um milionésimo, denotando um fator de 10^{-6} . O prefixo micro deriva do grego *mikros* que quer dizer muito pequeno. Quando acompanhado da uma unidade

de medida de comprimento, o metro (m), é definido como 1 milionésimo de metro (1×10^{-6} m) e equivalente à milésima parte do milímetro (1×10^{-3} mm). Nesse sentido, a microusinagem pode ser entendida como a usinagem pequena ou em miniatura. Para esta pesquisa, o conceito de microusinagem utilizado será o mesmo adotado por (CÂMARA, 2012), ou seja, baseado nas dimensões da ferramenta de corte, que deverá possuir diâmetro no intervalo de $1 \mu\text{m}$ (0,001 mm) a $1000 \mu\text{m}$ (1 mm).

2.2 Microfresamento

Nos últimos anos, o crescimento da demanda por produtos miniaturizados em diversas áreas industriais tem sido um gatilho para o avanço de processos ligados ao microfresamento, tornando-se, então, uma boa alternativa aos processos convencionais. A vantagem mais atraente do microfresamento é a possibilidade de usinagem em cinco eixos de microestruturas tridimensionais caracterizadas por uma alta complexidade geométrica e grande variedade de materiais: todo tipo de aço com dureza de até 62 HRC, metais como Al, Ti, Cu e latão, polímeros, cerâmicas e vidro (URIARTE, 2006). No Brasil, os principais materiais das peças microusinadas são o aço-liga, aços inoxidáveis e ligas de titânio (RODRIGUES, 2014).

Além de sua versatilidade, apresenta a taxa de remoção de material mais alta entre as tecnologias de microfabricação, conformidade com as faixas de tolerância e alta qualidade superficial (SCHMIDT; TRITSCHLER, 2004) (URIARTE, 2006) (ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009). Possui modo de operação semelhante ao da usinagem convencional, entretanto, levando em consideração a mudança na ordem de grandeza dos principais parâmetros e dimensões do processo. Outra condição necessária para o processo de microfresamento é a disponibilidade de máquinas de ultraprecisão capazes de realizar movimentos suaves e precisos, com vibrações mínimas e alta velocidade do fuso (URIARTE, 2006).

A redução da escala do processo, meramente representada pelo diâmetro da ferramenta (ver Figura 2.3), mostra a diferença de tamanho entre uma fresa convencional de topo reto com 6 mm de diâmetro e uma microfresa de $200 \mu\text{m}$ de diâmetro.

Figura 2.3: Fresa de topo reto de 6 mm de diâmetro (à esquerda) e microfresa de 200 μm (à direita)



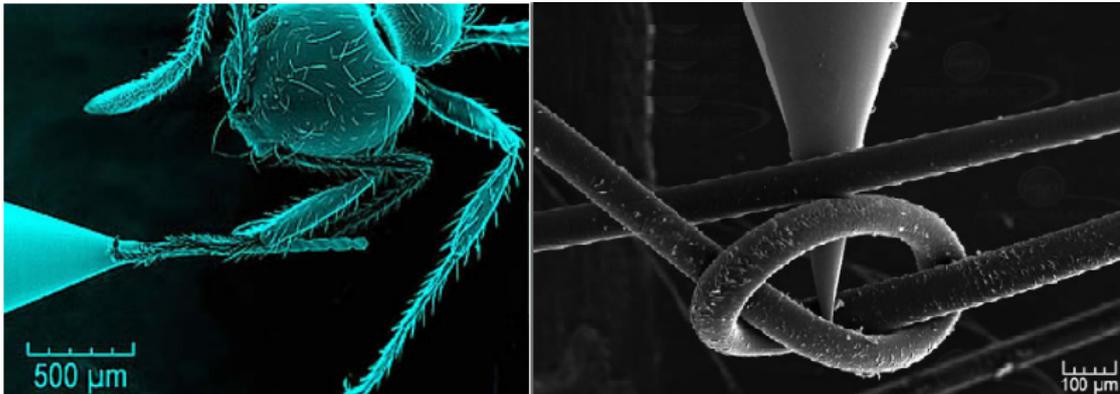
Fonte: (BISSACCO; HANSEN; DE CHIFFRE, 2006)

Conforme observado na Figura 2.3, notadamente, a primeira diferença entre o fresamento convencional e o microfresamento está nas características e dimensões das ferramentas utilizadas durante o corte, podendo possuir diâmetro igual ou inferior a 1 mm, essas ferramentas são conhecidas como microfresas (*micro milling cutter ou micro-end-mill*). Geralmente possuem diâmetro variando de 100 a 500 μm e raios de aresta que variam de 1 a 10 μm (KATHAVATE; CHEKE; ADKINE, 2015).

Normalmente, as microfresas possuem geometria de topo reto ou topo esférico com dois dentes, microfresas com mais de dois dentes são raramente encontradas, além de não serem utilizados insertos devido às características dimensionais reduzidas da ferramenta. De modo geral, as hastes possuem diâmetros de até dez vezes o diâmetro da parte de corte, propiciando maior rigidez e reduzindo a ocorrência de fratura da microfresas. Para a fabricação de peças com geometrias bidimensionais são empregadas as microfresas de topo reto, variando apenas em profundidade, já para usinagem de formas tridimensionais, utilizam-se as fresas de topo esférico (CÂMARA, 2012).

De modo comparativo, a Figura 2.4 ilustra, uma microbroca com 50 μm de diâmetro ao lado de uma formiga e o nó de um cabelo humano ao lado de uma microfresa de topo de 25 μm de diâmetro.

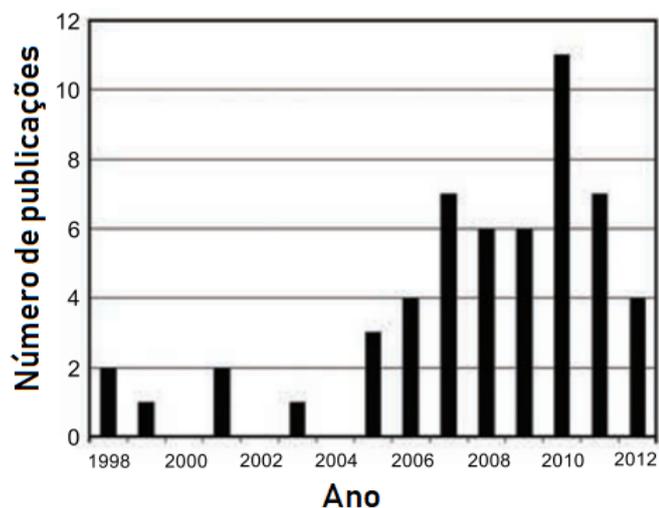
Figura 2.4: Comparação entre uma microbroca e a pata de uma formiga (à esquerda), comparação entre uma microfresa e um fio de cabelo (à direita)



Fonte: Performance Micro Tool ¹

Embora aspectos relacionados à usinabilidade de diversos materiais na faixa submilimétrica tenham sido discutidos de forma abrangente na literatura, artigos relacionados ao uso deste método de fabricação para produzir sistemas microeletromecânicos, micromoldes, componentes biomédicos, microturbinas e microbombas, micromotores, dispositivos ópticos, dentre outros, ainda carece de mais conhecimento e compreensão dos fenômenos envolvidos neste processo (CÂMARA, 2012). A Fig 2.5 ilustra um gráfico com número de trabalhos publicados sobre microfresamento distribuídos ao longo de 20 anos, considerando o ano de início do levantamento em 2012.

Figura 2.5: Evolução do número de publicações sobre microfresamento



Fonte: (CÂMARA, 2012)

Para Câmara (2012), o baixo número de pesquisas relacionadas ao tema sugere, a época, que o atual conhecimento não era suficientemente avançado para enfrentar os desafios tecnológicos envolvidos na produção de microcomponentes reais. Uma possível motivação

¹Disponível em: <http://www.pmtnow.com>. Acesso em: 11/10/2017.

pode estar relacionada ao fato de que as operações de acabamento subsequentes, na maioria dos casos, são inviáveis. Na prática, apesar do número real de trabalhos publicados ser maior, o objetivo do gráfico apresentado por Câmara (2012) é o de mostrar uma tendência do crescimento acentuado nos artigos publicados sobre microfresamento no período de 1998 a 2012, conduzindo a uma noção de como o assunto tornou-se relevante para a comunidade científica. O assunto foi estudado em diferentes níveis e de pontos de vista diferentes, especialmente em países da Ásia, Europa e América do Norte.

De maneira semelhante ao levantamento realizado por Câmara (2012), Campos (2014) divulga dados que também remetem à grande necessidade de estudos relacionados a área, principalmente no Brasil. Campos (2014) realizou buscas de publicações na base de artigos *Scopus* com a palavra *micromilling* e com as palavras, *micro* e *milling* no título, em seguida, após certificar-se de que nenhum resultado adicional era mostrado nas pesquisas, os resultados foram somados. A Figura 2.6 apresenta o resultado das buscas realizadas por Campos (2014) demonstrando o número de artigos publicados sobre microfresamento ao longo dos últimos 20 anos, considerando o ano de 2014 como referência da pesquisa.

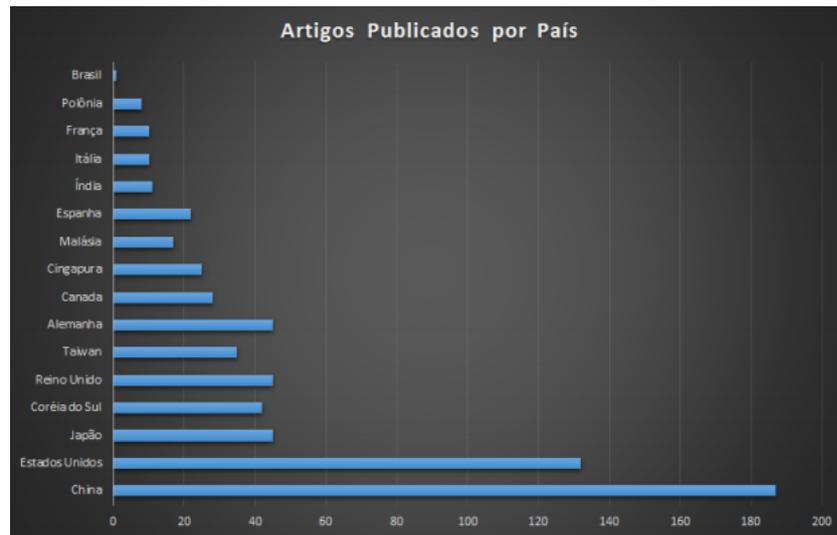
Figura 2.6: Evolução do número de publicações sobre microfresamento por ano



Fonte: (CAMPOS, 2014)

Assim como no gráfico apresentado por Câmara (2012), Campos (2014) demonstra o aumento significativo no número de artigos publicados sobre o tema a partir de 2005, avaliando um crescimento gradativo ano após ano. Porém, apesar desse aumento, Campos (2014) afirma que, segundo a base utilizada, até o ano de 2014 o Brasil possuía apenas um único artigo de relevância científica específico sobre microfresamento, o que é considerado extremamente destoante quando comparado aos números de artigos publicados por outros países, conforme ilustra a Figura 2.7.

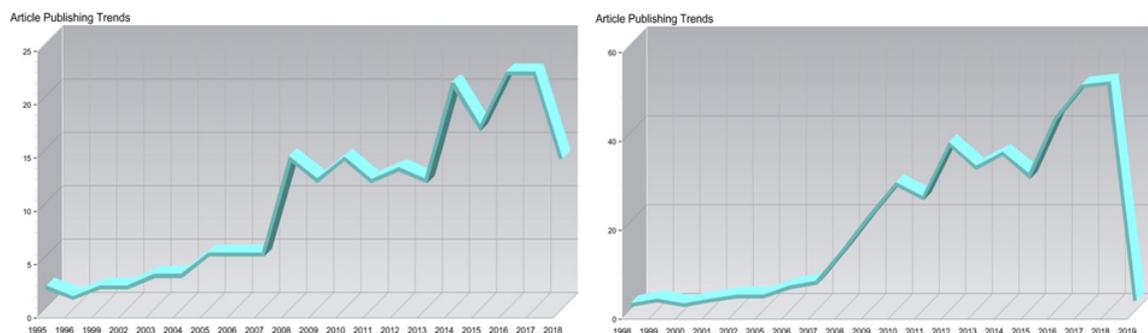
Figura 2.7: Número de artigos publicados sobre microfresamento por país



Fonte: (CAMPOS, 2014)

Dando um recorte mais recente aos avanços tecnológicos relacionados ao processo de microfresamento, foi realizada uma pesquisa, semelhante à realizada por Campos (2014), utilizando a plataforma *Clarivate Analytics* e a base de dados *Derwent Innovation*, por artigos publicados no período de 1998 a 2019. Para isto, foram realizadas buscas através das palavras *micromilling*, *micro* e *milling* no título dos trabalhos. A Figura 2.8 ilustra a evolução do número de publicações sobre o tema microfresamento, corroborando com os resultados encontrados por Câmara (2012) e Campos (2014) no que tange o aumento significativo de trabalhos publicados com o passar dos anos.

Figura 2.8: À esquerda: Evolução do número de publicações sobre microfresamento por ano. Palavra-chave: *micromilling*. À direita: Evolução do número de publicações sobre microfresamento por ano. Palavra-chave: *micro* e *milling*



Fonte: dados da pesquisa

No que se refere ao número de artigos por países que mais publicam na área, a Figura 2.9 retrata de maneira significativa a diferença de avanços tecnológicos sobre o tema microfresamento.

Figura 2.9: Número de publicações sobre microfresamento por país. Palavra-chave: *micro* e *milling* e *micromilling*



Fonte: dados da pesquisa

Ainda, no que remete ao registro de patentes, a disparidade é ainda maior. No topo da lista aparece a China, com mais do dobro do segundo colocado, os Estados Unidos. A Figura 2.10 demonstra um mapa global de registros de patentes sobre microfresamento no período de 2008 a 2018.

Figura 2.10: Principais países com registro de patentes no período de 2008 a 2018



Fonte: dados da pesquisa

Embora os números expressem grande diferença de publicações do Brasil em relação a outros países como China e Estados Unidos, é importante ressaltar que, quando comparado a outros processos de fabricação, o microfresamento pode ser considerado algo novo, surgindo há pouco mais de 20 anos atrás. Assim, especialmente no Brasil, o microfresamento ainda é considerado um tema relativamente recente, que carece de pesquisas e investimentos para o conhecimento e desenvolvimento da tecnologia.

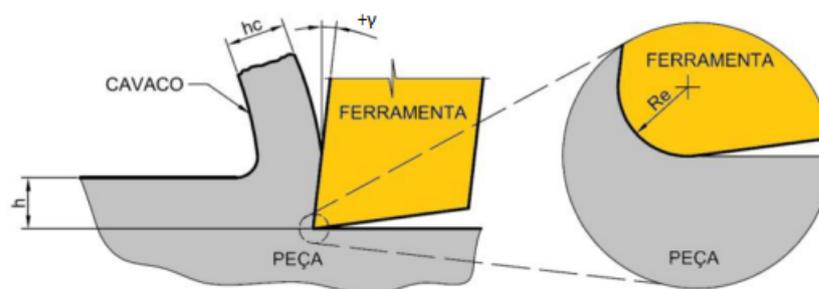
2.3 Microfresamento *versus* Fresamento Convencional

Apesar das semelhanças entre microfresamento e fresamento convencional, algumas características específicas são percebidas. À primeira vista, as operações de microfresamento se parecem com as convencionais, diferenciando apenas nas questões dimensionais. Porém, os mecanismos fundamentais existentes entre os processos de macro e microcorte se apresentam de formas diferentes devido à essa redução substancial do tamanho da escala de usinagem (ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009).

As diferenças fundamentais no processo de fresamento micrométrico e convencional surgem devido à escala de operação, apesar de serem cinematicamente semelhantes (KATHAVATE; CHEKE; ADKINE, 2015). De modo geral, os métodos de fabricação atuais não podem fabricar microfresas com arestas proporcionalmente afiadas devido à limitação da resistência estrutural da ferramenta na aresta de corte. Atualmente, as microferramentas amplamente disponíveis possuem raios de aresta variando de $1\ \mu\text{m}$ a $5\ \mu\text{m}$, sendo limitados pelo tamanho dos grãos de carboneto de tungstênio do metal duro, que pode variar de $0,4$ a $0,7\ \mu\text{m}$ (CARDOSO; DAVIM, 2012).

A Figura 2.11 ilustra, em detalhe, o raio da aresta de corte em macro escala.

Figura 2.11: Detalhe do raio de arredondamento da aresta de corte na macrousinagem



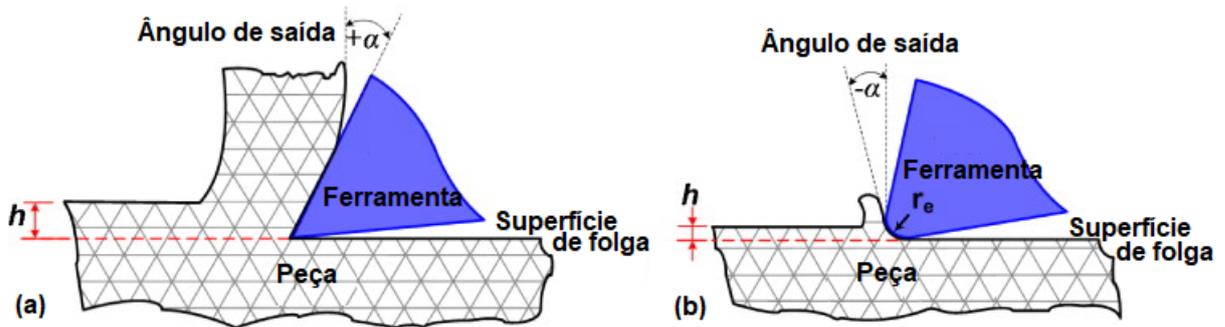
Fonte: Adaptado de (BALDO, 2013)

Para o fresamento convencional, o raio da aresta de corte possui valores extremamente pequenos, se comparados com a espessura de usinagem (h), pouco interferindo no processo de corte. Neste caso, a suposição aceita é a de que a cunha de corte é perfeitamente afiada (MERCHANT, 1945), com ângulo de saída positivo, além de considerar que não há contato entre a ferramenta de corte e a peça ao longo da superfície de folga. Desta forma, o material é predominantemente removido pela ação de cisalhamento devido à interação entre a cunha de corte da ferramenta e a peça, proporcionando a formação do cavaco.

Por outro lado, na microusinagem o raio da aresta de corte torna-se significativo em comparação com a espessura do material a ser removido (h) (ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009). Assim, a espessura do cavaco tem a mesma proporção do raio da aresta de corte, o

que faz com que, nesse caso, um ângulo de saída negativo seja formado na região do corte. Essa diferença está ilustrada na Figura 2.12. Desta forma, as tensões sobre a microfresa são muito superiores às de uma ferramenta convencional (POPOV, 2007). Conseqüentemente, as abordagens comumente utilizadas para descrever os fenômenos envolvidos em fresamento convencional não se aplicam ao microfresamento (CÂMARA, 2012).

Figura 2.12: a) Aresta de corte no fresamento convencional e b) Aresta de corte no microfresamento



Fonte: Adaptado de (ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009)

Com taxas de remoção de material muito menores, quando comparadas às obtidas pelo fresamento convencional, fatores como a redução das grandezas de penetração, questões geométricas do raio de aresta de corte da ferramenta e tamanho do grão do material, apresentam influência significativa no acabamento e integridade dos componentes usinados em microescala (DORNFELD; MIN; TAKEUCHI, 2006).

No caso do microfresamento, assim como no fresamento convencional, não existem manuais disponíveis para selecionar os parâmetros de usinagem, mas recomendações dos fabricantes de ferramenta. Se a velocidade de corte recomendada para o fresamento convencional do alumínio for aplicada ao microfresamento, por exemplo, a rotação calculada será de aproximadamente 350.000 rpm, para uma fresa de 100 μm de diâmetro, algo claramente difícil de se alcançar (DIMOV, 2004). Nesse sentido, a determinação dos parâmetros de corte não pode basear-se nos conhecimentos do fresamento convencional devido aos efeitos de redução de escala e menor resistência das microfresas (BISSACCO; HANSEN; DE CHIFFRE, 2006). Além dos já citados, outros elementos tornam-se relevantes no microfresamento. Ao tempo em que há uma tendência crescente para a miniaturização de componentes, o diâmetro das ferramentas empregadas na usinagem diminui, aumentando significativamente a demanda por maiores velocidades de fuso, na proporção em que precisam atender às demandas exigidas pelos processos. Porém, à medida que o diâmetro da ferramenta diminui, a rigidez da ferramenta também diminui, o que leva a deflexões sob carga do cavaco, além de ruptura repentina (CARDOSO; DAVIM, 2012).

Com valores que costumam ser muito pequenos, quando comparados com a ordem de grandeza das peças e dos parâmetros de corte, o desalinhamento (*run-out*) e deflexão da ferramenta são frequentemente desconsiderados nos modelos de força do fresamento

convencional. Porém, no microfresamento, qualquer desalinhamento da ferramenta, por menor que seja, influenciará diretamente nas forças de corte, conseqüentemente, na vida útil da ferramenta, podendo levá-la à quebra mais rapidamente. Esse desvio é causado por um desalinhamento do eixo de simetria entre a ferramenta e o porta-ferramenta ou fuso (CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006). De maneira similar, as cargas que agem no sentido radial aumentam a deflexão em microfresas de topo, levando a uma pobre qualidade superficial, além de grandes erros geométricos nas peças e possibilidade de quebra da ferramenta (VÁZQUEZ, 2015)(BISSACCO; HANSEN; DE CHIFFRE, 2006).

Uma maneira convencional de obter dados para otimizar os parâmetros de processo no microfresamento é através da realização de experimentos. Porém, pode ser algo dispendioso e demorado. Alternativamente, esses dados podem ser obtidos através de outros meios, como a modelagem mecânica e o método de simulação por elementos finitos (*Finite Element Method - FEM*). A simulação por elementos finitos é muito útil para prever forças de corte e temperaturas de corte, além da possibilidade de simulação da formação de rebarba (*burr*). Já os modelos mecânicos, podem ser usados para prever forças de corte e rugosidade superficial. Empregar essas abordagens de modelagem ao invés de realizar experimentos pode reduzir de modo significativo o tempo e custos do processo (THEPSONTHI; ÖZEL, 2014).

2.4 Efeito de Escala e Amassamento no Microfresamento

De maneira geral, na literatura em que se abordam os processos de microusinagem, o chamado Efeito de Escala (*size effect*) é tema recorrente. Para Lai (2008), várias pesquisas têm sido realizadas no intuito de conduzir estudos relacionados ao efeito de escala, o que consideram ser uma das características mais significativas das operações de microfresamento.

Embora haja estudos de vários autores, não há consenso no meio acadêmico sobre o que de fato provoca ou dá origem ao efeito de escala, porém, há um direcionamento de ideias em dois sentidos. Primeiramente, quando a espessura de corte é menor ou aproximadamente igual ao raio da aresta de corte da ferramenta, dificultando o processo de formação do cavaco. Em segundo lugar, quando envolve aspectos relacionados à microestrutura do material, acarretando em maior influência sobre a deformação plástica do material da peça, como por exemplo, defeitos cristalinos, impurezas e contornos de grãos (CÂMARA, 2012) (DORNFELD; MIN; TAKEUCHI, 2006).

Kalpakkian e Schmid (2003), consideram como efeito de escala qualquer desvio nas características de determinado processo, ocorrido devido ao aumento ou diminuição das suas dimensões mais relevantes, seja da peça, da ferramenta ou de parâmetros operacionais,

podendo ocorrer independentemente de o processo ser aumentado ou diminuído de maneira uniforme.

Na microusinagem, o efeito de escala modifica o mecanismo de remoção de material quando comparado com a usinagem convencional. Isso ocorre devido ao fato de que a espessura do material a ser removido pode ser tipicamente da mesma ordem de grandeza do raio da aresta de corte da ferramenta, ou ainda, do tamanho do grão que constitui a microestrutura do material da peça a ser usinada (ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009)(DORNFELD; MIN; TAKEUCHI, 2006). Desta forma, um cavaco pode não ser formado durante cada avanço por dente da ferramenta, arrastando o material ao invés de cortá-lo, acarretando apenas em deformação plástica do material sobre a superfície da peça, no fenômeno que é conhecido como efeito *ploughing* ou *plowing* (YUN, 2011), que neste trabalho será chamado de amassamento. Tal fenômeno, causado pelo raio de aresta da ferramenta é o que costuma ser caracterizado como efeito de escala na maior parte dos casos. Este acontecimento gera marcas paralelas e pequenos sulcos, semelhante às marcas deixadas pela passagem da cunha de corte e pelo material remanescente resultante do amassamento no microfresamento. Outro termo comum utilizado em pesquisas para tradução da palavra *ploughing* é riscamento. Com o estudo do amassamento, surge então o conceito de espessura mínima de cavaco, visto com mais detalhes na Subseção 2.4.1 deste Capítulo.

Para Simoneau, Ng e Elbestawi (2006), Mian, Driver e Mativenga (2011), o amassamento é caracterizado pelo considerável aumento da tensão limite de escoamento do material devido à redução da área de corte. Possíveis causas desse efeito estão relacionadas ao aumento da energia específica de corte, forças de corte (com a redução da espessura de usinagem), elevação da temperatura na interação cavaco-ferramenta e com a deformação plástica do material na camada abaixo da superfície (LAI, 2008).

De acordo com Lai (2008), Bissacco, Hansen e De Chiffre (2006), este fenômeno afeta significativamente as forças de corte, estabilidade do processo, tensão residual e o acabamento superficial das peças usinadas. Com base nos experimentos realizados por Lai (2008), foi constatado que a energia específica de corte aumenta significativamente à medida que a espessura do cavaco diminui devido ao aparecimento do amassamento. Tal problema é resultado de alguns fatores, considerados não tão importantes no fresamento convencional e que possuem extrema relevância no microfresamento. Basicamente, existem três diferenças: o raio da aresta da ferramenta, conseqüentemente o processo de formação do cavaco, a microestrutura do material a ser usinado e a energia específica de corte (URIARTE, 2006), (SIMONEAU; NG; ELBESTAWI, 2006).

2.4.1 Raio da Aresta de Corte

O conceito de corte perfeitamente afiado, como suposto na usinagem convencional, não pode ser considerado válido para as operações de microusinagem, pois, a física do processo em profundidades de corte muito pequenas ($1 \mu\text{m}$ ou menor) não é bem compreendida (KIM; KIM, 1995) (ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009)

Na microusinagem, à medida que a espessura de usinagem (h) se torna da mesma ordem que o raio da aresta de corte da ferramenta, a hipótese de que a aresta da ferramenta é perfeitamente afiada não é mais válida, podendo ocorrer escorregamento (*sliding*) significativo ao longo da superfície de folga da ferramenta em detrimento da recuperação elástica do material da peça e o amassamento, devido ao grande ângulo de saída negativo resultante do raio da aresta de corte da ferramenta (KIM; KIM, 1995). Sob esse aspecto, Kim e Kim (1995) apresentaram um modelo de corte ortogonal considerando o raio de arredondamento da aresta de corte da ferramenta e a recuperação elástica do material da peça, quantificando esses dois efeitos, ou seja, amassamento ao longo do raio da aresta de corte arredondada e o escorregamento na superfície de folga, comparando os resultados deste modelo com o do modelo de corte perfeitamente afiado proposto por Merchant (1945).

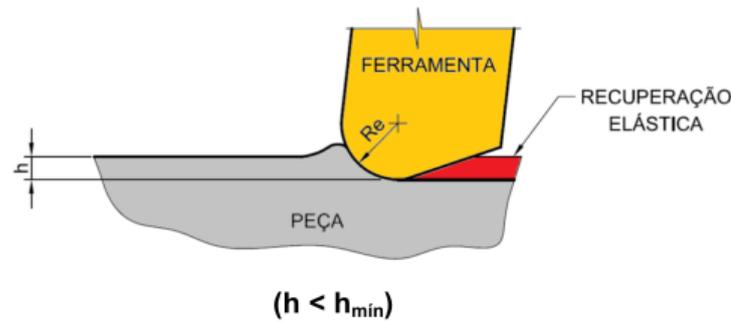
Para Kim e Kim (1995), a análise dos componentes da força de corte estabeleceu que o efeito na superfície de folga e da aresta arredondada de corte da ferramenta dominam o sistema de forças de corte. Desta forma, a diferença entre os resultados do experimento e os do modelo de corte proposto por Merchant (1945), especialmente para espessuras de usinagem abaixo de $1 \mu\text{m}$, foram motivados pelo ângulo efetivo de inclinação negativo e o atrito ao longo do flanco.

De maneira a evitar o amassamento, faz-se necessária a determinação da espessura mínima do cavaco para a qual o cavaco é formado e removido pela aresta de corte, desta forma, evitando que ocorra somente deformação (YUN, 2011). Além de resultar em pior acabamento da peça, o amassamento pode diminuir a vida útil da ferramenta e prejudicar a estabilidade do processo (VÁZQUEZ, 2015).

Em escala micrométrica, quando a espessura de usinagem (h) está abaixo do valor de uma espessura crítica de referência, isto é, abaixo da espessura mínima de corte (h_{min} - *minimum chip thickness*), ocorre a compressão do material da peça após a passagem da ferramenta, ocasionando deformação plástica seguida de recuperação elástica, desse maneira, não há remoção de material na forma de cavaco. Ou seja, devido ao arredondamento da aresta de corte, um ângulo de saída negativo entre a ferramenta de corte e o cavaco pode ser criado, sendo assim, o ângulo de cisalhamento mínimo não é formado. Isso implica no esmagamento do material da peça na região superficial ao invés da remoção do material

(ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009) (BISSACCO; HANSEN; DE CHIFFRE, 2006) (ÖZEL; LIU; DHANORKER, 2007). O efeito do raio da aresta de corte pode ser melhor compreendido a partir da análise da Figura 2.13.

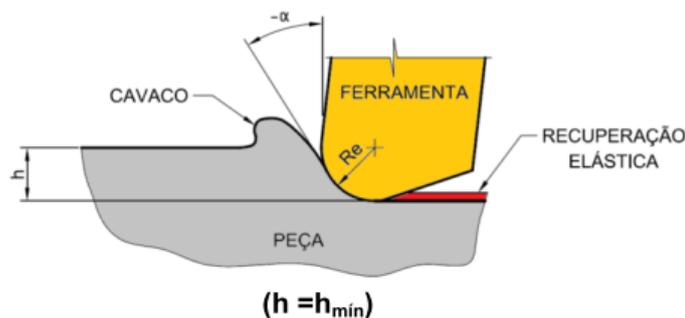
Figura 2.13: Influência do raio de aresta de corte no microfresamento quando $h < h_{min}$



Fonte: (BALDO, 2013)

Para a condição de corte, demonstrada na Figura 2.14, quando o valor da espessura de usinagem (h) é igual a espessura mínima de corte (h_{min}), o cavaco é gerado e parte do material é removido por cisalhamento, ao tempo em que parte do material sofre deformação plástica e outra parte se recupera elasticamente (ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009) (BISSACCO; HANSEN; DE CHIFFRE, 2006) (ÖZEL; LIU; DHANORKER, 2007) (CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006).

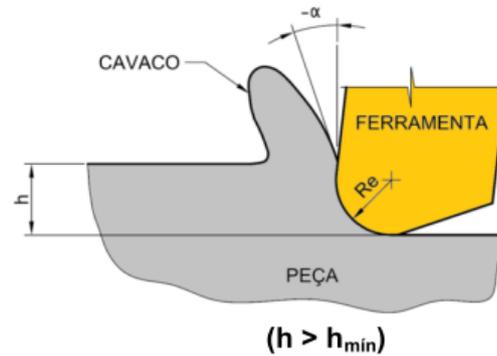
Figura 2.14: Influência do raio de aresta de corte no microfresamento quando $h = h_{min}$



Fonte: (BALDO, 2013)

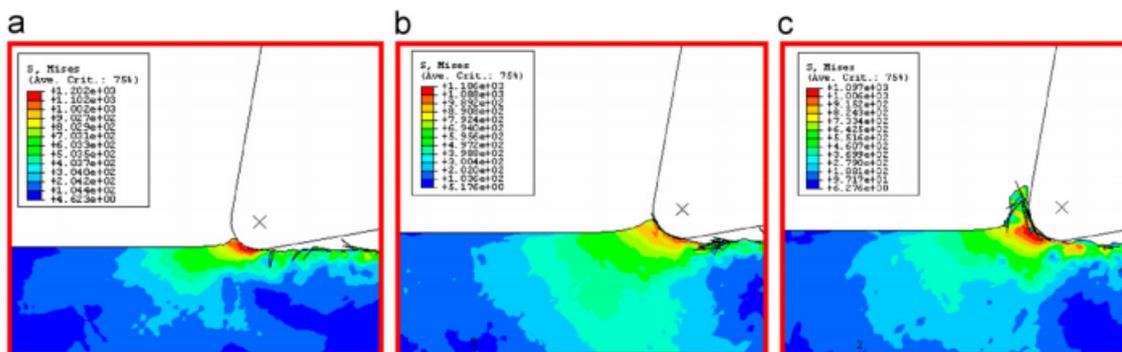
Quando a espessura de usinagem (h) for maior do que a espessura mínima de corte (h_{min}), ou seja, quando a relação entre a espessura de usinagem e a espessura mínima de corte for maior do que 1, Figura 2.15, a condição ideal para a completa formação do cavaco é atingida, nestes casos, o amassamento diminui consideravelmente e a quantidade de material removido será bem maior do que a porção de recuperação elástica do material da peça usinada (ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009) (BISSACCO; HANSEN; DE CHIFFRE, 2006) (ÖZEL; LIU; DHANORKER, 2007) (CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006).

Diversas pesquisas utilizando modelos analíticos e análise por elementos finitos já foram realizadas de maneira a determinar uma possível espessura mínima de corte (h_{min}), ou

Figura 2.15: Influência do raio de aresta de corte no microfresamento quando $h > h_{min}$ 

Fonte: (BALDO, 2013)

seja, uma espessura abaixo da qual, não haveria formação de cavaco, desta forma, não ocorrendo, de fato, o processo de usinagem (LAI, 2008) (VOGLER; DEVOR; KAPOOR, 2003) (KIM; MAYOR; NI, 2004). A Figura 2.16 apresenta uma simulação utilizada por (LAI, 2008) para avaliar o processo de formação do cavaco com relação à espessura de usinagem (h) e raio da aresta de corte (r_h).

Figura 2.16: Processo de simulação da formação do cavaco, considerando em a) $h = 0,1 r_h$ ($0,2 \mu\text{m}$); b) $h = 0,2 r_h$ ($0,4 \mu\text{m}$) e c) $h = 0,3 r_h$ ($0,6 \mu\text{m}$)

Fonte: (LAI, 2008)

Da Figura 2.16 pode-se observar que não há formação de cavaco quando a espessura de usinagem (h) está entre $0,1$ e $0,2 r_h$. A formação de cavaco só é percebida quando a espessura de usinagem chega a $0,3 r_h$, ou seja, nenhum cavaco é formado quando a espessura de usinagem se apresenta entre 10 e 20% do valor do raio da aresta de corte, entretanto, começa a se formar a partir de 25%, atingindo sua formação completa em 30% de r_h . A partir destes resultados, Lai (2008) propuseram que o valor de h_{min} para um material de cobre de alta condutividade térmica seja de $0,25 r_h$ ($0,5 \mu\text{m}$), considerando o raio da aresta de corte da microfresa de $2 \mu\text{m}$.

Os resultados encontrados por Lai (2008) mostraram-se consistentes em relação a algumas literaturas, como por exemplo em Vogler, DeVor e Kapoor (2003), que estimaram para

materiais com estrutura perlítica e ferrítica o início da formação do cavaco para valores da espessura de usinagem (h) entre 20 a 30% do raio da aresta de corte da ferramenta (r_h). Por meio de simulações e experimentos, [Kim, Mayor e Ni \(2004\)](#) propuseram que a espessura mínima de corte h_{min} fosse de 30% do raio da aresta de corte.

De acordo com [Oliveira \(2015\)](#), para alguns parâmetros de corte e material, a espessura mínima de corte é, geralmente, algo em torno de 14 a 43% do raio de aresta da ferramenta. Para [Vázquez \(2015\)](#), alcançar a estabilidade de corte no microfresamento requer um avanço por dente superior a 30% do raio da aresta de corte da ferramenta, caso contrário, o amassamento será dominante.

Outras pesquisas realizadas por [Özel, Liu e Dhanorker \(2007\)](#) utilizando o aço AISI 4140 constataram que para um raio de aresta de corte variando entre 1 e 5 μm a espessura mínima de corte fica entre 30 e 36% do raio da aresta de corte. Já para testes realizados com a liga de alumínio AL 2024 T6, esse percentual aumentou para 42 a 45%.

2.4.2 Efeitos da Microestrutura do Material

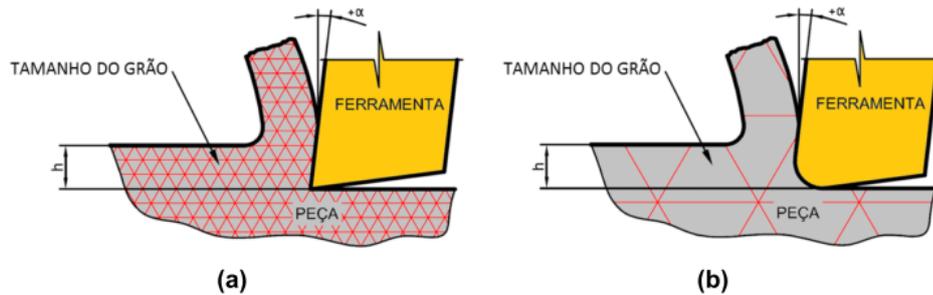
Nos cortes de microescala, os tamanhos dos grãos tornam-se relativamente grandes em comparação com o volume de material removido, o que é considerada uma das principais diferenças entre a usinagem micro e macro. Para materiais comuns aplicados em engenharia, o tamanho do grão varia, geralmente, entre 100 nm e 100 μm . Desta forma, quando o tamanho do processo de usinagem é reduzido a uma ordem de micrômetros, a microestrutura do material usinado influencia diretamente no processo de corte ([POPOV, 2006](#)) ([MATSUMURA, 2014](#)). O processo de remoção dependerá do tamanho, forma e orientações dos grãos e estes fatores não devem ser negligenciados no microfresamento ([MATSUMURA, 2014](#)).

Reduzindo as dimensões da ferramenta, as dimensões do material removido em cada avanço por dente também são necessariamente reduzidas, enquanto o tamanho de grão do material de trabalho não é reduzido na mesma proporção. Portanto, enquanto no fresamento convencional a suposição aceita é a de que os materiais são isotrópicos e homogêneos, sendo o cavaco formado por vários grãos, no microfresamento, o cavaco se forma dentro de um ou mais grãos por vez ([BISSACCO; HANSEN; DE CHIFFRE, 2006](#)).

Desta forma, quando a microestrutura do material a ser usinado possuir granulometria heterogênea, o corte pode acontecer em uma fase mais dura em um primeiro momento, seguido do corte em uma fase mais mole, desta forma, diminuindo a vida útil da ferramenta, além de causar variação nas forças de corte e gerar vibração ([ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009](#)) ([CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006](#)) ([MATSUMURA, 2014](#)).

Além disto, quando toda a deformação de cisalhamento ocorre dentro de um único grão, as tensões aplicadas à ferramenta dependem da orientação individual do grão, causando flutuações de alta frequência das forças de corte (BISSACCO; HANSEN; DE CHIFFRE, 2006). Tais condições, comuns aos processos de microcorte, podem ser demonstradas na Figura 2.17.

Figura 2.17: Relação entre o tamanho de grão e a espessura de usinagem em macroescala (a) e microescala (b)



Fonte: (BALDO, 2013)

De modo a avaliar a influência do tamanho do grão no processo de microusinagem, Simoneau, Ng e Elbestawi (2007) realizaram estudos utilizando corpos de prova de aço AISI 1045 no seu estado normalizado e na condição com grãos refinados, constatando que a microestrutura do material possui importância significativa no processo de formação do cavaco e de defeitos superficiais. Sob esse aspecto, considerando obter melhoria nas condições de usinagem através do refinamento da microestrutura do material a ser usinado.

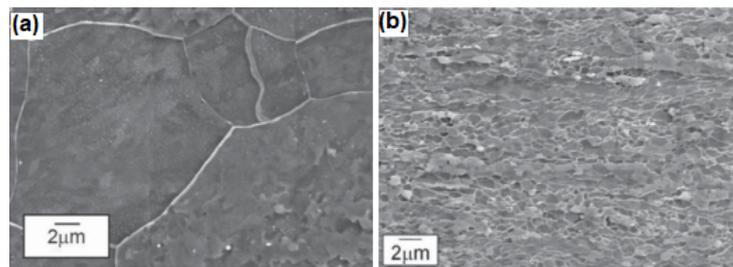
De acordo com Bissacco, Hansen e De Chiffre (2006), a redução do tamanho do processo, meramente representada pelo diâmetro da ferramenta, leva à manifestação do efeito de escala, relacionado à microestrutura da peça, geometria e topografia da ferramenta. Os requisitos relativos ao material da peça de trabalho e que proporcionam melhores resultados são, portanto, alta homogeneidade (corte de um único tipo de grão) e tamanho de grão pequeno.

Para Popov (2006), devido às modificações no ângulo de cisalhamento de grão para grão, podem haver variações na espessura do cavaco em virtude de diferenças nas propriedades dos materiais. No entanto, deve-se dizer que as condições de corte anisotrópico resultantes desses efeitos podem ser minimizados, ou até mesmo eliminadas, através do refinamento da estrutura de grãos ou deformação do material antes da usinagem, pois, a rugosidade superficial produzida pelo microfresamento é altamente dependente do tamanho do grão do material. Além disso, é importante ressaltar que a redução do tamanho do grão do material também se aplica ao processo de fabricação da ferramenta de corte (BISSACCO; HANSEN; DE CHIFFRE, 2006) (MATSUMURA, 2014).

A Figura 2.18 a) ilustra a microestrutura de um aço com 0,45% de carbono, muito comum

em oficinas mecânicas, apresentando grãos não uniformes, com dimensões variando entre 10 a 20 μm . Na condição apresentada, se a espessura de usinagem for menor que o tamanho do grão, o processo se tornará instável e com vibrações, dependendo de cada grão a ser usinado. A Figura 2.18 b) ilustra a microestrutura do mesmo aço, após refino de grão. Como os grãos são muito menores que os do aço apresentado na Figura 2.18 a), nesse caso, o material da peça a ser usinada poderá ser considerado uniforme (MATSUMURA, 2014).

Figura 2.18: Grãos de aço carbono 1045: a) Material convencional e b) Material com refino de grão



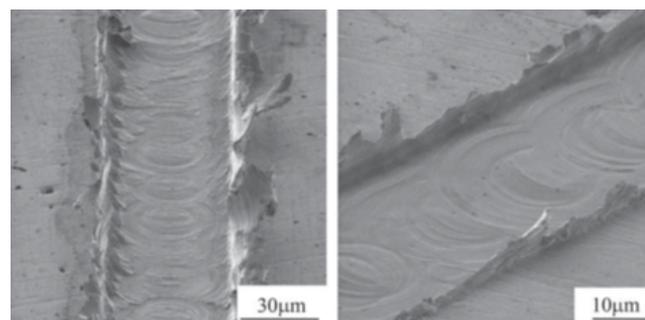
Fonte: (MATSUMURA, 2014)

2.5 Formação de Rebarbas no Microfresamento

Um dos maiores desafios encontrados por pesquisadores na área de microusinagem é sem dúvidas a remoção de rebarbas (*burr*), o que constitui uma das principais limitações do microfresamento. Além de indesejáveis, são extremamente difíceis de serem removidas das micropeças (MATSUMURA, 2014) (BISSACCO; HANSEN; DE CHIFFRE, 2006).

Devido ao tamanho das rebarbas e às dimensões gerais das peças usinadas, métodos convencionais, tais como retificação (*grinding*), polimento (*polishing*) ou usinagem eletroquímica (*Electrochemical Machining - ECM*) para remoção de rebarbas são difíceis de aplicar (URIARTE, 2006) (BISSACCO; HANSEN; DE CHIFFRE, 2006) (DIMOV, 2004). A Figura 2.19 ilustra a formação de rebarba no microfresamento de um canal.

Figura 2.19: Formação de rebarba no microfresamento

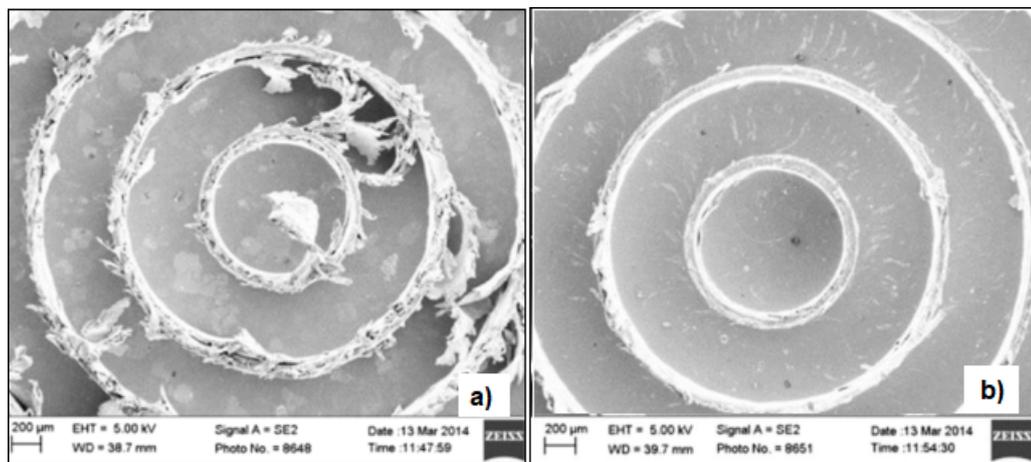


Fonte: (MATSUMURA, 2014)

Os parâmetros de corte, as propriedades do material da peça, geometria da ferramenta, revestimento e lubrificação são alguns dos fatores que afetam de maneira significativa a formação de rebarbas no microfresamento (KUMAR, 2017). Desta forma, técnicas especiais, bem como a otimização dos parâmetros de corte e estratégias de usinagem apropriadas devem ser desenvolvidas de modo a evitar ou minimizar a sua formação e os efeitos sobre a superfície da peça (URIARTE, 2006) (BISSACCO; HANSEN; DE CHIFFRE, 2006) (DIMOV, 2004).

Um estudo experimental realizado por Dimov (2004) mostrou que a estratégia de usinagem selecionada para o microfresamento é um fator importante na determinação do acabamento superficial resultante e que a seleção apropriada deve ser considerada de modo a evitar a quebra da ferramenta de corte, pois são extremamente sensíveis às diferentes condições do processo. Thepsonthi e Özel (2014) apresentaram um método de modelagem e otimização dos parâmetros do processo de modo a determinar a melhor trajetória da ferramenta, considerando as restrições da microusinagem no microfresamento de uma geometria circular com paredes finas (*thin walls*) em ligas de Titânio TiAl6V4, conforme Figura 2.20.

Figura 2.20: Resultado do microfresamento da liga de titânio TiAl6V4. a) Superfície com severa formação de rebarbas e b) Superfície com redução na formação de rebarbas



Fonte: Adaptado de (THEPSONTHI; ÖZEL, 2014)

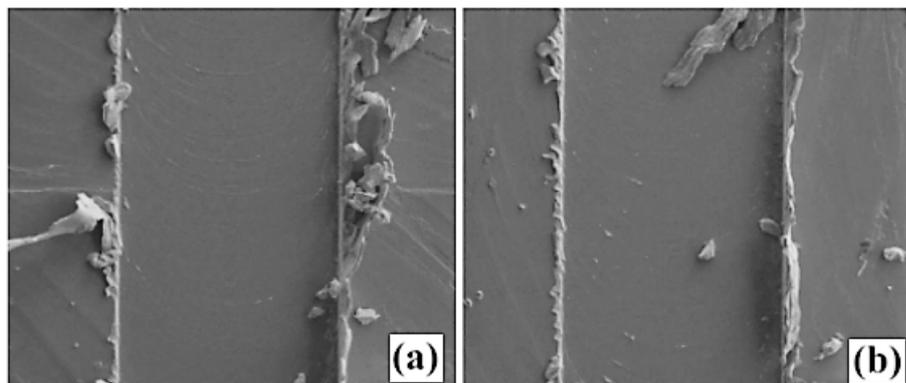
Na abordagem da Figura 2.20 a), a influência do desgaste da ferramenta foi negligenciada, desta forma, os parâmetros de processo obtidos resultaram em um alto valor de desgaste da ferramenta, conseqüentemente, uma formação severa de rebarbas, não apresentando uma solução satisfatória para a otimização do processo. Os resultados encontrados na abordagem da Figura 2.20 b) demonstraram melhorias nos parâmetros e estratégias de usinagem, apresentando diminuição da formação de rebarba, aumento da vida útil das ferramentas e da qualidade superficial. Nessa abordagem, o desgaste da ferramenta e as forças de corte foram consideradas restrições do processo. O desgaste máximo da ferramenta foi limitado a menos de $5 \mu\text{m}$ por dente, ao tempo em que a força de corte foi limitada a 1,3 N (THEPSONTHI; ÖZEL, 2014). Considerando essas limitações, pôde-se

encontrar um conjunto ótimo de parâmetros para o microfresamento. O resultado da formação de rebarba de topo (*top burr*) desta abordagem foi significativamente superior, quando comparado com os resultados da Figura 2.20 a) (THEPSONTHI; ÖZEL, 2014). De acordo com Thepsonthi e Özel (2014), conclui-se que, para reduzir a formação de rebarbas do microfresamento de ligas de Titânio TiAl6V4, o desgaste da ferramenta e as forças de corte devem ser controladas.

Para Thepsonthi e Özel (2014), a estratégia da trajetória da ferramenta (*tool path*), profundidade de corte (a_p) e velocidade de avanço (*feed rate*) são os principais parâmetros do processo que influenciam na formação de rebarba e rugosidade superficial. O desgaste da ferramenta é fortemente afetado pela estratégia da trajetória da ferramenta e pelos parâmetros do microfresamento, especialmente, pela velocidade de corte. Ainda de acordo com (THEPSONTHI; ÖZEL, 2014), maiores velocidades de avanço resultaram em menor rugosidade superficial, conseqüentemente, maior qualidade do canal usinado nos ensaios. O raio da aresta de corte também influenciou significativamente na formação de rebarbas, aumentando-as com o aumento do raio da aresta.

Wu, Li e He (2017) investigaram a influência da espessura de usinagem e do raio da aresta de corte na formação de rebarbas de uma peça de cobre de alta condutividade térmica usando o microfresamento. Dentre as contribuições deste trabalho, Wu, Li e He (2017) concluíram que a menor formação de rebarba de topo foi observada no fresamento discordante (*up milling*), quando comparado com o fresamento concordante (*climb milling*, ou *down milling*), conforme representado na Figura 2.21.

Figura 2.21: Rebarba de topo (*top burr*) no microfresamento: a) Fresamento concordante (*down milling*) e b) Fresamento discordante (*up milling*)



Fonte: (WU; LI; HE, 2017)

2.6 Programação Auxiliada por Computador

O conceito de CAD e CAM é relativamente novo. Seu uso está vinculado ao desenvolvimento de computadores e a evolução dos computadores para auxiliar as etapas de engenharia está diretamente relacionada com a evolução da computação gráfica (SOUZA; ULBRICH, 2013) (CARLSON, 2003).

Parece existir um entendimento entre os historiadores da Computação Gráfica que defendem que, em 1950, a força aérea Americana financiou, junto ao Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), um projeto para o desenvolvimento do computador *Whirlwind*, com finalidades acadêmicas e possivelmente militares, sendo considerado o primeiro computador que operava em tempo real, possuindo recursos gráficos que possibilitavam a visualização de dados numéricos (Figura 2.22) (CARLSON, 2003) (GROSSMAN, 1986).

Figura 2.22: Testes sendo realizados no computador *Whirlwind* no MIT em 1951



Fonte: (CARLSON, 2003)

Logo em seguida, o comando de defesa aérea dos Estados Unidos iniciou um projeto da Guerra Fria chamado SAGE (*Semi-Automatic Ground Environment*), cujo objetivo era o de criar defesas antiaéreas por radar, ou seja, um sistema de controle e monitoramento de voos gerenciado por computador de forma a calcular de maneira rápida e eficiente a trajetória das aeronaves soviéticas. No entanto, os computadores desenvolvidos eram destinados à realização de cálculos complexos de física e projetos de mísseis, não sendo adequados para o desenvolvimento de computação gráfica. Além deste, outros projetos foram financiados e desenvolvidos no Laboratório de Servomecanismos do MIT, a exemplo dos sistemas computacionais, hoje conhecidos como Controle Numérico, ou simplesmente, CN (CARLSON, 2003) (GROSSMAN, 1986).

Os esforços gastos no desenvolvimento do controle numérico eram para, inicialmente, explorar o computador *Whirlwind*. No entanto, a pesquisa inicial levou ao desenvolvimento

de um projeto sobre controle numérico para fresamento em 5-eixos de peças complexas de aeronaves, ao invés de usinagem em peças mais comuns e simples (GROSSMAN, 1986).

Em janeiro de 1963, a tese do Dr. Ivan Edward Sutherland, intitulada *Sketchpad: A Man-Machine Graphical Communication System* (Um Sistema de Comunicação Gráfica Homem-Máquina) surgiu como uma das mais importantes publicações da Computação Gráfica de todos os tempos (CARLSON, 2003).

O sistema *Sketchpad* possibilitou que um homem e um computador conversassem rapidamente através de desenhos de linhas. Este software foi um grande avanço para os CADs, do termo em inglês *Computer Aided Design* (projeto auxiliado por computador), pois com ele o usuário podia desenhar usando uma caneta ótica, estabelecendo um processo interativo onde era possível criar desenhos de peças mecânicas, desenhos de projetos elétricos, científicos, matemáticos e desenhos animados, diretamente no monitor do computador (SUTHERLAND, 1964).

O trabalho de Sutherland (1964) levou as empresas automotivas e aeroespaciais americanas a tomarem conhecimento e a iniciarem seus próprios projetos de forma a tentar aproveitar o poder do computador para suas necessidades de projeto, no entanto o custo ainda era bastante elevado. Um dos mais notáveis projetos foi o DAC (*Design Augmented by Computer* – Projeto Aumentado por Computador), considerado um dos primeiros sistemas comerciais de design gráfico assistido por computador, desenvolvido pela *General Motors* em parceria com a IBM (Figura 2.23) (CARLSON, 2003).

Figura 2.23: Sistema de projeto assistido por computador (CAD) - General Motors DAC-1



Fonte: (CARLSON, 2003)

Ao final da década de 60 houve uma enorme quantidade de atividades nas indústrias automobilística e aeroespacial nos setores relacionadas ao CAD fazendo com que várias empresas começassem a criar e comercializar softwares ou hardwares para estas indústrias.

Com o passar do tempo diversas empresas seguiram a mesma tendência do mercado de modo que praticamente toda a indústria passou a utilizar os softwares CAD (SOUZA; ULBRICH, 2013) (SPECK et al., 2005)

Devido às necessidades internas especiais, a indústria aeronáutica produziu alguns dos principais programas de CAD do mundo, dentre os quais estão incluídos os softwares *CADAM* da *Lockheed*, *McAuto* da *McDonnell Douglas* e *CATIA* da *Marcel Dassault*. Começaram a surgir também projetos de pesquisas e produtos comerciais utilizando a tecnologia CAD e CAM (CARLSON, 2003). Ainda neste período, os softwares CAM tinham como principal característica a programação manual.

Para que fosse possível o uso de computador de auxílio à programação das máquinas, foram realizados inúmeros estudos visando o desenvolvimento de um sistema de linguagem adequado de forma a facilitar a programação. A primeira linguagem desenvolvida para esta finalidade foi a APT (*Automatically Programmed Tools* - Ferramentas Programadas Automaticamente). A linguagem APT era utilizada nos sistemas para a descrição simbólica das geometrias, ferramentas e procedimentos para o corte de forma independente da máquina-ferramenta (GROSSMAN, 1986). Linguagens como *Prompt*, *Adapt*, *Compact II*, *Exapt*, *Uniapt*, entre outras, derivam da APT e foram desenvolvidas a partir da ideia da simplificação dos comandos e das terminologias utilizadas nesta programação (SPECK et al., 2005). Posteriormente, era realizada a conversão dos pontos de localização da ferramenta (*CL - Cutter Location ou Cutter Location Data*) para caracterização numérica da trajetória da ferramenta (*Toolpath*) e dados de controle da máquina-ferramenta. A conversão do arquivo de dados CL para o código G (linguagem ISO) foi denominado pós-processamento, onde se especificavam os eixos de movimentação de uma máquina-ferramenta (GROSSMAN, 1986).

No entanto, os sistemas CAM só tiveram um desenvolvimento significativo no final da década de 1970, pois os setores governamentais e industriais passaram a reconhecer a importância da computação gráfica como forma de aumentar a produtividade e a qualidade dos produtos, deste modo, outros sistemas foram desenvolvidos com a finalidade de suprir as necessidades da engenharia, principalmente nas etapas de planejamento, fabricação e inspeção. Na década de 1980 iniciou-se a implantação industrial, permitindo a programação de máquinas CNC via software, empregando a integração CAD-CAM, entretanto, com grandes limitações (SOUZA; ULBRICH, 2013) (SPECK et al., 2005).

No início da década de 1990 o desenvolvimento de hardwares e softwares permitiu que sistemas CAM pudessem ser executados em computadores pessoais, tornando-se mais acessíveis à indústria, porém, ainda existiam algumas limitações na programação CNC por sistemas CAM (SOUZA; ULBRICH, 2013).

Anterior à tecnologia CAD-CAM, utilizava-se uma fresadora-copiadora para a usinagem da superfície através de modelos, num processo que representava longo tempo de fabricação, com baixa precisão dimensional e baixa qualidade de acabamento superficial (SOUZA; ULBRICH, 2013).

2.7 Introdução aos Sistemas CAM (*Computer Aided Manufacturing*)

A Fabricação Assistida por Computador, do inglês, *Computer Aided Manufacturing*, ou simplesmente chamada pelo acrônimo CAM, é um termo amplamente utilizado na literatura industrial. De modo geral, o termo CAM pode ser avaliado sob duas perspectivas. Utilizando-se de um conceito mais abrangente, inclui todos os sistemas baseados em computadores para apoio ao planejamento, controle de equipamentos e tomada de decisões na produção. Numa perspectiva mais restrita, o CAM limita-se a soluções comerciais que ajudam na elaboração de programas CN para máquinas-ferramenta. Apesar de ser considerada uma tecnologia em elevado nível de maturidade, sua utilização levanta questões relativas aos recursos humanos e técnicos disponíveis para que a sua aplicação seja bem sucedida (SOUZA; ULBRICH, 2013) (GROOVER, 2017).

Para Rao (2010), o papel dos computadores na manufatura pode ser classificado em dois grandes grupos: O primeiro grupo inclui as aplicações onde o computador está diretamente ligado ao monitoramento e controle do processo de fabricação. O segundo grupo abrange todas as funções de suporte que tratam essencialmente dos preparativos para operações reais de fabricação e pós-fabricação que os computadores podem fornecer para a conclusão bem sucedida das operações, dentre os quais se enquadram os sistemas CAM.

Conforme afirmam Souza e Ulbrich (2013) e Rao (2010), embora a sigla CAM expresse um sistema genérico para apoiar uma cadeia de manufatura, o termo se refere, em geral, ao software utilizado para desenvolver os programas de controle numérico computadorizado para usinagem de peças e outras aplicações do processo. Para Groover (2017), o termo CAM está relacionado aos sistemas computacionais que suportam o planejamento da produção e incluem o planejamento do processo apoiado por computador, programação de peças em CNC, sequenciamento da produção e planejamento dos recursos de manufatura. Para Besant (1986), o termo CAM possui como principal objetivo transformar a definição geométrica da peça (CAD) em produto acabado, podendo ser usado para procedimentos de fabricação e na produção. A Autodesk (2016), conceituada fabricante de softwares para soluções em engenharia, defende que os aplicativos CAD-CAM são utilizados para projetar um produto e programar processos de fabricação, especificamente usinagem CNC.

Embora existam diferentes correntes de entendimento na literatura sobre o tema CAM, todas englobam o conjunto de recursos e aplicações, componentes físicos e lógicos, inteiramente relacionados com a gestão da fabricação. Contudo, o senso geral quanto ao termo CAM remete à programação CN, conceito que ficou largamente difundido após a integração CAD-CAM (SOUZA; ULBRICH, 2013). Para aplicação deste trabalho, seguindo a linha proposta por Souza e Ulbrich (2013), será considerado como CAM o sistema que calcula as trajetórias para movimentação de modo que a máquina possa realizar a usinagem, além de simular a usinagem calculada, movimentação da máquina e gerar os programas CNC para a fabricação de peças em máquinas CNC específicas, no entanto, levando em consideração a inserção nas atividades de concepção, planejamento e controle da produção.

Um sistema CAM pode ser utilizado para a programação da usinagem de diversos processos de fabricação, tais como torneamento, furação, fresamento, eletroerosão a fio, retificação e prototipagem rápida. No entanto, é no fresamento que esse sistema tem se destacado, pois, neste processo, as movimentações da ferramenta de corte são, muitas vezes, complexas, exigindo recursos computacionais para calculá-las (SOUZA; ULBRICH, 2013).

Para Souza e Ulbrich (2013), as tecnologias computacionais para auxílio à engenharia são denominadas CAx, onde o “x” representa as diferentes etapas de engenharia auxiliadas por computador (*CA – Computer Aided*). Dentre essas etapas se destacam: o projeto (*design*), a fabricação, a engenharia, o planejamento de processo, a qualidade e a produção, correspondendo respectivamente aos sistemas computacionais de apoio às etapas de engenharia: CAD, CAM, CAE, CAPP, CAQ e CAP, além de equipamentos e máquinas de comando numérico computadorizado (CNC), indispensáveis para indústria atual.

Inicialmente o processo de programação CNC era realizado de forma manual, através do conhecimento dos programadores que descreviam o desenho da peça em forma de coordenadas para então definir a trajetória adequada para ferramenta. Diante da necessidade de se produzir peças com superfícies de elevada complexidade geométrica, o método manual passou a ser substituído pela programação auxiliada por computador (SOUZA; ULBRICH, 2013).

A programação manual deve ser utilizada principalmente para a programação de peças relativamente simples, onde a natureza da operação não justifica os gastos com a utilização de softwares. Quando a trajetória da ferramenta possui movimentos complexos, a definição de seus pontos requer auxílio computacional através de sistemas CAD-CAM, tornando inviável a programação manual. Embora em alguns métodos de programação auxiliada por computador as linguagens computacionais de apoio ao processo tenham sido desenvolvidas com comandos e sintaxe próprias, o conjunto de letras, números e símbolos utilizado como programação no controle das máquinas de comando numérico seguem os padrões ISO 66025 e DIN 66025 (SOUZA; ULBRICH, 2013).

Na literatura existem diversos entendimentos sobre a forma de classificação das técnicas de programação CN. Para [Groover \(2017\)](#), existem várias técnicas de programação de peças, sendo as mais importantes, a programação manual, programação assistida por computador, programação assistida por CAD-CAM e entrada manual de dados. [Queiroz e Stemmer \(1986\)](#), classificam os métodos de programação CN em programação manual, programação do tipo APT, sistemas gráfico-interativos e sistemas CAD-CAM. Para [Koren \(1983\)](#), [Souza e Ulbrich \(2013\)](#), a geração de um programa CN pode ser realizada de forma manual ou por auxílio de um software CAD-CAM.

Genericamente, na programação manual o programador cria uma série de comandos necessários à movimentação da máquina. Na programação com o auxílio de um software CAD-CAM, um modelo geométrico tridimensional, que possibilita a usinagem de formas complexas, criado em um sistema CAD, servirá como base para o cálculo das trajetórias da ferramenta em um sistema CAM ([SOUZA; ULBRICH, 2013](#)) ([SCHÜTZER; HELLENO, 2005](#)).

De acordo com os sistemas utilizados, essa transferência do modelo geométrico do CAD para o CAM pode acontecer no mesmo software CAD-CAM, de maneira direta, também conhecida como transferência por formato nativo, ou na transferência realizada com o auxílio de interfaces padronizadas, também conhecida como transferência por formato neutro. Nas transferências no mesmo software, em geral para sistemas de grande porte, o usuário pode alternar entre os módulos do CAD para o CAM sem problemas. A transferência direta é realizada entre sistemas diferentes de um mesmo fabricante, deste modo, através do recurso de associatividade é possível realizar alterações no modelo tridimensional gerado no sistema CAD que são automaticamente reconhecidas e atualizadas no sistema CAM, onde será possível desenvolver simultaneamente de forma eficaz as etapas de projeto e manufatura do produto ([SCHÜTZER; HELLENO, 2005](#)).

Na transferência por formato neutro são utilizados elementos geométricos para descrever o modelo original que será transferido. A conversão geométrica é realizada através dos recursos geométricos das interfaces normalizadas, ou seja, através de sua capacidade de reconhecimento e conversão dos elementos geométricos do modelo original. Para assegurar a qualidade e precisão do modelo convertido é necessário utilizar formatos de interface com o maior de número de recursos geométricos utilizados para transferência, principalmente para os modelos com superfícies complexas, normalmente representadas por elementos geométricos do tipo polinomial, B-Spline e NURBS. Nesse caso, o modelo gerado pelo software CAD é salvo em um formato padronizado ([DÜRR; SCHÜNEMANN; SCHULZE, 2000](#)).

Atualmente, os sistemas CAD-CAM apresentam várias opções de formatos de interfaces normalizadas, sendo os mais conhecidos o IGES (*Initial Graphics Exchange Specification*), STEP (*Standard for the Exchange of Product Model Data*) e VDA-FS (*Verband der Automobilindustrie – Flächenschnittstelle*), que podem ser decodificados por diversos

softwares CAD-CAM diferentes e apresentam diferentes recursos geométricos (SOUZA; ULBRICH, 2013) (SCHÜTZER; HELLENO, 2005).

No padrão IGES, quando um objeto sólido é exportado, a geometria é convertida em superfícies, deste modo, durante a transferência de dados é comum a perda de informações geométricas, sendo necessário retrabalho no modelo. O formato VDA-FS tem conceito similar ao IGES, ambos utilizam arquivos do tipo ASCII com informações definindo as equações matemáticas do modelo CAD, onde por um lado as informações geométricas são levadas em consideração, mas, por outro, as informações sobre cor e layers não são (SOUZA; ULBRICH, 2013) (SCHÜTZER; HELLENO, 2005).

Com a finalidade de minimizar os problemas de conversão de padrões, a linguagem STEP foi desenvolvida pela ISO (*International Organization for Standardization*) com o objetivo de se tornar uma linguagem universal de transferência de dados, de forma a suprir as deficiências dos padrões de conversão anteriores e abranger todas as etapas do processo de produção. Enquanto os padrões anteriores contemplavam somente os dados geométricos do produto, as normas STEP contemplam todo o ciclo de vida, desde a concepção até à reciclagem (SOUZA; ULBRICH, 2013) (SCHÜTZER; HELLENO, 2005). Deste modo, é possível avaliar que a utilização do formato STEP assegura uma melhor qualidade e precisão do modelo convertido por apresentar maior quantidade de recursos geométricos das interfaces normalizadas, quando comparado aos formatos IGES e VDA-FS (SCHÜTZER; HELLENO, 2005).

Durante a conversão, se o modelo original apresentar elementos geométricos que não fazem parte dos recursos geométricos do formato de interface escolhido, este será eliminado ou substituído por outro elemento geométrico o que pode acarretar em problemas relacionados à qualidade e precisão do modelo convertido e, conseqüentemente, para o produto final. Neste caso, alguns problemas de comunicação relacionados à geometria podem ser observados, tais como a perda de geometrias, erros dimensionais e de posição, perda de suavidade da superfície, geração de superfícies duplicadas, perda de fronteiras, perdas de superfícies, perda de árvore binária etc (SCHÜTZER; HELLENO, 2005).

Outra possibilidade que os fabricantes encontraram para a conversão e transferência do modelo geométrico do CAD para o CAM é a triangularização da geometria 3D. Neste procedimento o software CAD converte o modelo geométrico em um modelo matemático através da criação de malhas de triângulos que representam a forma geométrica do modelo original e que será utilizada para calcular as trajetórias de usinagem. Esta malha de triângulos se aproxima da região geométrica modelada no CAD por meio de um valor de tolerância definido pelo usuário (SOUZA; ULBRICH, 2013). Desta forma, com a conversão em um modelo matemático não serão transferidos elementos geométricos, mas informações de pontos definidos por coordenadas cartesianas (X, Y, Z), permitindo assim uma comunicação

simples entre os sistemas CAD-CAM (KNOPPERS; GUNNINK, 2000). O inconveniente deste processo está na conversão para segmentos de reta (triângulos) de uma geometria gerada por um modelo matemático complexo, capaz de representar precisamente qualquer forma geométrica (SOUZA; ULBRICH, 2013). Em caso de superfícies complexas, como a malha de triângulo consiste de elementos planos, é necessária a introdução de uma tolerância de contorno (DÜRR; SCHÜNEMANN; SCHULZE, 2000).

Em estudos realizados por Holtz (2009), foram avaliadas distorções nas trajetórias das ferramentas utilizando uma geometria importada de um arquivo em formato padrão e outra criada no software integrado CAD-CAM. Foram constatadas alterações nas trajetórias de ferramenta calculadas por um software CAM quando este utilizou uma geometria importada de um arquivo com formato padrão. As mesmas distorções nas trajetórias não foram encontradas quando se utilizou a geometria criada no mesmo software integrado CAD-CAM.

Após a etapa de transferência de modelos geométricos entre os sistemas, para que o sistema CAM possa realizar a função de calcular as trajetórias para movimentação da ferramenta é necessário que diversos dados de entrada sejam fornecidos pelo programador e se gere primeiramente um arquivo nativo, conhecido como CLDATA (*Cutter Location Data File*) que contém apenas a trajetória da ferramenta representada por coordenadas no plano cartesiano. Por não estar na linguagem de programação ISO 6983 (equivalente à ISO 66025) - que descreve um formato das instruções do programa para máquinas de controle numérico - este arquivo nativo não pode ser reconhecido pela máquina CNC, apenas pelo sistema CAM (CHOI; JERARD, 2012).

Segundo Souza e Ulbrich (2013), estes dados de entrada podem ser classificados em informações iniciais, tais como, a geometria a ser usinada, definição da ferramenta de corte, definição das regiões a serem usinadas em cada operação, e em informações complementares, como as estratégias de usinagem, parâmetros de usinagem e movimentações da ferramenta.

Para que seja possível o software CAM gerar o programa CN da superfície a ser usinada, o programador deverá informar para o sistema quais as operações desejadas para a fabricação do modelo além da melhor estratégia de corte a ser usada em cada operação. De acordo com a geometria da peça, cada estratégia apresenta características próprias no que se refere ao tempo e qualidade da superfície usinada. Os algoritmos matemáticos e as metodologias para cálculo das trajetórias da ferramenta são criados em cada empresa desenvolvedora de sistemas CAM e representam segredo industrial (SOUZA; ULBRICH, 2013).

No fresamento, principalmente de geometrias complexas, as operações podem ser classificadas como: operação de desbaste, pré-acabamento, alívio de cantos e acabamento. Os cálculos de trajetórias em sistemas CAM devem ser considerados como a principal função

do software CAM, pois o resultado da operação de fabricação está diretamente relacionado com a qualidade da trajetória calculada, implicando na qualidade da superfície usinada, erros dimensionais e tempos de cálculo de usinagem (SOUZA; ULBRICH, 2013) (HELLENO, 2004).

Após realização dos cálculos das trajetórias, o software CAM poderá realizar a simulação das mesmas de modo a verificar invasões indesejáveis na geometria do modelo, adequação das trajetórias calculadas pelo CAM, simular colisões etc. É importante observar que as trajetórias da ferramenta são geradas no formato computacional do software CAM e ainda não é o programa CNC que irá para máquina-ferramenta. O programa CN é criado partindo das trajetórias numa etapa conhecida como pós-processamento (SOUZA; ULBRICH, 2013).

Na maioria dos casos, um módulo adicional integrado ao sistema CAM, conhecido como pós-processador, será o responsável por transformar o arquivo nativo em programa CN, contendo a linguagem apropriada para o CNC em questão (HELLENO, 2004). Portanto, dois elementos são necessários para criar o programa CNC: Trajetória da ferramenta calculada pelo CAM em formato computacional (CLDATA) e um pós-processador, que lê o arquivo CLDATA e o converte em um programa para ser executado em uma dada configuração de máquina CNC (SOUZA; ULBRICH, 2013).

Principalmente na usinagem em cinco eixos podem ocorrer erros no pós-processamento. Uma simulação realizada no CAM pode não corresponder a alguns movimentos da máquina, podendo ocasionar colisões, por exemplo. Softwares específicos para a simulação do programa CNC e da máquina, como exemplo, o software Vericut, conferem maior segurança ao processo (SOUZA; ULBRICH, 2013).

Apesar do uso da programação com auxílio do software CAM proporcionar diversos benefícios, como já mencionados anteriormente, Smid (2007) defende que para se tornar um bom programador CNC, é necessário promover o conhecimento e a compreensão dos princípios de programação manual. Segundo Smid (2007), na programação manual o programador é capaz de fazer o que os computadores não podem e nunca poderão fazer: pensar, concentrar-se, realizar avaliações constantes, tomar decisões, usar a experiência. Esses são instrumentos inerentes aos humanos, não para computadores. Para Smid (2007), a programação CNC é como o trabalho de um artista: nunca pode ser totalmente automatizado.

Segundo Groover e Zimmers (1983), o programador deverá definir a geometria da peça, especificar o melhor percurso para a ferramenta e determinar a sequência das operações, já o computador interpreta os dados de entrada e realiza os cálculos de trajetória, parâmetros de corte e pós-processamento. Para Souza e Ulbrich (2013) a identificação das melhores

opções de trajetórias CAM a serem utilizadas na operação de fresamento não é uma tarefa simples e deve ser realizada pelo usuário, pois, os sistemas CAM atuais não conseguem identificar as melhores estratégias em casos específicos, principalmente em geometrias de formas complexas.

Neste cenário, os softwares CAM vêm sendo desenvolvidos de forma a reduzir o tempo, consequentemente, os custos do processo, levando em consideração diversas variáveis, tais como as relativas a máquina-ferramenta, processo, colisões e interações indesejadas entre a peça e a ferramenta, além de ser possível realizar estimativas do tempo total de usinagem. Entretanto, ainda existem grandes desafios a serem superados quando se remete aos resultados esperados e o que é conseguido na prática, principalmente quando se trabalha em escala reduzida, onde, por exemplo, fatores relacionados à geometria e estabilidade da ferramenta, velocidades de corte e avanço e força de usinagem possuem influência significativa na qualidade do processo (SOUZA; ULBRICH, 2013).

A exemplo disto, em estudos realizados por Hoffmann, Souza e Santos (2015), foi possível avaliar as oscilações da velocidade de avanço no microfresamento de formas complexas através do tempo de usinagem calculado por um programa CAM e o tempo real de usinagem conseguido na prática com um centro de usinagem específico para microfresamento. Como resultado dos testes, o CAM levou apenas 1 segundo para realizar a simulação da trajetória proposta, contra 63 segundos conseguidos na prática pelo centro de usinagem. Para Hoffmann, Souza e Santos (2015), o tempo estimado pelo CAM, mantido constante a todo momento, não considera a capacidade de movimentação da máquina, deste modo, trazendo discrepâncias nos resultados.

Nesse sentido, estudos significativos também foram realizados por Monaro (2011) com o objetivo de avaliar os motivos da diferença entre a estimativa de tempo do sistema CAM e o tempo real de usinagem realizado pela máquina-ferramenta. Para Monaro (2011), apesar de existirem diversos questionamentos, os motivos pelos quais os tempos estimados obtidos de um software CAM são tão diferentes dos tempos obtidos durante o processo real de usinagem, como constatado por Hoffmann, Souza e Santos (2015), são de que os softwares CAM ignoram as condições dinâmicas da máquina-ferramenta, como por exemplo, aceleração e desaceleração, assim, atuando apenas como ferramentas que realizam o cálculo de trajetórias e programação de movimentos.

Com o objetivo de minimizar estes efeitos, resultados apreciáveis foram encontrados por Monaro (2011) ao desenvolver um sistema de apoio ao CAM utilizando um índice de desempenho dinâmico (*IDDyn*) baseado nas informações da máquina-ferramenta, do CNC e da estratégia de usinagem, desta maneira, permitindo a otimização da trajetória da ferramenta e o cálculo do tempo real de usinagem. Com o *IDDyn*, Monaro (2011) sugere que o índice passe a ser utilizado como parâmetro de avaliação na cadeia de manufatura

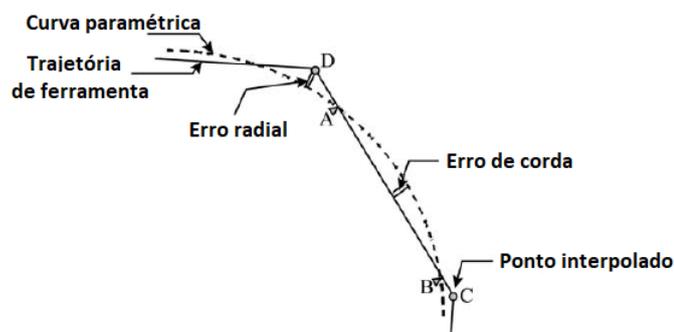
CAD-CAM, tornando-se um importante fator de decisão na escolha da melhor estratégia de usinagem. Outro exemplo de ferramenta desenvolvida para monitoramento de variáveis características da máquina-ferramenta, cujo objetivo é prever o tempo de usinagem na fabricação de geometrias complexas pode ser encontrado em [Moreira \(2011\)](#).

2.8 Trajetória de Ferramenta e Tolerância CAM

A definição da tolerância CAM é de extrema importância durante a programação das estratégias de usinagem, pois, este valor está diretamente relacionado à precisão requerida pelo processo. O software CAM ajusta a trajetória de ferramenta dentro de uma banda de tolerância conhecida como *chord error*, desta forma, quanto menor for a banda de tolerância, maior será a precisão da usinagem, ou seja, mais próximas estarão as trajetórias da ferramenta da superfície CAD a ser usinada, entretanto, menores serão os segmentos de retas que deverão ser calculados, o que acarretará em impactos significativos no tempo de usinagem ([SOUZA; ULBRICH, 2013](#)) ([COELHO, 2010](#)) ([LASEMI; XUE; GU, 2010](#)).

Associado à introdução dessa tolerância, surgem os chamados erros radiais e de corda, responsáveis pelos desvios geométricos da trajetória de ferramenta, que determinará a geometria final a ser usinada ([HSU; YEH, 2002](#)). A Figura 2.24 apresenta de forma ilustrativa estes erros.

Figura 2.24: Erro radial e de corda na trajetória de ferramenta em uma curva paramétrica

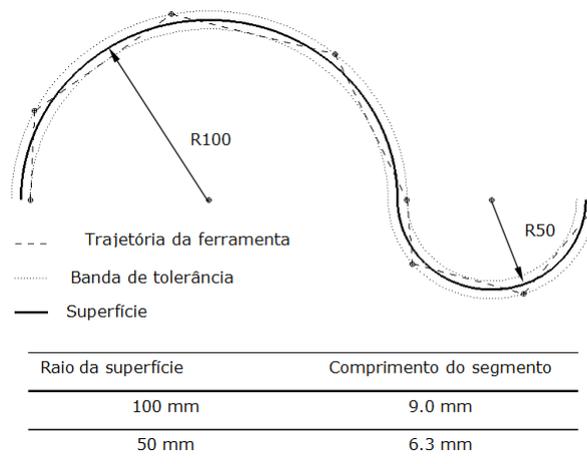


Fonte: Adaptado de ([HSU; YEH, 2002](#))

De acordo com Hsu e Yeh (2002), o erro radial é a distância perpendicular entre os pontos interpolados e a curva paramétrica, já o erro de corda é a distância máxima entre a secante CD e o arco secante AB, ilustrados na Figura 2.24. Para curvas paramétricas, a precisão da interpolação em termos de posição é determinada principalmente pelo erro radial e pelo erro do corda. Basicamente, o erro radial é causado pelo erro de arredondamento dos sistemas de computação. Entretanto, com os modernos processadores de computação para aplicações de alta precisão, o erro radial é geralmente insignificante. Portanto, o erro de corda é a principal preocupação em algoritmos gerais de interpolação ([HSU; YEH, 2002](#)).

Nos softwares CAM, para descrever a trajetória de ferramenta na usinagem de uma superfície complexa, utiliza-se comumente a interpolação linear de segmentos de reta, de acordo com a norma DIN 66025. Neste método, o software CAM descreve a trajetória de ferramenta utilizando-se de segmentos de reta que melhor se adequam à faixa de tolerância estabelecida. O comprimento destes segmentos está relacionado com as tolerâncias de cálculo no software CAM e com o grau de curvatura da superfície, conforme pode ser visto na Figura 2.25 (SOUZA; ULBRICH, 2013).

Figura 2.25: Tamanhos dos segmentos de reta de um programa CN



Fonte: (SOUZA; ULBRICH, 2013)

Da análise da Figura 2.25 é possível perceber que a curvatura da superfície, formada por dois semicírculos de raios diferentes, possui influência significativa no tamanho dos segmentos de retas do programa CN criado, para uma mesma banda de tolerância estabelecida. Nota-se, portanto, que os segmentos de reta são maiores para o maior raio de geometria, logo, menores para o menor raio de geometria. Conseqüentemente, os programas CN apresentarão maior volume de dados, apresentando uma maior quantidade de linhas, o que, de modo particular, poderá limitar as velocidades de avanço durante a usinagem para geometrias de formas complexas.

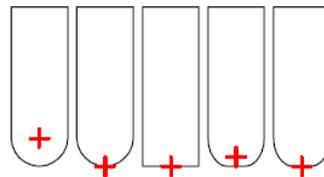
Para realizar o cálculo dos pontos que irão compor a trajetória de ferramenta, inicialmente, é necessário que o software CAM possa identificar duas posições (SOUZA; ULBRICH, 2013) (SOUZA, 2011):

1. O ponto de contato da ferramenta com a superfície a ser usinada, conhecido como CC (*Cutter Contact* - Ponto de Contato).
2. O ponto que representa a trajetória da ferramenta, denominado CL (*Cutter Location* - Ponto de localização da ferramenta), com base no ponto de contato da ferramenta com a superfície e na orientação do eixo da fresa.

As linhas do programa CN gerado contém as informações cartesianas de cada ponto CL. Entretanto, o *Cutter Contact* é o ponto que deve estar dentro da banda de tolerância, não a trajetória da ferramenta ou o *Cutter Location* (COELHO, 2010) (SOUZA; ULBRICH, 2013).

De acordo com Cavalheiro (1998), os softwares CAM geram códigos CLDATA que possuem as coordenadas dos pontos de localização da ferramenta e que precisam ser interpretadas pelo controle CNC da máquina ferramenta. Estes pontos variam de acordo com o fabricante do software, entretanto, na maioria dos casos é localizado no centro de rotação da ferramenta, conforme ilustra a Figura 2.26.

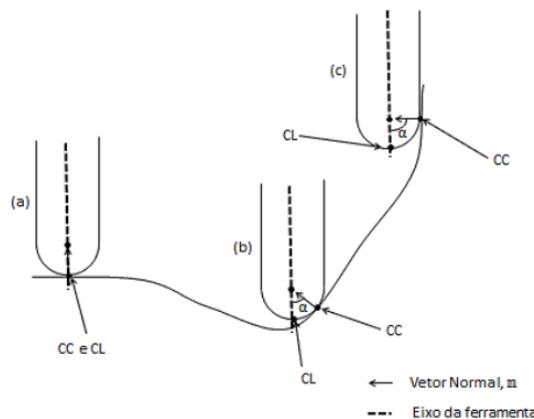
Figura 2.26: Pontos de referência na ferramenta de corte para as coordenadas CL



Fonte: (CAVALHEIRO, 1998)

A Figura 2.27 ilustra diferentes condições de localização dos pontos CC e CL em uma superfície, para uma determinada trajetória de ferramenta (CAMARGO, 2015).

Figura 2.27: Diferentes posição de usinagem em uma superfície



Fonte: (CAMARGO, 2015)

Nota-se que, ao tempo em que a ferramenta realiza a usinagem, ocorrem mudança de posição do seu ponto de contato (CC) com a superfície usinada. Observa-se, portanto, que quando a ferramenta está numa orientação em que seu eixo central está na mesma posição do vetor normal à superfície, os pontos CC e CL coincidem (Figura 2.27-a).

À medida que a ferramenta percorre a trajetória, os pontos CC e CL variam em função do ângulo entre a ferramenta e o vetor normal à superfície (Figura 2.27-b). Na última posição, Figura 2.27-c, a distância entre os pontos CC e CL será máxima quando o eixo

central da ferramenta estiver perpendicular ao vetor normal à superfície.

Para calcular os pontos de trajetória CL e CC, o software CAM, inicialmente, calcula o ponto de contato da ferramenta sobre a geometria CAD 3D em um determinado instante. A partir de uma banda de tolerância CAM adotada, os segmentos de reta serão criados entre dois pontos CC consecutivos. No momento em que o ponto CC da ferramenta atingir o limite da banda de tolerância, um novo segmento de reta é calculado. Em seguida, o software CAM realiza uma conversão para a localização central da ferramenta (CL), pontos interpolados linearmente que irão compor o programa CN final (ARIAS; SOUZA, 2008) (COELHO, 2010) (CAMARGO, 2015).

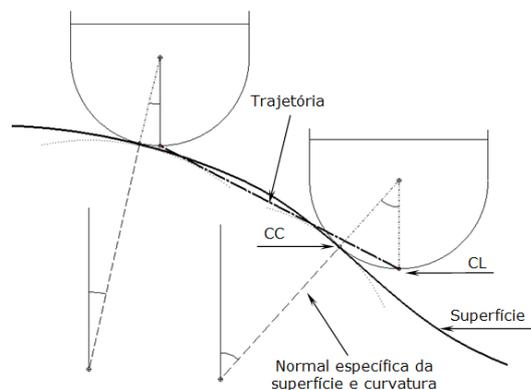
Para Choi e Jerard (2012), com a aplicação de um cálculo vetorial é possível deduzir a Equação 2.1, que apresenta o cálculo da conversão do ponto CC para o CL, onde r é o raio da ferramenta e n o vetor normal à superfície,

$$CL = CC + rn \quad (2.1)$$

De acordo com Souza e Ulbrich (2013), um método para calcular CC em superfícies polinomiais é a divisão do próprio polígono de controle que descreve a curva ou superfície. Esta subdivisão pode identificar pontos sobre a curva ou superfícies, os quais podem ser o CC. Depois de identificado o CC, deve-se calcular o CL.

A Figura 2.28 demonstra um método para calcular os pontos de localização da ferramenta (CL), a partir de pontos CC já encontrados, para dois pontos de uma trajetória de ferramenta. No exemplo em tela, conhecendo a direção normal da superfície no ponto CC desejado e o ângulo em que essa normal se encontra em relação ao eixo das coordenadas, pode-se encontrar o CL através do raio da ferramenta (SOUZA; ULBRICH, 2013).

Figura 2.28: Cálculo do ponto CL a partir do ponto CC



Fonte: (SOUZA; ULBRICH, 2013)

2.9 Sistemas CAM Comerciais

Durante muitos anos o uso dos sistemas CAM ficou restrito à utilização em empresas de grande porte, tais como as dos ramos automobilístico e aeroespacial. Visando atender a uma demanda das pequenas e médias empresas, no que tange à disseminação da tecnologia e redução dos custos de aquisição, as empresas desenvolvedoras dos sistemas CAx (*softwarehouses*) passaram a comercializar módulos completamente independentes (*stand-alone*), que não necessitam de um software auxiliar para seu funcionamento. Outro fator que possibilitou o acesso das empresas a esse tipo de tecnologia foi a migração das aplicações em CAM do tradicional sistema operacional UNIX para plataformas do *Windows NT* (SOUZA; ULBRICH, 2013).

Um sistema CAM independente importa modelos geométricos provenientes de qualquer aplicação CAD, geralmente em 3D, necessitando assim da importação de geometrias em formato padrão, como por exemplo, IGES, STL, VDA-FS, para que sejam geradas as trajetórias das ferramentas e fornecidos os parâmetros de usinagem especificados. Em algumas aplicações mais simples, o desenho CAD 2D ainda pode ser utilizado pelo CAM (SOUZA; ULBRICH, 2013).

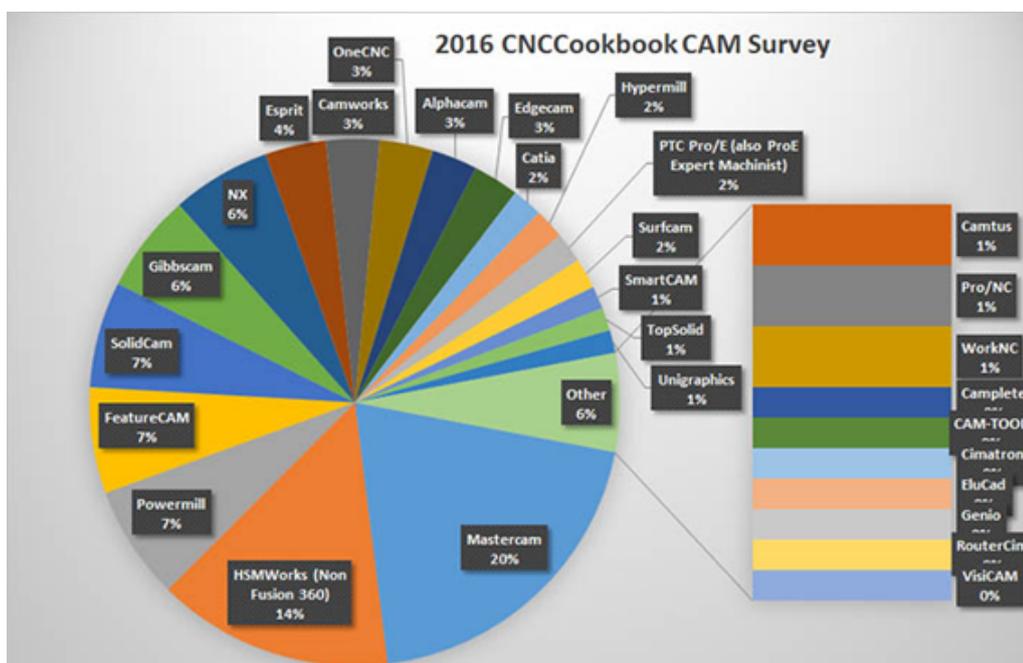
Atualmente existem inúmeros sistemas CAM, grande parte destes integrados em pacotes CAD-CAM, disponíveis no mercado para as mais variadas aplicações e preços, o que torna o trabalho de obter uma visão clara sobre a capacidade e limitação de cada sistema uma tarefa difícil. Outro fato comum no mercado de softwares CAM é a recorrente fusão de grupos empresariais que por vezes resulta na integração em um único sistema de diversas funcionalidades. A indústria da computação é muito dinâmica de modo que fusões e aquisições são tão comuns quanto falências e falhas (SMID, 2007). A fusão entre as empresas *Planit Holdings* e *Vero Software*, da *Autodesk*, que em 2012 adquiriu a tecnologia CAM da *HSMWorks*, ou a *3D Systems* que em 2015 completou a aquisição de todas as ações da empresa de software CAD-CAM israelense *Cimatron*, aumentando de forma significativa seu portfólio de softwares e serviços para manufatura, são exemplos.

Além das fusões aqui mencionadas, também é comum parcerias entre empresas que detêm a tecnologia CAD com empresas conceituadas em tecnologia CAM, de modo que possam integrar num único produto CAD-CAM o *know-how* destas empresas. A *Dassault Systèmes*, fabricante do software *Solidworks* é exemplo disto. Uniu-se a oito parceiros de CAM líderes do setor para criar soluções CAD-CAM totalmente integradas para clientes que usam o software *Solidworks*. Como exemplo destas parcerias, os fabricantes dos softwares *BobCAM*, *CAMWorks*, *hyperMILL*, *Mastercam*, *VisualMILL* e *SolidCAM* criaram versões especiais de seus produtos que são executadas diretamente dentro do software CAD *Solidworks*, dessa forma, permitindo aos clientes projetar e criar trajetórias de ferramenta CN no mesmo sistema (SOLIDWORKS, 2013).

Outro exemplo é a *3D Systems*, fabricante do software *GibbsCAM*, que mais uma vez foi certificada pela *Autodesk* para o software de CAD *Autodesk Inventor*. Entre outros benefícios, esta certificação assegura que usuários possam usar o *GibbsCAM* para programar peças com geometrias simples e complexas diretamente no *Inventor* (CIMDATA, 2017b).

Em pesquisas realizadas por Warfield (2017) sobre a tendência do crescimento dos softwares CAM no mercado mundial, o segmento de softwares CAM *high-end*, pacotes mais caros e com mais funcionalidades, merece destaque. De acordo com os dados da pesquisa, os 5 maiores fabricantes de softwares CAM, de um total de 29 que receberam votos na pesquisa, representaram cerca de 54% do mercado *high-end* em 2016, uma queda de 6% em relação ao ano de 2015. Para Warfield (2017), este mercado permanece altamente fragmentado, com alguns grandes desenvolvedores e muitos outros de médio e pequeno porte. A Figura 2.29 representa a análise do mercado global para softwares CAM no segmento *high-end*:

Figura 2.29: Análise global de mercado para softwares CAM no segmento high-end



Fonte: (WARFIELD, 2017)

Outro destaque da pesquisa são os softwares do segmento *low-end*, conhecidos como softwares CAM de baixo custo. Usados principalmente por amadores, o uso destes softwares vem crescendo e ganhando destaque devido ao seu excelente custo-benefício. Com 67% da fatia do mercado, se destaca o software CAM *Fusion 360* da *Autodesk*, seguido pelos softwares *CamBam* e *MeshCam*, com 10% e 9%, respectivamente. Outros softwares como o *DeskProto*, *SheetCam* e *DolphinCam* mantiveram as mesmas posições e perderam mercado em 2016, muito provavelmente em função do aumento da parcela de mercado do *Fusion 360* em relação ao ano de 2015 (de 55% para 67%). De modo a avaliar tendências do mercado a partir de dados históricos de pesquisas realizadas nos anos

de 2010, 2012, 2014, 2015 e 2016, mais informações podem ser consultadas em [Warfield \(2017\)](#).

Dados importantes sobre o mercado CAM também são divulgados anualmente pela conceituada empresa americana de consultoria a [CIMdata \(2017a\)](#). O Relatório de Análise de Mercado para softwares CAM (*CAM Market Analysis Report*) e serviços relacionados, elaborado pela [CIMdata \(2017a\)](#), fornece uma análise global de mercado incluindo informações detalhadas sobre tamanho, tendências, segmentação, resultados de pesquisas de mercado etc. A [CIMdata \(2017a\)](#) relata que desde 2002, com a melhoria nas economias globais, o mercado de softwares CAM mostrou um crescimento modesto, mas constante. Houve um crescimento mundial na venda de máquinas-ferramentas e na produção industrial, onde foi dada maior ênfase ao funcionamento eficiente destas máquinas, uma vez que as empresas de fabricação fortaleceram suas posições competitivas. Segundo a [CIMdata \(2017a\)](#), as compras dos softwares CAM estão relacionadas a todos esses fatores, particularmente com as vendas de máquinas-ferramenta.

A [CIMdata \(2017a\)](#) estima que, com base nos pagamentos dos consumidores finais, o mercado mundial de produtos CAM e serviços relacionados cresceu 6,9% em 2016. Os pagamentos estimados de consumidores finais cresceram de US\$ 1,81 bilhão em 2015 para US\$ 1,94 bilhão em 2016. Segundo o vice-presidente de pesquisa da [CIMdata \(2017a\)](#), Stan Przybylinski, “*mesmo com o menor consumo de máquinas-ferramenta, as empresas continuam investindo em softwares CAM*”. Para 2017, a projeção foi de que o crescimento da manufatura continuaria e os pagamentos dos consumidores finais para softwares CAM aumentariam para US\$ 2,06 bilhões, um crescimento de cerca 6,4% em relação ao ano de 2016.

Neste mercado de softwares CAM altamente fragmentado e competitivo, algumas empresas vem se destacando. Conforme relatório de análise de mercado divulgado pela [CIMdata \(2017a\)](#), pelo 23º ano consecutivo, a *CNC Software (Mastercam)*, detém a maior participação no mercado em 2017, com mais de 236.000 unidades instaladas em todo o mundo, quase o dobro da segunda colocada, a *Siemens PLM Software (NX CAM)*, seguida da *Vero Software (Edgecam)*, com pouco mais de 80.000 unidades instaladas.

Embora pareçam convergir na indicação do software CAM líder no mercado nas pesquisas realizadas por [Warfield \(2017\)](#) e [CIMdata \(2017a\)](#), parece não existir um consenso quanto aos números e posições apresentadas para elencar os outros softwares CAM nas atuais situações, para o mesmo ano de avaliação, por exemplo. De maneira comparativa, são percebidas variações muito significativas de posições de classificação para os mesmos softwares avaliados. Embora as fontes consultadas afirmarem que suas pesquisas retratam de maneira fiel as tendências do mercado CAM, não são apresentadas de maneira clara as formas e os critérios utilizados para elaboração das mesmas, desta forma, não são

conhecidas as nuances do processo avaliativo, que ficaram estreitamente ligadas aos critérios estabelecidos por cada grupo de pesquisa.

Alavancados pela busca de sistemas produtivos modernos, na incessante corrida pelo aumento na produtividade e competitividade do mercado, os fabricantes de sistemas CAD-CAM aprimoram constantemente seus produtos de modo que os benefícios desses sistemas são cada vez maiores e imprescindíveis, pois, antecipam erros, economizam tempo e dinheiro, além de estarem diretamente focados no diferencial competitivo do mercado em que atuam.

Neste contexto, a exclusividade de alguns recursos é algo facilmente identificável no mercado de softwares CAM. Muitos desenvolvedores de programas CAM assumem que não podem oferecer recursos e ferramentas de software para todas as necessidades do mercado, assim, pacotes específicos para cada setor ou pacotes especiais são configurados em diferentes níveis de preço e qualidade de modo a atender às necessidades específicas de cada cliente. Na perspectiva de soluções disponíveis comercialmente para gerar programas CN, as principais funcionalidades que um sistema CAM deve possuir, incluem (AUTODESK, 2016) (AUTODESK, 2012) (MASTERCAM, 2014) (EDGE CAM, 2012) (HYPERMILL, 2012) (NX, 2013) (SOUZA; ULBRICH, 2013) (SMID, 2007):

- ✓ Interface intuitiva e amigável.
- ✓ Pequena curva de aprendizado.
- ✓ Definição da geometria do material bruto e da peça usinada.
- ✓ Escolha dos equipamentos usinagem.
- ✓ Biblioteca de ferramentas.
- ✓ Criação de estratégias de usinagem mais adequadas para regiões específicas.
- ✓ Pré-visualização e simulação das operações de usinagem.
- ✓ Estimativa dos tempos de usinagem.
- ✓ Configuração para pós-processamento e geração de código CN.
- ✓ Possibilidade de comunicação com outros softwares.
- ✓ Disponibilidade e suporte em diversas línguas.
- ✓ Módulos adicionais.
- ✓ Tutoriais integrados e assistência ao usuário (*Help*).

Nas aplicações em microescala, um fator importante a ser avaliado na escolha do software CAM é se o mesmo oferece os recursos necessários considerando as variáveis do processo discutidas nas Seções 2.4 e 2.5 deste trabalho.

De certa forma, as microfresadoras, ferramentas de corte e o algoritmo usado para calcular a trajetória em sistemas CAM precisam ser bem coordenados de modo a produzir trajetórias de ferramenta otimizadas e tolerâncias de movimento mais rigorosas, o que requer melhor distribuição de pontos no algoritmo da trajetória da ferramenta, em vista disso, apresentando precisão superior aos utilizados em usinagem convencional. No micro-fresamento, a ferramenta, o software e a máquina precisam trabalhar juntos (SRIDHARAN, 2005) (SRIDHARAN, 2010).

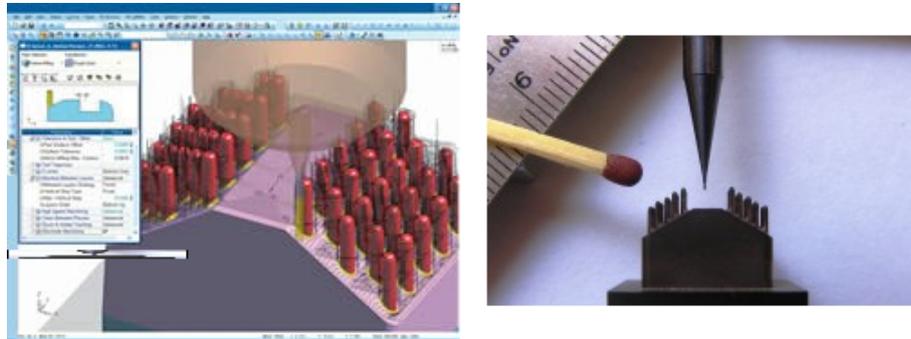
Softwares dedicados à microusinagem estão comercialmente disponíveis como *CimatronE Micro-Milling* e *G-Wizard*. No entanto, além do custo destes pacotes serem geralmente elevados, podem existir problemas como a compatibilidade entre sistemas, infraestrutura, dentre outros (GHERMAN et al., 2017). Conforme Warfield (2017?), o *G-Wizard* é uma calculadora de velocidades e avanços que foi desenvolvida com a finalidade de atender aos requisitos específicos da microusinagem. Ela usa algoritmos diferentes para o cálculo de velocidades e avanços de ferramentas com diâmetros inferiores a 0.125 "(3 mm). Além disso, a *G-Wizard* possui uma infinidade de recursos que auxiliam no gerenciamento da deflexão da ferramenta, calculando a largura, profundidade de corte e velocidade de avanço ideais, o que é considerado crítico para aplicações em microusinagem.

De acordo com Promolding (2005), Shmuel (2005) Korn (2006), Kennedy, DeVor e Rosochowski (2010), Gherman et al. (2017), pesquisas significativas foram realizadas no projeto "Micro Milling", entre os anos de 2003 e 2005, financiado pela *European Community* e patrocinado pelo *Fraunhofer Institute for Production Technology* (IPT), cujo objetivo era usar o microfresamento para a produção de moldes de injeção de alta precisão com estruturas complexas e alta qualidade superficial, para tanto, desenvolvendo um software de simulação CAM dedicado.

O projeto contou com a colaboração dos principais desenvolvedores de ferramentas de corte, fabricantes de máquinas-ferramenta e de moldes, dentre os quais a *Promolding*, *StructoForm*, *Intermekano*, *Micro Mechatronic Technologies*, *Kern Micro*, *Magafor* e a *Cimatron*, que atualmente comercializa o software CAD-CAM *CimatronE Micro Milling*, desenvolvido no projeto, com um algoritmo exclusivo e estratégias de usinagem específicas aplicadas ao microfresamento. O programa leva em consideração o raio da aresta de corte da ferramenta e a estrutura do grão, no entanto, o software comercialmente disponível ainda não leva em consideração os efeitos da escala atômica e o amassamento, em particular (GHERMAN et al., 2017). Vale destacar que a tecnologia CAM dedicada ao microfresamento foi incluída no *Cimatron* a partir da versão E7.0, em 2005, hoje o software encontra-se na

versão E14. A Figura 2.30 ilustra a simulação de usinagem no módulo CAM do *CimatronE Micro Milling* e em seguida a peça já usinada.

Figura 2.30: À esquerda, o software *Cimatron* simulando a usinagem, à direita, a peça já usinada



Fonte: (CIMATRON, 2013)

Para Sridharan, vice-presidente de engenharia do grupo *Cimatron*, o software *CimatronE Micro Milling* gera trajetórias capazes de produzir tolerâncias muito rigorosas, como por exemplo, $0,000004''$ ($0,0001$ mm), usando ferramentas de corte de $0,004''$ ($0,1$ mm) de diâmetro ou menores, trabalhando com uma rotação de 150.000 rpm, ou mais rápido ainda. Os algoritmos fracionam as trajetórias da ferramenta em um grande número de pontos específicos e localizam esses pontos com uma precisão maior do que nos programas CAM convencionais que foram desenvolvidos para operações em macroescala. O software armazena dados de cortes anteriores e monitora o "microstock" remanescente em tempo real. Nas operações de desbaste e re-desbaste o microfresamento geralmente é realizado com ferramentas de diâmetros maiores, já as ferramentas menores são usadas na etapa de acabamento, sendo assim, é preciso saber exatamente onde as ferramentas maiores deixaram o material remanescente para que não haja sobrecarga da ferramenta na etapa de acabamento (KENNEDY; DEVOR; ROSOCHOWSKI, 2010) (CIMATRON, 2005).

De acordo com Pagáč (2011), a escolha de um programa de controle adequado para o microfresamento é uma etapa muito importante, pois, nem todo software CAM é capaz de calcular eficientemente as trajetórias da ferramenta. Além disso, a precisão dos cálculos para o microfresamento é cerca de $0,0005$ mm. Para Pagáč (2011), à época, sistemas CAD-CAM muito renomados no mercado mundial, como o *CATIA*, por exemplo, não possuíam recursos adequados para microfresamento em termos de eficiência e precisão, nesse caso, o software de aplicação comercial recomendado para microfresamento era o *Cimatron*.

Ferdinand Krall, relata que a quantidade de material remanescente deixado no passe final de acabamento é considerado um ponto crítico no microfresamento e deve ser calculado como uma porcentagem do diâmetro da ferramenta. Uma regra geral é deixar sobremetal (*stock*) entre 3% e 8% do diâmetro da ferramenta utilizada no acabamento para o passe

final de acabamento, além de ser importante deixar uma espessura de material uniforme no desgaste. Krall recomenda que sejam utilizadas porcentagens mais baixas para materiais mais difíceis de usinar e maiores para materiais mais fáceis de usinar, visto que, uma quantidade grande de material a ser removido no acabamento aumentará a chance de apresentar baixa qualidade superficial (KENNEDY; DEVOR; ROSOCHOWSKI, 2010).

Em estudos realizados por Hoffmann, Souza e Santos (2015) foram avaliadas as trajetórias calculadas por um sistema CAM no microfresamento de formas complexas, para tanto, utilizando o programa *NX V9* do desenvolvedor *Siemens PLM Software*. De modo a analisar a uniformidade do tamanho dos segmentos de reta gerados pelo software CAM, foram criadas trajetórias e alterados os valores de tolerância para 0,01 mm, 0,001 mm e 0,0001 mm. Dentre os resultados encontrados, destaca-se que o tamanho dos segmentos de reta calculados pelo programa CAM seguiu uma tendência linear para as tolerâncias de 0,01 mm e 0,001 mm, conforme esperado. No entanto, para a tolerância de 0,0001 mm, indicada para o microfresamento, observou-se que houve um elevado desvio-padrão, não apresentando uniformidade nos tamanhos dos segmentos de reta que compõem a trajetória, apresentando dispersão não linear, fato não esperado e que demonstra que o algoritmo de cálculo do software CAM deve ser aprimorado, pois, além de ocasionar uma variação da velocidade de avanço (*feed rate*), elevando o tempo de usinagem, podem prejudicar o acabamento superficial da peça usinada.

Neste contexto, Hoffmann, Souza e Santos (2015) refletem sobre a carência de conhecimentos voltados ao processo de microfresamento de geometrias complexas e sugerem que os algoritmos do software CAM para cálculo de trajetórias complexas de pequenas dimensões e baixos valores de tolerância sejam aprimorados, mostrando limitações do programa ao trabalhar em microescala.

Apesar da necessidade de aprimoramentos dos softwares CAM para trabalho em microescala, ao utilizar a experiência do chão de fábrica e, em alguns casos, a modelagem mecânica (*mechanistic modelling*), é possível desenvolver estratégias de usinagem apropriadas para microusinagem, por exemplo, relacionando as semelhanças entre a usinagem de alta velocidade (HSM) e microusinagem, como nos casos onde é necessário evitar movimentos com transição abrupta de direção da ferramenta (*sharp tool motion*). No entanto, como a maioria dos modelos mecânicos assumem que a ponta da ferramenta é completamente afiada e o raio possui valores mínimos, uma vez que em operações de microcorte o raio de ponta da ferramenta é de tamanho comparável à estrutura de grãos do material da peça (0,5-3 μm), os modelos mecânicos precisam ser melhorados (GHERMAN et al., 2017).

Conforme Gherman et al. (2017), ao se usar um software CAM destinado a simulação de usinagem em escala convencional para microescala é importante estar ciente de possíveis problemas de tradução CAD-CAM que podem ocorrer devido às pequenas dimensões

envolvidas, além de que o software de simulação deve ser capaz de processar com alta precisão numérica para evitar problemas com pequenas características da peça a ser usinada. Além destes, outros fatores a serem considerados no software CAM para aplicações em microfresamento apresentados por Sridharan (2005), Sridharan (2010), Korn (2006), Warfield (2017?), Cimatron (2013), Cimatron (2005), Cimatron e Kern (2009), Cimatron (2012), Gherman et al. (2017), Dimov (2004), Popov (2006), Popov (2007), serão discutidos na Secção 2.10 deste Capítulo.

Para o desenvolvimento desta pesquisa, devido a impossibilidade de explorar todos os softwares de CAM comercialmente disponíveis, foram selecionados os softwares CAD-CAM *Cimatron (3D Systems)*, *Inventor HSM (Autodesk)*, *CATIA (Dassault Systemes)* e *NX CAM (Siemens PLM)*. Além destes, uma lista ampliada com os principais desenvolvedores e tipos de softwares CAD-CAM pode ser consultada no Apêndice A deste trabalho.

2.10 Características Desejáveis no Software CAM para Aplicações em Microfresamento

Ao contrário das operações de fresamento convencional, a velocidade de usinagem e a complexidade das trajetórias da ferramenta no microfresamento fazem com que o ajuste parcial dos programas durante a sua execução seja algo difícil, pois, não há como os operadores das máquinas descreverem exatamente como a ferramenta se comporta durante o corte, além de não disporem de tempo suficiente para reagir a quaisquer erros e/ou inconsistências ocorridas na programação de modo a realizar mudanças necessárias para otimizar o processo. Além disso, as estratégias das trajetórias de ferramentas que podem ser adequadas para o trabalho em fresamento convencional nem sempre apresentam resultados satisfatórios ao reduzirem a escala para trabalhar com aplicações de microfresamento (KORN, 2006) (HOFFMANN; SOUZA; SANTOS, 2015) (VÁZQUEZ, 2015) (KENNEDY; DEVOR; ROSOCHOWSKI, 2010) (GHERMAN et al., 2017).

Nas operações de microfresamento os sistemas CAM são utilizados para usinar peças pequenas e na maioria dos casos com geometrias complexas e, portanto, precisam ser otimizados, pois deverão ser capazes de lidar com tolerâncias rigorosas e usinagem ultra precisa, ademais, uma vez que o operador não pode interferir no processo de modo a evitar a quebra da ferramenta, o sistema CAM deve considerar com precisão a área da seção transversal do cavaco (*chip load*) ao longo do processo de usinagem (SRIDHARAN, 2005) (SRIDHARAN, 2010) (KENNEDY; DEVOR; ROSOCHOWSKI, 2010) (GHERMAN et al., 2017).

Para tanto, características e módulos CAD-CAM específicos são necessários. Neste sentido, para apoiar adequadamente o processo de microfresamento, o software CAM deve ser

capaz de atender aos seguintes requisitos:

Tradução de dados: No microfresamento a precisão e a qualidade da geometria CAD são extremamente críticas. O software CAM deverá ser capaz de ler e traduzir com precisão os arquivos de dados CAD. Erros de tradução de dados entre pacotes CAD e CAM diferentes afetam a precisão da usinagem, sendo ainda mais acentuadas no microfresamento (SRIDHARAN, 2005) (SRIDHARAN, 2010) (WARFIELD, 2017?) (KORN, 2006) (CIMATRON; KERN, 2009).

Pacotes CAD-CAM integrados são desejáveis, pois, eliminam quaisquer erros nas traduções de dados do processo. Minimizar a necessidade de múltiplas conversões de dados é fundamental para manter a precisão do modelo (WARFIELD, 2017?) (KORN, 2006) (CIMATRON; KERN, 2009).

Além disso, os softwares CAM deverão incluir recursos de alta precisão incorporados ao sistema CAD de modo a fornecer procedimentos de reparação no modelo geométrico a ser usinado com a precisão e tangência adequadas dentro do sistema CAM, como por exemplo, no tamponamento e na extensão de superfícies, reduzindo o tempo de programação e garantindo que a geometria usinada atenderá aos requisitos de qualidade exigidos. Mesmo pequenas lacunas, sobreposições ou descontinuidades geométricas no modelo CAD podem afetar significativamente a qualidade da superfície (SRIDHARAN, 2005) (SRIDHARAN, 2010) (KENNEDY; DEVOR; ROSOCHOWSKI, 2010) (KORN, 2006) (WARFIELD, 2017?) (CIMATRON, 2005) (CIMATRON; KERN, 2009) (KENNEDY; DEVOR; ROSOCHOWSKI, 2010).

Um erro de tradução que resulte em uma lacuna de 0,005 mm entre duas superfícies, por exemplo, pode não ser problemático em uma peça grande, porque ainda assim é possível corrigi-la durante uma etapa posterior de polimento. No entanto, na fabricação de micromoldes ou microcomponentes, o polimento nem sempre é possível, sendo assim, essa mesma lacuna entre superfícies de uma peça microfresada seria claramente perceptível (SRIDHARAN, 2010) (KORN, 2006) (CIMATRON; KERN, 2009).

Tolerâncias: Calcular as trajetórias das ferramentas com tolerâncias de até 0,1 micrômetro (0,0001 mm) considerando as restrições físicas da máquina utilizada. As tolerâncias apertadas exigem algoritmos de trajetórias especiais com maior precisão e melhor distribuição de pontos a fim de obter uma superfície sem que seja necessário realizar uma etapa de polimento posterior (SRIDHARAN, 2005) (SRIDHARAN, 2010) (KORN, 2006) (CIMATRON; KERN, 2009).

Para produzir tolerâncias e acabamentos de superfície proporcionais ao seu tamanho, as ferramentas de microfresamento exigem trajetórias mais precisas (KENNEDY; DEVOR; ROSOCHOWSKI, 2010). No entanto, a tolerância de trajetória extremamente pequena

tornará o software muito mais lento, produzindo programas CNC muito maiores e com segmentos de trajetória da ferramenta muito além da capacidade de processamento do controlador, sendo necessário trabalhar com equipamentos com maior capacidade de processamento (VÁZQUEZ, 2015) (WARFIELD, 2017?). Nesse sentido, módulos utilizados para satisfazerem as demandas de microfresamento devem ser integrados ao sistema CAD-CAM (ARDILA, 2012).

Outro fator importante a ser considerado é a necessidade de ajuste das configurações de resolução do Software CAD-CAM. As configurações de resolução padrão da maioria destes softwares funcionam bem para tarefas típicas de usinagem, porém, podem não ser precisas o suficiente para a microusinagem (WARFIELD, 2017?).

Movimentação da ferramenta: Em aplicações convencionais de fabricação de moldes e matrizes, por exemplo, um operador geralmente ajusta manualmente as velocidades de avanço, altera as ferramentas, quando necessário, ou edita manualmente a trajetória da ferramenta de maneira a deixá-la mais eficiente. Porém, em virtude do tamanho da peça e das ferramentas usadas no microfresamento, um operador não possui nenhuma maneira prática de visualizar ou ouvir o que está acontecendo durante o processo de usinagem. Desta forma, o software CAM para microfresamento deve ser capaz de manter com precisão a área da seção transversal do cavaco constante durante o corte, além de suportar estratégias de usinagem otimizadas para os procedimentos de desbaste e redesbaste (KORN, 2006).

Com dimensões que podem ser menores que 1 mm, as ferramentas de desbaste utilizadas no microfresamento são muito sensíveis a área da seção transversal do cavaco e podem quebrar facilmente. Os movimentos de redesbaste impedem a quebra da ferramenta, mantendo as solicitações de carga na ferramenta constante, além de proporcionar maior qualidade superficial (CIMATRON; KERN, 2009) (KORN, 2006).

A capacidade do software CAM de suportar estratégias de desbaste eficientes, com a área da seção transversal do cavaco constante e velocidades de avanço variáveis é fundamental para o microfresamento. Ademais, o software CAM deverá ser capaz de suportar o uso de múltiplas fresas com diferentes velocidades rotacionais (*spindle speeds*), velocidade de avanço e parâmetros de corte em uma única operação de acabamento, gerando assim uma trajetória suave da ferramenta (*smooth tool path*) (CIMATRON; KERN, 2009) (GHERMAN et al., 2017).

Na usinagem de cavidades de moldes em escala convencional, por exemplo, a geração da trajetória da ferramenta através dos sistemas CAM é considerada uma tecnologia consolidada. O programador CNC tem grande flexibilidade na escolha das ferramentas de corte, com diferentes geometrias e tamanhos. No entanto, em operações de microescala, durante o planejamento do processo faz-se necessário maximizar o diâmetro da ferramenta

para as operações de corte, pois, a rigidez e a resistência da ferramenta de corte tornam-se ainda mais críticos nestes casos (VÁZQUEZ, 2015).

Quando o diâmetro da microfresa possui dimensões próximas das da microgeometria pretendida, a geração da trajetória da ferramenta é mais difícil, se comparado com a programação em escala convencional. Para superar esses desafios no microfresamento é necessário realizar algumas considerações durante o planejamento do processo de corte, tais como a abordagem de geometria segmentada para a geração da trajetória da ferramenta, utilizar fases de desbaste (*roughing*) e acabamento (*finishing*), além da combinação o uso de fresas de topo esférico e de topo reto (VÁZQUEZ, 2015).

O fresamento discordante ou convencional (*conventional milling ou up milling*) é mais adequado para o microfresamento do que o fresamento concordante (*climb milling ou down milling*), principalmente quando a ferramenta é comprida ou a parede da peça é muito fina. Existem uma série de argumentos para isso, no entanto, o foco principal é a forma de evitar a deflexão da ferramenta, uma vez que as microfresas são particularmente suscetíveis a isto (KORN, 2006) (WARFIELD, 2017?) (GHERMAN et al., 2017). No fresamento discordante a direção do avanço da ferramenta de corte é oposta à sua rotação (SANDVIK, 2012).

A decisão entre usar o fresamento discordante ou concordante para aplicações de microfresamento depende da característica da peça que se deseja obter. Considerando as características tipicamente encontrados em micromoldes e microcomponentes, a usinagem convencional é geralmente o método escolhido (KORN, 2006).

Sobremetal remanescente: Usar o conhecimento do sobremetal remanescente durante todo o processo de modo a ajustar a velocidade de avanço para as solicitações reais de carga na ferramenta, diminuindo o tempo de usinagem e protegendo a ferramenta da quebra. À medida que a forma da peça muda drasticamente durante a operação de desbaste, o software deverá ser capaz de simular o sobremetal remanescente após cada camada. Isso permite que a ferramenta entre em locais que foram limpos pelas camadas anteriores, permitindo que ferramentas mais curtas possam usinar áreas profundas (SRIDHARAN, 2005) (SRIDHARAN, 2010) (KENNEDY; DEVOR; ROSOCHOWSKI, 2010) (KORN, 2006) (WARFIELD, 2017?) (CIMATRON; KERN, 2009).

Para reduzir as solicitações de carga na ferramenta durante os passes de acabamento, o software CAM deve ser capaz de lidar com operações de redesbaste dentro do procedimento de re-usinagem durante a utilização do conhecimento de sobremetal remanescente (SRIDHARAN, 2005) (SRIDHARAN, 2010) (KENNEDY; DEVOR; ROSOCHOWSKI, 2010) (KORN, 2006) (WARFIELD, 2017?) (CIMATRON; KERN, 2009).

Usinagem multi-eixo: As operações de microusinagem requerem centros de usinagem

especializados voltados para o microcorte. Ao contrário de uma máquina-ferramenta convencional, os centros de microusinagem exigem maior estabilidade, possuem ultra precisão e devem operar em ambientes controlados. Assim, ao selecionar máquinas-ferramentas para aplicações de microcorte, todos esses fatores precisam ser considerados de forma holística e não isoladamente (GHERMAN et al., 2017).

Um número crescente de aplicações de microfresamento requer a utilização de usinagem multi-eixo, como por exemplo, na fabricação de rotores em miniatura. As máquinas de cinco eixos permitem a utilização de pequenas ferramentas com opções de inclinação que resultam em melhor qualidade de superfície, eliminando a necessidade de múltiplas ferramentas. Em comparação com as aplicações de 5 eixos convencionais, aplicações de microfresamento exigem uma maior flexibilidade no controle da orientação da ferramenta, bem como capacidade de monitorar o modelo de sobremetal em várias dimensões (SRIDHARAN, 2005) (SRIDHARAN, 2010) (CIMATRON; KERN, 2009).

Estratégias de usinagem: Uma estratégia de usinagem selecionada para uma determina peça necessita de uma série de fatores que serão empregados para concluir o trabalho com sucesso, tais como relacionados ao tipo de ferramenta, trajetória da ferramenta, material removido, além de outros parâmetros tecnológicos correspondentes (DIMOV, 2004).

Outro fator importante a ser considerado é a capacidade que o software CAM deve possuir de gerar estratégias de usinagem otimizadas para microfresamento, como a usinagem de desbaste, redesbaste e acabamento na mesma operação (KENNEDY; DEVOR; ROSOCHOWSKI, 2010) (KORN, 2006) (CIMATRON; KERN, 2009) (GHERMAN et al., 2017).

No entanto, o uso da mesma ferramenta para vários recursos irá diminuir consideravelmente a sua vida útil, portanto, o software CAM deverá ser capaz de gerar trajetórias de ferramenta mais suaves e que proporcionem um melhor controle sobre as forças de corte. Um exemplo disto está na usinagem trocoidal que pode ser utilizada em estratégias para o fresamento de ranhuras (*slot*) e canais, pois, ao alimentar a ferramenta em um padrão de *looping*, permite um controle preciso da penetração de trabalho (a_e), uma preocupação particular quando o objetivo é trabalhar toda a ranhura com a mesma fresa (DANFORD, 2016).

De acordo com experimentos realizados por Danford (2016) em placas de titânio com características da área microfluídica, as operações de microfresamento exigiram a usinagem de canais com acabamentos extremamente suaves. As trajetórias da ferramenta em movimentos trocoidais facilitaram o controle preciso da penetração de trabalho, garantindo assim forças de corte consistentes e a capacidade de usinar um canal de 0.006" (0,15 mm), obtendo um acabamento superficial de 0,2 μm (0,0002 mm) em um único passe. Nesse caso, para obter o acabamento superficial desejado, a mudança de ferramentas teria sido arriscada, além de menos eficiente.

Tradicionalmente, as operações de desbaste e acabamento são realizadas separadamente, usando diferentes velocidades rotacionais, velocidades de avanço e profundidades de corte (*depth of cut*). No entanto, isso nem sempre poderá ser possível para o microfresamento. Após a operação de desbaste, por exemplo, a espessura final da parede poderá ser tão fina que não será capaz de suportar uma operação adicional de acabamento, fazendo com que as paredes da peça vibrem (*chatter*), prejudiquem e possivelmente até fraturem a superfície da peça usinada (SRIDHARAN, 2010) (KORN, 2006) (WARFIELD, 2017?) (CIMATRON; KERN, 2009).

Chatter é um tipo de vibração auto excitada (ou trepidação) entre a ferramenta de corte e a peça durante a formação do cavaco, podendo ocorrer tanto em fresamento convencional como no microfresamento e, geralmente sob condições associadas a um aumento nas taxas de remoção de material. É caracterizada pela perda de precisão dimensional das peças, ruídos indesejáveis, fraca qualidade superficial, desgaste prematuro e avarias na ferramenta, além da redução da taxa de remoção de material (AFAZOV, 2012).

Nesses casos, estratégias especiais podem ser necessárias ao usinar paredes finas (*thin walls*) ou saliências (*boss*) de peças em miniatura, devendo combinar estratégias de desbaste e acabamento em uma única operação, fresando camada por camada no eixo “Z” em lados alternados da parede. Ainda, a fresa deve ser inclinada para fora da parede de modo a garantir um único ponto de contato entre a parede e a fresa (KORN, 2006) (WARFIELD, 2017?) (CIMATRON; KERN, 2009) (GHERMAN et al., 2017).

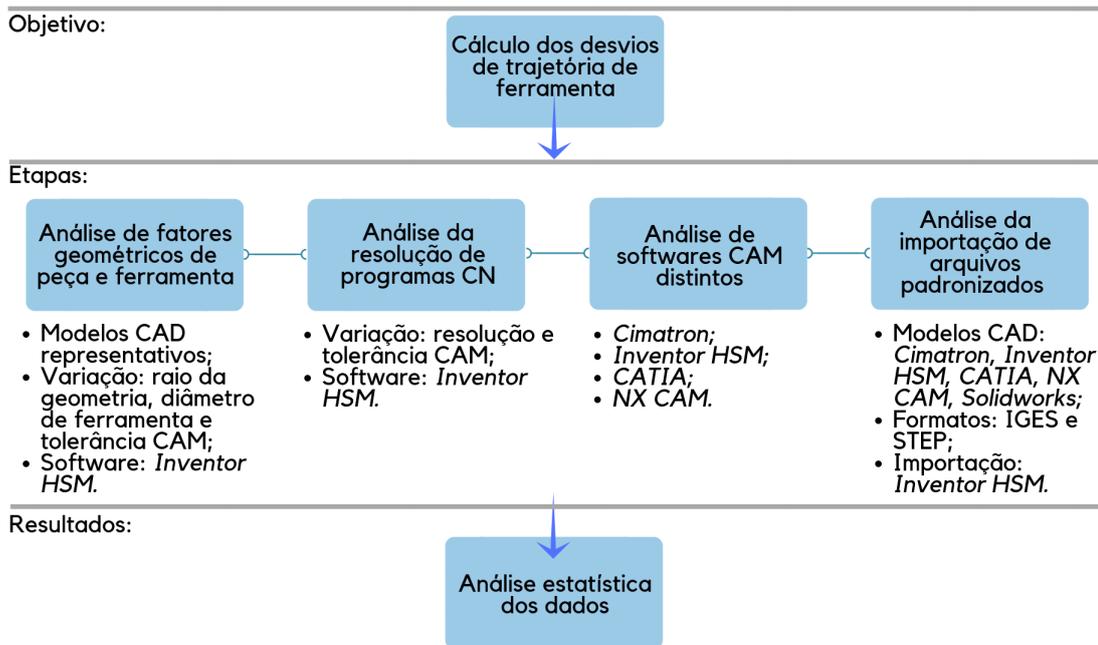
Outras considerações importantes para a geração de trajetórias da ferramenta e parâmetros de processo são (GHERMAN et al., 2017):

- ▶ as velocidades rotacionais e a velocidade de avanço devem ser intimamente ligadas devido à dinâmica da formação de cavacos (*chips*);
- ▶ a força de grandes fluxos de fluido refrigerante pode provocar deflexão das micro ferramentas, introduzindo imprecisões ao processo;
- ▶ deve ser dada atenção cuidadosa à deflexão da ferramenta; cargas relativamente pequenas na ferramenta possuem influência significativa e podem impactar durante o corte;
- ▶ é importante que o regime de corte resulte no uso de cargas adequadas nas ferramentas, pois uma carga insuficiente resultará em atrito (*rubbing*) na superfície sem a formação de cavacos, todavia, o excesso de carga causará deflecções ou ainda, a quebra da fresa;
- ▶ esforços devem ser feitos para manter cargas constantes na ferramenta de maneira a maximizar sua precisão e evitar a quebra.

Trabalho Experimental e Desenvolvimento da Pesquisa

Neste capítulo serão discutidos os métodos empregados para o desenvolvimento desta pesquisa. Serão apresentados os procedimentos utilizados para cálculo dos desvios de trajetória de ferramenta, critérios adotados para análise de precisão de trajetórias de ferramenta, além das etapas seguidas para a definição dos fatores e níveis de controle utilizados para análise estatística dos dados. A Figura 3.1 ilustra, de maneira esquemática, as etapas seguidas nesta pesquisa.

Figura 3.1: Esquema dos experimentos realizados



Fonte: elaborado pelo autor

3.1 Cálculo dos Desvios de Trajetória

O critério utilizado nesta dissertação para determinar a precisão das trajetórias de ferramenta foi o do desvio de trajetória de ferramenta. Neste trabalho, este desvio é definido como sendo a menor distância entre a superfície da ferramenta e a superfície da peça, medida em uma posição qualquer ao longo da trajetória da ferramenta, na direção normal local da superfície. Ou seja, considerando que em uma condição ideal a ferramenta e a peça deveriam estar em contato tangente em qualquer posição da

trajetória em que se analise, entende-se como ponto em desvio, qualquer posição ao longo da trajetória de ferramenta que resulte em uma condição em que ferramenta e peça não se tangenciem, quer seja por estarem afastadas entre si, quer seja pela ferramenta ter invadido a peça.

O desvio de trajetória de ferramenta pode ser calculado, portanto, como mostrado na Equação 3.1, calculando-se a distância entre a posição local ao longo da trajetória de ferramenta $(X_l; Y_l; Z_l)$ e o ponto ideal local $(X_l'; Y_l'; Z_l')$, que, por sua vez, seria a posição local da ferramenta que resultaria na tangência entre ferramenta e peça.

$$\Delta = (X_l'; Y_l'; Z_l') - (X_l; Y_l; Z_l) \quad (3.1)$$

Considerando que as trajetórias de ferramenta são expressas por meio de um conjunto de pontos de localização de ferramenta (CL), obtidos a partir do arquivo CLDATA dos programas CN pós-processados, qualquer ponto CL $(X_{cl}; Y_{cl}; Z_{cl})$ resultará em um ponto de contato (CC) com a superfície $(X_{cc}; Y_{cc}; Z_{cc})$, que pode ser considerado uma posição local e, portanto, terá um ponto ideal local $(X_{cc}'; Y_{cc}'; Z_{cc}')$ e um desvio de trajetória associado.

Esse desvio será chamado neste trabalho de desvio CC de trajetória de ferramenta, ou simplesmente de Δ_{cc} , conforme será visto na Subseção 3.1.1 deste Capítulo, na condição em que, existam pontos em desvio entre a posição local ao longo da trajetória e o ponto ideal local, que por sua vez, resultaria em tangência com a superfície.

Assim, o desvio CC de trajetória de ferramenta, para um CC qualquer, pode ser expresso pela Equação 3.2:

$$\Delta_{cc} = (X_{cc}'; Y_{cc}'; Z_{cc}')$$

(3.2)

Entretanto, quando representa a situação em que a ferramenta ao se deslocar de um ponto CL qualquer ao ponto CL subsequente, se distancia da tangência com relação à superfície da peça, quer seja por invadi-la ou por se afastar de sua superfície em decorrência da interpolação linear utilizada pelo software CAM, este desvio será chamado de desvio cordal, desvio de corda ou Δ_{co} , conforme será visto na Subseção 3.1.2 deste Capítulo.

Assim sendo, o desvio cordal de trajetória de ferramenta para um ponto qualquer entre dois pontos CL subsequentes, pode ser expresso pela Equação 3.3:

$$\Delta_{co} = (X_{co'}; Y_{co'}; Z_{co'}) - (X_{co}; Y_{co}; Z_{co}) \quad (3.3)$$

Logo, para se analisar a precisão de uma determinada trajetória de ferramenta, é preciso calcular um ponto ideal local (cc') para cada ponto (cc) e um ponto ideal local (co') para cada ponto médio entre dois pontos CL subsequentes.

Como será visto na Secção 3.3, a geometria adotada para a peça teste em todos os experimentos realizados foi a de 1/4 de cilindro. A escolha desta forma é justificada por representar uma superfície tridimensional com curvatura, ser facilmente modelável em qualquer CAD e por sua seção transversal poder ser representada pela equação de um arco, uma geometria simples e muito bem conhecida.

Além disso, importantes premissas para os experimentos foram adotadas:

- ✓ o eixo de simetria da superfície cilíndrica deve ser paralelo ao eixo Y;
- ✓ a estratégia utilizada deve ser do tipo de varredura em *zig*, com passes sempre em uma direção perpendicular ao eixo de simetria do cilindro;
- ✓ para cada trajetória de ferramenta, os desvios devem ser calculados apenas para um trecho de 1 passe (1 arco), considerado do primeiro ao último ponto em que há contato (tangência), ou seja, desconsiderando movimentos de engajamento e saída;
- ✓ as trajetórias de ferramenta devem ser compostas apenas por interpolações lineares, de maneira a ter pontos em maior quantidade e distribuídos de maneira mais homogênea ao longo do trecho selecionado.

Assim, considerando que:

- * o desvio de trajetória para cada posição deve ser medido ao longo da direção normal local da superfície;
- * o ponto ideal local corresponde à posição local que resultaria na tangência entre superfície de ferramenta e peça;
- * A trajetória de contato, composta pelos pontos CC (*Cutter Contact*) será sempre um arco de raio conhecido, igual ao raio de curvatura da superfície cilíndrica em usinagem, contido no plano XZ;

foi possível realizar o cálculo dos desvios de trajetória de ferramenta em cada ponto CC

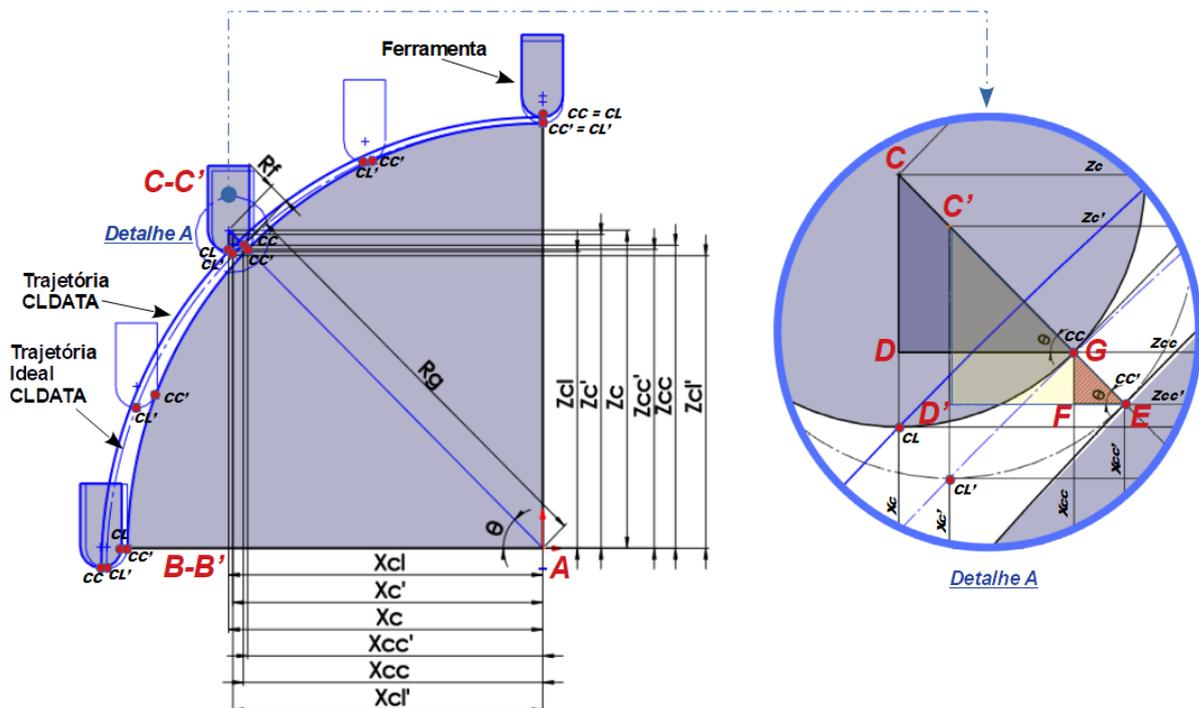
$(X_{cc}; Z_{cc})$, Δ_{cc} , e em cada ponto médio $(X_m; Z_m)$ entre dois pontos CL subsequentes, Δ_{co} , conforme serão descritos nas Subseções 3.1.1 e 3.1.2.

3.1.1 Desvio CC de Trajetória de Ferramenta (Δ_{cc})

A Figura 3.2 traz uma representação gráfica para o cálculo do desvio CC de trajetória de ferramenta, em cada ponto CC $(X_{cc}; Z_{cc})$, calculado obedecendo os seguintes passos:

- ⇒ cálculo da localização do centro da ponta esférica da ferramenta (Z_c) para a condição local, a partir das coordenadas X_{cl} e Z_{cl} do programa CN e do raio da ferramenta (R_f) e, para condição ideal local ($Z_{c'}$), conhecendo o raio da geometria (R_g) e o raio da ferramenta (R_f);
- ⇒ cálculo da direção normal local da superfície, definida pelo ângulo de direção normal θ , medido no plano XZ (ver figura 3.2);
- ⇒ cálculo dos pontos de contato local $(X_{cc}; Z_{cc})$ e ideal local $(X_{cc'}; Z_{cc'})$;
- ⇒ cálculo do desvio Δ_{cc} .

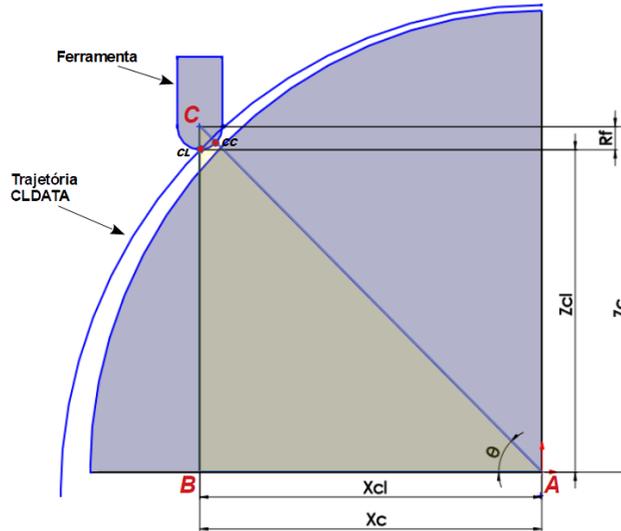
Figura 3.2: Representação para o cálculo do desvio CC de trajetória de ferramenta



Fonte: elaborado pelo autor

Da análise da Figura 3.2, a partir da posição em Z do arquivo CLDATA (Z_{cl}) e conhecendo o raio da ponta esférica da ferramenta (R_f), foi possível encontrar a coordenada Z do centro do topo esférico da fresa (Z_c). De modo particular, a Figura 3.3 ilustra esta relação.

Figura 3.3: Representação geométrica do triângulo ABC para determinação do ângulo de direção normal θ



Fonte: elaborado pelo autor

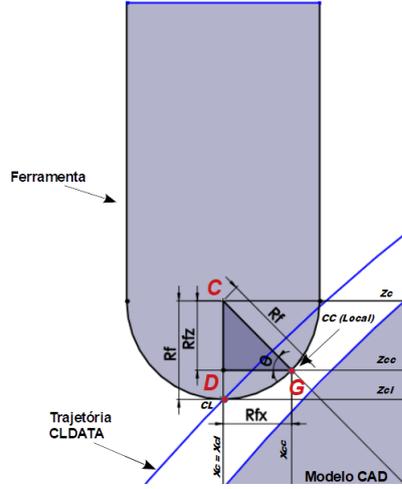
Assim, a Equação 3.4 expressa o cálculo utilizado para determinar a posição do centro do topo da ferramenta (Z_c):

$$Z_c = Z_{cl} + R_f \quad (3.4)$$

Com a determinação da posição do centro do topo da ferramenta (Z_c), assumindo que a posição em X permanece a mesma ($X_c = X_{cl}$), da relação trigonométrica observada a partir do triângulo ABC da Figura 3.3, é possível calcular o ângulo de direção normal θ do ponto CC em análise, conforme Equação 3.5:

$$\text{tg}(\theta) = \frac{Z_c}{X_c} = \frac{Z_{cl} + R_f}{X_{cl}} \rightarrow \theta = \text{arctg}\left(\frac{Z_{cl} + R_f}{X_{cl}}\right) \quad (3.5)$$

Na sequência, o θ foi utilizado para calcular o ponto de contato local ($X_{cc}; Z_{cc}$), determinado considerando a relação trigonométrica do triângulo GDC ilustrado no *Detalhe A* da Figura 3.2 e reproduzido na Figura 3.4.

Figura 3.4: Representação geométrica do triângulo GDC para a determinação de X_{cc} e Z_{cc} 

Fonte: elaborado pelo autor

Da relação trigonométrica do triângulo GDC da Figura 3.4, para um ângulo θ e raio da ponta esférica da ferramenta (R_f) conhecido, foi necessário identificar as componentes nas direções perpendiculares X e Z do raio da ferramenta, aqui denominados de R_{f_x} e R_{f_z} , para determinação do ponto de contato local CC, dado pela posição local $X_{cc}; Z_{cc}$, conforme Equações 3.6 e 3.7.

$$\cos(\theta) = \frac{R_{f_x}}{R_f} \rightarrow R_{f_x} = R_f \cdot \cos(\theta) \quad (3.6)$$

$$\sin(\theta) = \frac{R_{f_z}}{R_f} \rightarrow R_{f_z} = R_f \cdot \sin(\theta) \quad (3.7)$$

Logo, pela Figura 3.4, temos que:

$$X_{cc} = X_c - R_{f_x} \quad (3.8)$$

$$Z_{cc} = Z_c - R_{f_z} \quad (3.9)$$

Substituindo, respectivamente, as Equações 3.6 e 3.7 em 3.8 e 3.9:

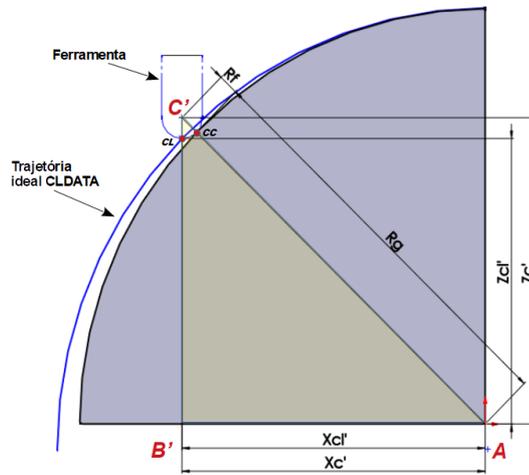
$$X_{cc} = X_c - R_f \cdot \cos(\theta) \quad (3.10)$$

$$Z_{cc} = Z_c - R_f \cdot \text{sen}(\theta) \tag{3.11}$$

Desta forma, foi possível encontrar o ponto local $(X_{cc}; Z_{cc})$ para cada ponto CL da trajetória da ferramenta que resulta em um ponto de contato (*CC - Cutter Contact*) da ferramenta com a superfície da peça, onde, X_c , Z_c , R_f e θ , são conhecidos.

Para o ponto ideal local $(X_{cc'}; Z_{cc'})$, ou seja, ponto que resultaria em tangência da ferramenta com a superfície da peça, a posição do centro da esfera da ferramenta ($Z_{c'}$), nesta nova posição, pode ser visualizada na Figura 3.5.

Figura 3.5: Representação geométrica do triângulo $AB'C'$ para a determinação de $Z_{c'}$



Fonte: elaborado pelo autor

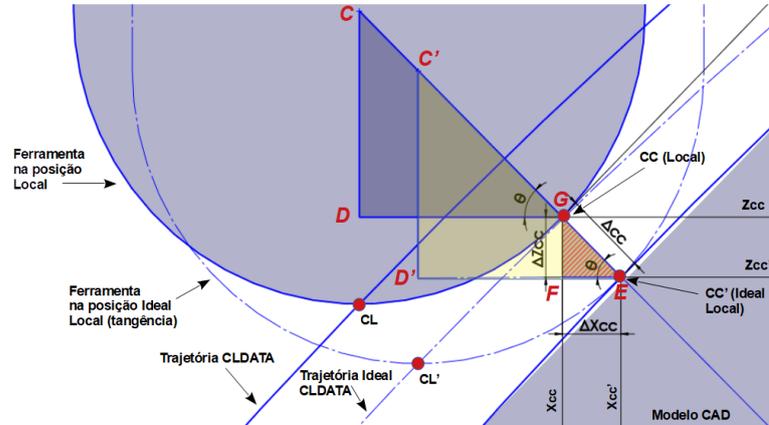
A partir da análise da Figura 3.5 é possível concluir que o ponto $Z_{c'}$ da ferramenta na condição de tangência é dada pela Equação 3.12.

$$Z_{c'} = R_g + R_f \tag{3.12}$$

Portanto, pela análise da Figura 3.5, para cada ponto CL' da trajetória da ferramenta, o ponto ideal local de contato (CC') da ferramenta com a superfície da peça, dado pela posição ideal local, posição de tangência da ferramenta com a peça, as coordenadas $X_{cc'}$ e $Z_{cc'}$, serão dadas pelo raio da geometria (R_g) na direção normal local à superfície θ .

Logo, atendendo a relação trigonométrica do triângulo EFG , formado pela variação das posições, local e ideal local, das coordenadas X e Z ($\Delta_{X_{cc}}$ e $\Delta_{Z_{cc}}$), conforme *Detalhe A* da Figura 3.2 (região hachurada), representado na Figura 3.6:

Figura 3.6: Representação geométrica do triângulo EFG para o cálculo do desvio de trajetória de ferramenta (Δ_{cc})



Fonte: elaborado pelo autor

tem-se a representação dos catetos conforme Equações 3.13 e 3.14:

$$\Delta_{X_{cc}} = R_g - X_{cc} \quad (3.13)$$

$$\Delta_{Z_{cc}} = R_{g'} - Z_{cc} \quad (3.14)$$

Por fim, o desvio de trajetória de ferramenta (Δ_{cc}) entre os pontos CC e CC' , representado pela hipotenusa do triângulo EFG (Figura 3.6), pode ser calculado pela Equação 3.15:

$$\Delta_{cc} = \sqrt{(\Delta_{X_{cc}})^2 + (\Delta_{Z_{cc}})^2} \quad (3.15)$$

3.1.2 Desvio Cordal de Trajetória de Ferramenta (Δ_{co})

Assim como para o desvio CC de trajetória de ferramenta, outro critério utilizado nesta dissertação para determinar a precisão das trajetórias de ferramenta foi cálculo do desvio de corda ou desvio cordal (Δ_{co}). Este desvio representa o afastamento da tangência da ferramenta com relação à superfície da peça em decorrência da interpolação linear utilizada pelo software CAM para geração das trajetórias de ferramenta.

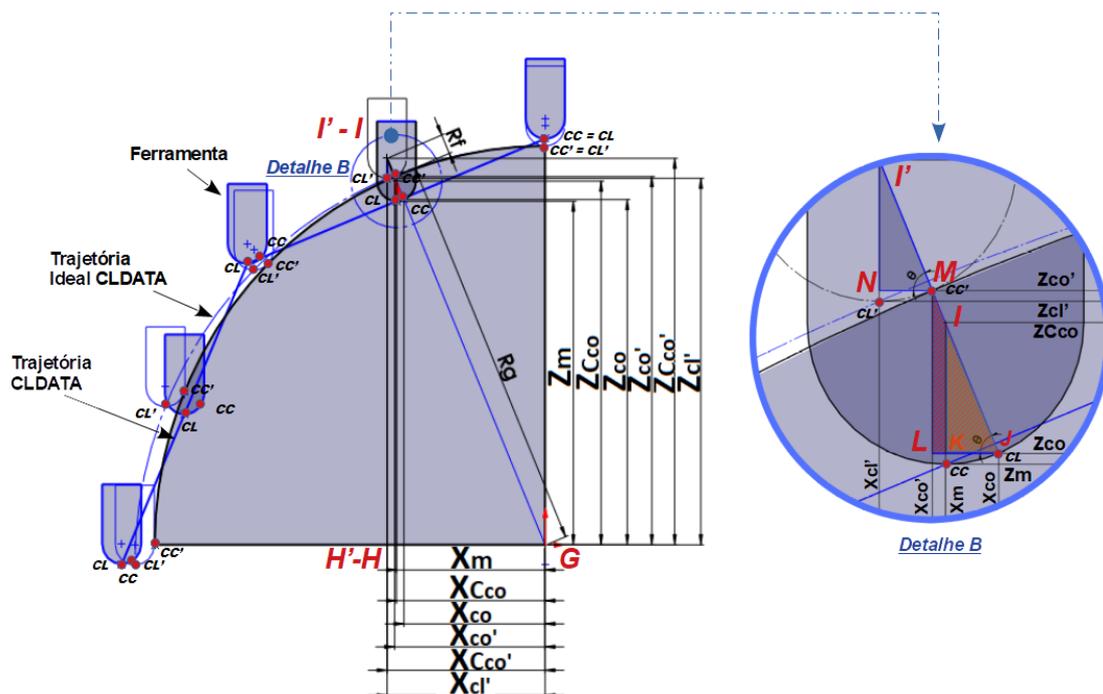
Portanto, o desvio cordal de trajetória de ferramenta pode ser encontrado, como já mostrado na Equação 3.3, calculando-se a distância entre a posição local ao longo da

trajetória de ferramenta e a posição ideal local, que, por sua vez, seria a posição local da ferramenta que resultaria na tangência entre a ferramenta e a superfície da peça. Este cálculo é dado pela flecha formada entre estas posições e o arco correspondente formado pela superfície da peça.

A Figura 3.7 traz uma representação gráfica para o cálculo do desvio cordal de trajetória de ferramenta. Este cálculo, em cada ponto CC, foi realizado conforme os passos descritos a seguir:

- ⇒ cálculo do ponto médio local ($X_m; Z_m$) a partir das coordenadas X_{cl} e Z_{cl} do programa CN;
- ⇒ cálculo da posição local média do centro da ponta esférica da ferramenta (Z_{Cco}), a partir da coordenada Z_{co} e do raio da ferramenta (R_f) e, para a condição ideal local ($Z_{Cco'}$), condição de tangência, a partir do raio da geometria (R_g) e diâmetro da ferramenta (R_f);
- ⇒ cálculo da direção normal local da superfície, definida pelo ângulo de direção normal θ , medido no plano XZ (ver figura 3.7);
- ⇒ cálculo do ponto local ($X_{co}; Z_{co}$) e ideal local ($X_{co'}; Z_{co'}$);
- ⇒ cálculo do desvio de corda Δ_{co} .

Figura 3.7: Representação para o cálculo do desvio cordal de trajetória de ferramenta



Fonte: elaborado pelo autor

Conforme ilustra a Figura 3.7, a posição local média da ferramenta na trajetória CLDATA ($X_m; Z_m$) para a condição local, ou seja, posição que resultará na flecha formada pelo segmento de reta que une o ponto médio da corda descrita pela trajetória CLDATA, ao ponto médio do arco correspondente (superfície da geometria), pode ser definida pelas Equações 3.16 e 3.17.

$$X_m = \frac{X_{cl_{i+1}} + X_{cl_i}}{2} \quad (3.16)$$

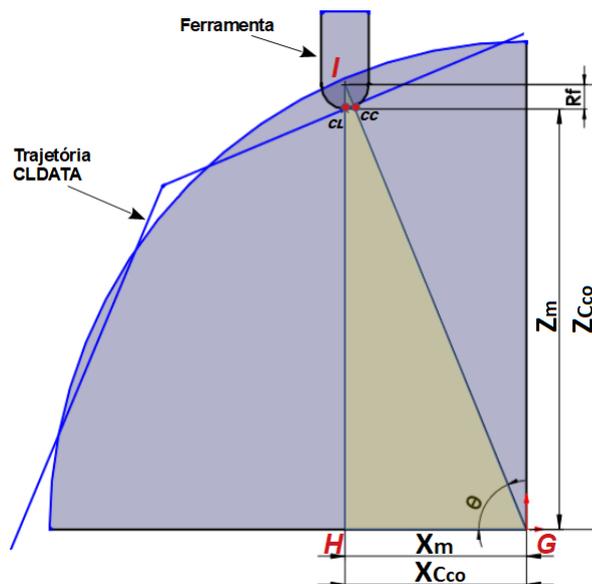
$$Z_m = \frac{Z_{cl_{i+1}} + Z_{cl_i}}{2} \quad (3.17)$$

A partir da posição Z_m calculada e com o raio da ponta esférica da ferramenta (R_f) conhecido, foi possível encontrar a coordenada Z local do centro do topo esférico da ferramenta (Z_{Cco}), conforme Equação 3.18:

$$Z_{Cco} = Z_m + R_f \quad (3.18)$$

Com a determinação da posição local do centro do topo da ferramenta, assumindo que a posição em X permanece a mesma ($X_{Cco}=X_m$), da relação trigonométrica observada a partir do triângulo GHI da Figura 3.7, melhor ilustrado na Figura 3.8:

Figura 3.8: Representação geométrica do triângulo GHI para determinação do ângulo de direção normal θ



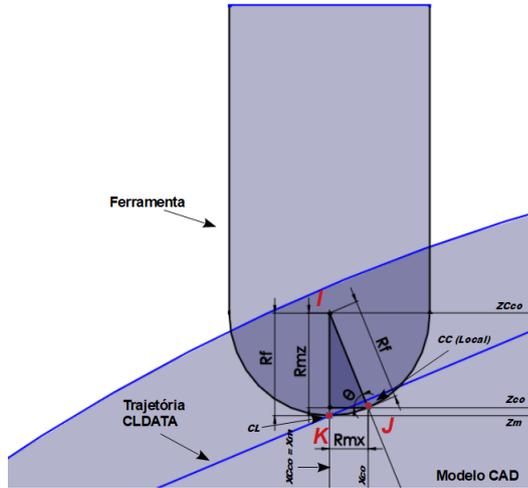
Fonte: elaborado pelo autor

é possível calcular o ângulo de direção normal θ do ponto CC em análise, conforme Equação 3.19:

$$\operatorname{tg}(\theta) = \frac{Z_{Cco}}{X_{Cco}} = \frac{Z_m + R_f}{X_m} \rightarrow \theta = \operatorname{arctg}\left(\frac{Z_m + R_f}{X_m}\right) \quad (3.19)$$

Em seguida, o θ foi utilizado para calcular o ponto de contato local ($X_{co}; Z_{co}$), determinado considerando a relação trigonométrica do triângulo JKI ilustrado no *Detalhe B* da Figura 3.7 e reproduzido na Figura 3.9.

Figura 3.9: Representação geométrica do triângulo JKI para a determinação de X_{co} e Z_{co}



Fonte: elaborado pelo autor

A partir da análise da relação trigonométrica do triângulo JKI da Figura 3.9, para um ângulo θ e raio da ponta esférica da ferramenta (R_f) conhecido, foi necessário identificar as componentes nas direções perpendiculares X e Z do raio da ferramenta, aqui denominados de Rm_x e Rm_z , para determinação do ponto de contato local CC, dado pela posição local $X_{co}; Z_{co}$, conforme Equações 3.20 e 3.21.

$$\cos(\theta) = \frac{Rm_x}{R_f} \rightarrow Rm_x = R_f \cdot \cos(\theta) \quad (3.20)$$

$$\operatorname{sen}(\theta) = \frac{Rm_z}{R_f} \rightarrow Rm_z = R_f \cdot \operatorname{sen}(\theta) \quad (3.21)$$

Desta forma, pela Figura 3.9, temos:

$$X_{co} = X_{Cco} - Rm_x \quad (3.22)$$

$$Z_{co} = Z_{Cco} - Rm_z \quad (3.23)$$

Substituindo, respectivamente, as Equações 3.20 e 3.21 em 3.22 e 3.23:

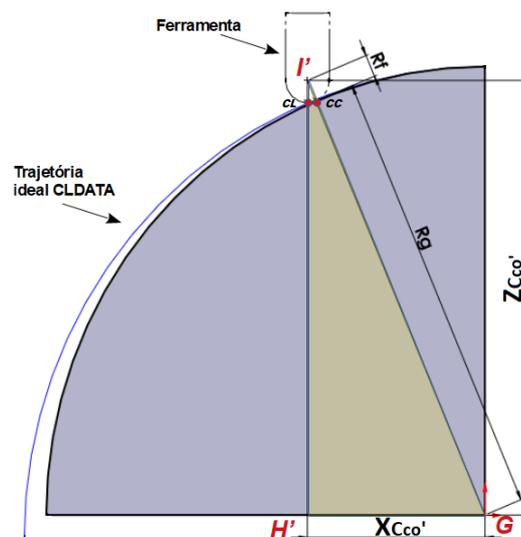
$$X_{co} = X_{Cco} - R_f \cdot \cos(\theta) \quad (3.24)$$

$$Z_{co} = Z_{Cco} - R_f \cdot \sen(\theta) \quad (3.25)$$

Assim, o ponto local $(X_{co}; Z_{co})$ para cada ponto CL da trajetória da ferramenta que resulta em um ponto de contato da ferramenta (CC) com a superfície da peça, onde, X_{co} , Z_{co} , R_f e θ são conhecidos, foi encontrado.

Para a posição de tangência da ferramenta com a superfície da peça, que resulta em um ponto ideal local $(X_{co'}; Z_{co'})$, foi necessário calcular a posição do centro da ferramenta sobre a superfície da peça ($Z_{Cco'}$) conforme relações ilustradas na Figura 3.7, melhor apresentadas na Figura 3.10.

Figura 3.10: Representação geométrica do triângulo $GH'T'$ para a determinação de $Z_{Cco'}$



Fonte: elaborado pelo autor

Pela análise da Figura 3.10 é possível concluir que o ponto $Z_{Cco'}$ da ferramenta na condição

de tangência é dada pela Equação 3.26.

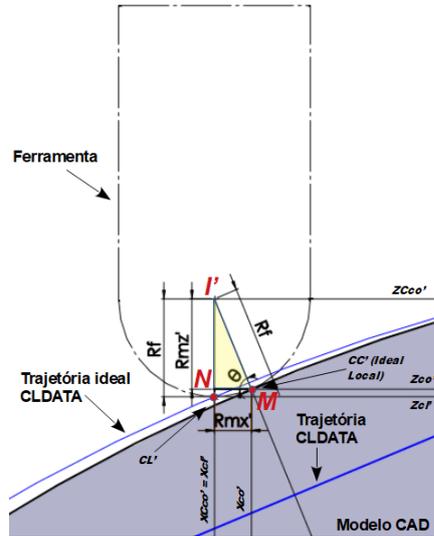
$$Z_{Cco'} = R_g + R_f \tag{3.26}$$

Logo, considerando que a posição $X_{Cco'} = X_{cl'}$, temos que:

$$\cos(\theta) = \frac{X_{Cco'}}{R_g + R_f} \rightarrow X_{Cco'} = \cos(\theta) \cdot (R_g + R_f) \tag{3.27}$$

Desta forma, para a determinação do ponto ideal local de contato CC' , dado pela posição ideal local $X_{co'}; Z_{co'}$ é necessário identificar as componentes nas direções perpendiculares X e Z ($Rm_{x'}$ e $Rm_{z'}$) do raio da ferramenta (R_f), dados por relação trigonométrica e expressos pelas Equações 3.28 e 3.29, conforme triângulo MNI' , representado no *Detalhe B* da Figura 3.7 e ilustrado na Figura 3.11.

Figura 3.11: Representação geométrica do triângulo MNI' para a determinação da posição ideal local $X_{co'}$ e $Z_{co'}$



Fonte: elaborado pelo autor

$$\cos(\theta) = \frac{Rm_{x'}}{R_f} \rightarrow Rm_{x'} = R_f \cdot \cos(\theta) \tag{3.28}$$

$$\text{sen}(\theta) = \frac{Rm_{z'}}{R_f} \rightarrow Rm_{z'} = R_f \cdot \text{sen}(\theta) \tag{3.29}$$

Portanto, a análise da Figura 3.11 permite inferir que, a posição ideal local ($X_{co'}; Z_{co'}$), ou

seja, posição que resultaria em pontos de tangência com a superfície da peça, é expressa pelas Equações 3.30 e 3.31.

$$X_{co'} = X_{Cco'} - Rm_{x'} \tag{3.30}$$

$$Z_{co'} = Z_{Cco'} - Rm_{z'} \tag{3.31}$$

Substituindo, respectivamente, as Equações 3.28 e 3.29 em 3.30 e 3.31, temos:

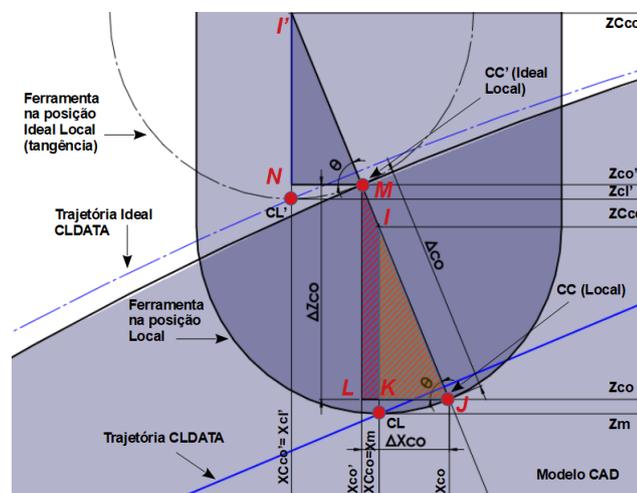
$$X_{co'} = X_{Cco'} - R_f \cdot \cos(\theta) \tag{3.32}$$

$$Z_{co'} = Z_{Cco'} - R_f \cdot \sen(\theta) \tag{3.33}$$

Deste modo, foi possível encontrar o ponto ideal local da ferramenta ($X_{co'}; Z_{co'}$) para cada ponto CL' que resulta em um ponto ideal local de contato (CC') da ferramenta com a superfície da peça, onde, $X_{Cco'}$, $Z_{Cco'}$, R_f e θ , são conhecidos.

Logo, atendendo a relação trigonométrica do triângulo JLM , formado pela variação das posições, local e ideal local, das coordenadas X e Z (Δ_{Xco} e Δ_{Zco}), conforme *Detalhe B* da Figura 3.7 (região hachurada), apresentado na Figura 3.12:

Figura 3.12: Representação do triângulo JLM para o cálculo do desvio cordal de trajetória de ferramenta (Δ_{co})



Fonte: elaborado pelo autor

tem-se a representação dos catetos conforme Equações 3.34 e 3.35:

$$\Delta_{X_{co}} = X_{co'} - X_{co} \quad (3.34)$$

$$\Delta_{Z_{co}} = Z_{co'} - Z_{co} \quad (3.35)$$

Por fim, o desvio cordal de trajetória de ferramenta (Δ_{co}) entre os pontos CC e CC', representado pela flecha que une o ponto médio da corda formada pela trajetória CLDATA e o ponto médio do arco formado pela superfície da geometria, isto é, dado pela hipotenusa do triângulo JLM (Figura 3.12), pode ser calculado pela Equação 3.36:

$$\Delta_{co} = \sqrt{(\Delta_{X_{co}})^2 + (\Delta_{Z_{co}})^2} \quad (3.36)$$

Do cálculo dos desvios de trajetória de ferramenta descritos nas Subseções 3.1.1 e 3.1.2 foi determinado o Desvio Médio Geral ($\bar{\Delta}$), utilizado para análise estatística dos dados. Este desvio foi, portanto, dado pela média dos desvios médios CC ($\bar{\Delta}_{cc}$) e de corda ($\bar{\Delta}_{co}$), para cada condição de posição da ferramenta, conforme descrito nas Equações 3.37 e 3.38.

$$\bar{\Delta}_{cc} = \frac{\Delta_{cc_1} + \Delta_{cc_2} + \dots + \Delta_{cc_n}}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_{cc_i} \quad (3.37)$$

$$\bar{\Delta}_{co} = \frac{\Delta_{co_1} + \Delta_{co_2} + \dots + \Delta_{co_n}}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_{co_i} \quad (3.38)$$

Logo, o Desvio Médio Geral calculado ($\bar{\Delta}$) é dado pela média dos desvios médios CC e cordal, conforme apresenta a Equação 3.39.

$$\bar{\Delta} = \frac{\bar{\Delta}_{cc} + \bar{\Delta}_{co}}{2} \quad (3.39)$$

3.2 Método para Análise da Precisão das Trajetórias de Ferramenta

Para cada trajetória de ferramenta gerada nos experimentos descritos a seguir, foi criado um programa CN. Destes, foi selecionado um trecho de um passe ascendente, considerado do primeiro ao último ponto em que havia contato (tangência), ou seja, desconsiderando movimentos de engajamento e saída, cada ponto do trecho foi usado para calcular um desvio de trajetória do ponto. Portanto, para cada trajetória foi identificado um desvio de trajetória máximo ($\Delta_{máx}$) e um desvio de trajetória médio geral ($\bar{\Delta}$).

Para a análise dos dados utilizou-se o software estatístico *Minitab*, versão 18, e a ferramenta estatística *DoE* (*Design of Experiments* - Projeto de Experimentos), de modo a determinar qual ou quais fatores possuem influência nos desvios de trajetória da ferramenta gerada pelo software CAM estudado.

A significância dos fatores foi analisada a partir dos gráficos fatoriais, que incluem o gráfico de efeitos principais e o gráfico de interações gerados pelo software *Minitab 18*, descrevendo a variação da média dos desvios em função dos níveis destes fatores. Desta forma, foi possível identificar a existência de interação ou independência entre os fatores.

Ademais, também foi avaliada a significância dos resultados através dos gráficos de Pareto gerados pelo software *Minitab 18* visando mostrar os valores absolutos dos efeitos padronizados, desde o maior até o menor efeito, permitindo a visualização das causas mais importantes para priorização dos problemas. Todos os testes foram realizados adotando um nível de confiança de 95% para todos os intervalos, o que corresponde a um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$).

3.3 Tolerância CAM e Fatores Geométricos Sobre a Precisão da Trajetória de Ferramenta

Os estudos desta etapa da pesquisa estão pautados na análise de variáveis de influência nos desvios de trajetórias de ferramenta geradas por softwares CAM em processos de usinagem em macroescala e microescala, em particular, para o microfresamento. Nesse sentido, com a finalidade de avaliar tal aspecto, optou-se por criar modelos geométricos e utilizar ferramentas com valores representativos para estas escalas.

A determinação do modelo geométrico adotado nesse trabalho advém da necessidade de representar toda a alteração de contato entre uma ferramenta de ponta esférica, comumente utilizada nas etapas de acabamento em superfícies complexas, em uma superfície cilíndrica.

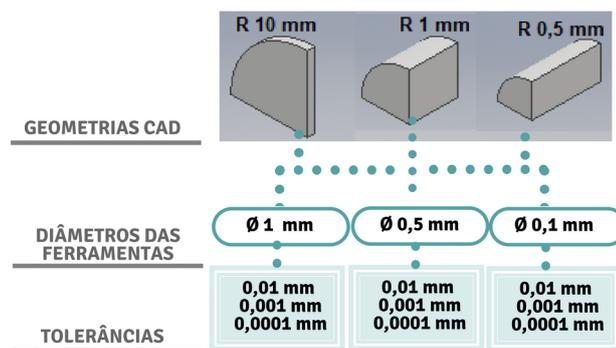
Para tanto, foi empregado um software CAD para criação do modelo geométrico, servindo como base para o cálculo das trajetórias da ferramenta geradas pelos sistemas CAM.

O software CAD-CAM integrado, comercialmente disponível como *Inventor HSM Ultimate*, versão 2017, do fabricante *Autodesk*, foi utilizado nesta etapa da pesquisa, além de ser utilizado como software base para os demais experimentos. A decisão no processo de escolha do software mais adequado às necessidades do estudo, levou em consideração fatores descritos na Secção 2.9, principalmente, no que se refere à disponibilidade. O fabricante *Autodesk* disponibiliza licença gratuita do software *Inventor HSM Ultimate* para estudantes e instituições de ensino.

De forma a eliminar possíveis erros de tradução de dados geométricos do modelo CAD durante a importação para o CAM, foi utilizado o módulo integrado CAD do próprio software para criação de geometrias equivalentes. Tal procedimento se torna importante ao ponto em que elimina a necessidade de múltiplas conversões de dados, fundamental para manter a precisão do modelo, principalmente em microescala, onde acredita-se que a precisão e a qualidade da geometria CAD são críticas. Desta forma, a transferência do modelo geométrico CAD para o CAM pôde acontecer de maneira direta, também conhecida como transferência por formato nativo. Nesse tipo de transferência é possível alternar entre os módulos CAD-CAM e, através do recurso de associatividade, realizar alterações no modelo tridimensional gerado no sistema CAD, simultaneamente reconhecidas e atualizadas no sistema CAM.

No software CAD, foram modeladas três geometrias representativas de 1/4 (um quarto) de um cilindro, com raios de 10 mm, 1 mm e 0,5 mm. Em seguida, após a importação para o CAM integrado, para cada geometria, foram geradas trajetórias de ferramenta para fresas de topo esférico de 1 mm, 0,5 mm e 0,1 mm de diâmetro e tolerâncias de trajetórias de 0,01 mm, 0,001 mm e 0,0001 mm. Assim, todas as combinações possíveis entre as variáveis foram investigadas de forma a avaliar as interações entre estas, conforme demonstrado no esquema da Figura 3.13:

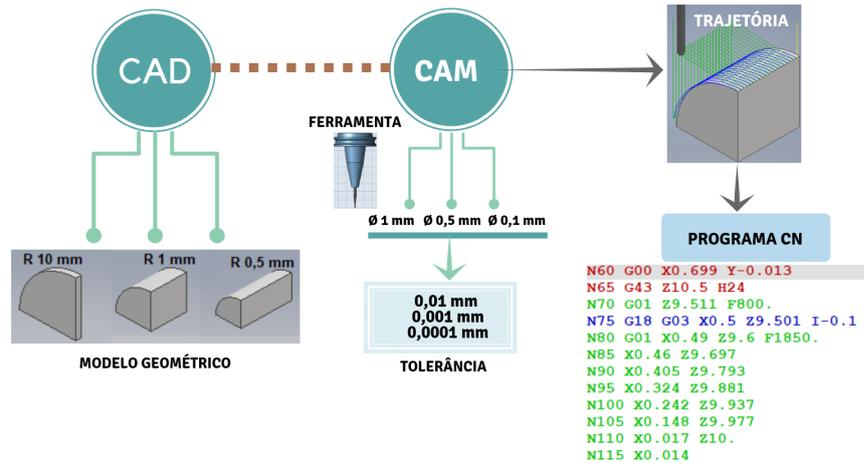
Figura 3.13: Representação dos fatores e níveis de controle utilizados



Fonte: elaborado pelo autor

Para cada combinação de geometria e diâmetro da ferramenta, foram geradas 3 trajetórias com tolerâncias diferentes, deste modo, criadas 9 trajetórias de ferramenta CAM para cada modelo CAD, perfazendo um total de 27 trajetórias CAM diferentes. Após a geração das trajetórias de usinagem, foram gerados os programas CN (ou código G), para análise e avaliação dos resultados, conforme pode ser observado no diagrama esquemático da Figura 3.14.

Figura 3.14: Diagrama esquemático do experimento



Fonte: elaborado pelo autor

O módulo CAM integrado ao *Inventor HSM Ultimate* foi configurado para gerar pontos de coordenada dos programas CN com valores de resolução de até 4 casas decimais, desta forma, comparadas às resoluções comumente utilizadas em aplicações de microfresamento.

Para determinar a precisão das trajetórias de ferramenta, foram calculados os desvios das trajetórias com relação a um modelo analítico de referência. Estes desvios foram, portanto, as respostas do experimento utilizadas na análise estatística. Os resultados obtidos foram avaliados estatisticamente a nível de significância dos fatores: raio da geometria, diâmetro da ferramenta e tolerância de trajetória da ferramenta para o software CAM utilizado.

A influência dos fatores geométricos de peça e ferramenta sobre a precisão das trajetórias de ferramenta foi analisada estatisticamente e o experimento foi delineado como fatorial completo, com 3 fatores de controle e 3 níveis. A Figura 3.15 apresenta de maneira esquemática os fatores, seus respectivos níveis de controle aplicados e as respostas objeto da pesquisa.

Figura 3.15: Fatores de controle, níveis e respostas da pesquisa para análise dos fatores geométricos de peça, ferramenta e tolerância CAM

Fatores de controle	Níveis	Respostas
Raio da geometria (RG)	0,5 mm; 1 mm; 10 mm	Desvios das trajetórias da ferramenta
Diâmetro da ferramenta (DF)	0,1 mm; 0,5 mm; 1 mm	
Tolerância (TOL)	0,01 mm; 0,001 mm; 0,0001 mm	

Fonte: elaborado pelo autor

3.4 Resolução de Programas CN e Tolerância de Trajetória CAM

A influência da variação da resolução de programas CN gerados e da tolerância CAM sobre a precisão de trajetórias de ferramenta foi analisada. O software utilizado na análise, *Inventor HSM*, foi configurado com resolução do programa CN de 4, 5, 6, 7 e 8 casas decimais, utilizando-se de tolerâncias mais rigorosas do que as utilizadas na etapa anterior (4 casas decimais), sendo definidos os valores de 0,01 mm, 0,001 mm, 0,0001 mm, 0,00001 (0,01 μm), 0,000001 (0,001 μm) e 0,0000001 (0,0001 μm). A Figura 3.16 ilustra os fatores e níveis de controle utilizados para obtenção da resposta deste experimento.

Figura 3.16: Fatores de controle, níveis e respostas da pesquisa para análise da resolução e tolerância CAM

Fatores de controle	Níveis	Respostas
Resolução (RES)	4; 5; 6; 7; 8 casas decimais	Desvios das trajetórias da ferramenta
Tolerância (TOL)	0,01 mm; 0,001 mm; 0,0001 mm; 0,00001 (0,01 μm); 0,000001 (0,001 μm); 0,0000001 (0,0001 μm)	

Fonte: elaborado pelo autor

De maneira a avaliar tais aspectos, optou-se por utilizar a condição mais crítica dentre as combinações de geometrias e diâmetros de ferramenta estudadas: o menor raio de geometria, ou seja, 0,5 mm, e o menor diâmetro de ferramenta, 0,1 mm. Os dados obtidos foram avaliados pelo software *Minitab 18* para o experimento delimitado como fatorial completo geral em 5 e 6 níveis, utilizando a ferramenta estatística *DoE*. Foram realizadas análises utilizando o gráfico de Pareto e de efeitos principais.

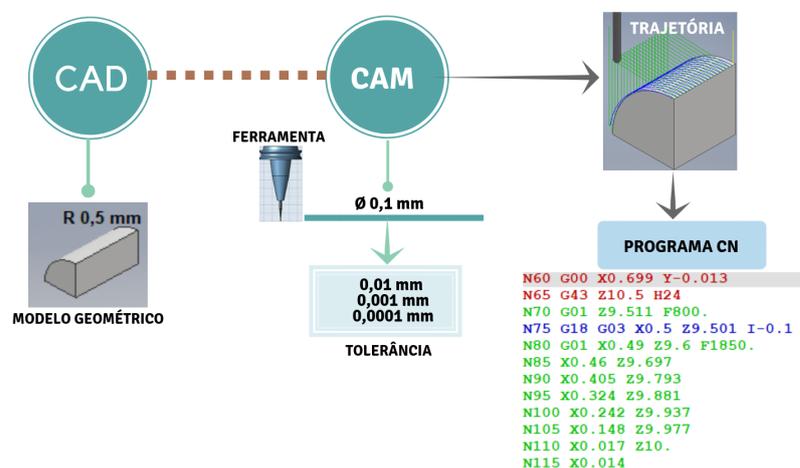
3.5 Cálculo dos Desvios de Trajetória em Softwares CAM Distintos

Para a realização deste experimento, foram utilizados quatro sistemas CAM de diferentes fabricantes, comumente utilizados na indústria. Os softwares CAM analisados foram:

1. *Cimatron E14*, fabricante *3D Systems* - versão de avaliação por um período de 30 dias;
2. *Inventor HSM Ultimate 2017*, módulo adicionado ao *Autodesk Inventor Professional 2017*, fabricante *Autodesk* - versão gratuita para estudantes e instituições de ensino por um período de 3 anos;
3. *NX CAM Express 12.0.2*, fabricante *Siemens PLM* - versão de avaliação por um período de 30 dias;
4. *CATIA V5-6R2018*, fabricante *Dassault Systemes* - versão de gratuita para estudantes por 1 ano.

Com a finalidade de verificar se estes softwares CAM geram trajetórias de ferramenta precisas e respeitando os valores da banda de tolerância estabelecida, para cada software CAM foram geradas 3 trajetórias de usinagem, considerando um modelo CAD de 1/4 de cilindro com raio de geometria de curvatura convexa de 0,5 mm, ferramenta de ponta esférica, com 0,1 mm de diâmetro e tolerâncias CAM de 0,01 mm, 0,001 mm e 0,0001 mm. Para cada trajetória de ferramenta foram gerados programas CN com resolução de 4 casas decimais que posteriormente foram utilizados para o cálculo dos desvios de trajetória de ferramenta. O desenho esquemático do experimento pode ser visualizado na Figura 3.17.

Figura 3.17: Diagrama esquemático do experimento



Fonte: elaborado pelo autor

O experimento foi avaliado mediante a utilização da ferramenta estatística *DoE*, utilizando o software *Minitab 18*, além do software *Microsoft Excel 2017* para criação do gráfico de barras. Os dados foram analisados a partir de um experimento fatorial completo geral com 2 fatores em 3 e 4 níveis, conforme ilustra a Figura 3.18.

Figura 3.18: Fatores de controle, níveis e respostas para análise de desvios dos softwares CAM



Fonte: elaborado pelo autor

3.6 Procedimento de Importação e Exportação de Arquivos em Formatos Padronizados

Visando avaliar os impactos de se gerarem trajetórias de ferramenta em modelos CAD importados a partir de arquivos de formatos padronizados, também conhecidos como de extensão neutra, criados para possibilitar a troca de dados entre sistemas CAD-CAM, foram realizados processos de importação e exportação em softwares de fabricantes diferentes. Os softwares utilizados para esta análise foram o *Inventor HSM*, *NX*, *Cimatron*, descritos na Seção 3.5 deste Capítulo, além do software *Solidworks*, versão 17, do fabricante *Dassault Systèmes*. Os formatos padronizados escolhidos para esta análise foram o IGES e STEP.

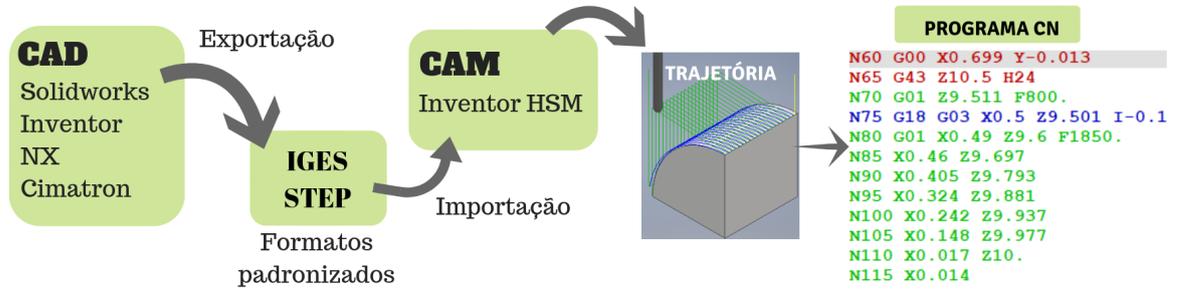
O software *Inventor HSM* foi escolhido para realizar o processamento dos arquivos IGES e STEP motivado pelo fato de ser um software disponível para estudantes e instituições de ensino, possuir curta curva de aprendizado, além de possibilitar acesso à diversos recursos e configurações.

Foi utilizada a geometria representativa de 1/4 de cilindro, com raio de curvatura convexa de 0,5 mm, mesma geometria utilizada nos experimentos da Seção 3.4. Em cada software CAD foi modelada uma geometria representativa com as dimensões já descritas, em seguida, exportados para os formatos padronizados IGES e STEP.

Após exportação, os modelos foram importados para o software *Inventor HSM*, onde foram geradas trajetórias de ferramenta, com ferramenta de 0,1 mm de diâmetro e tolerâncias de 0,01 mm, 0,001 mm e 0,0001 mm, perfazendo um total de 15 trajetórias de ferramenta geradas para cada formato padronizado.

Os programas CN gerados foram configurados com resolução de 4 casas decimais e, por fim, o cálculo e análise dos desvios de trajetória foram realizados. A Figura 3.19 apresenta um esquema com o procedimento utilizado para este experimento.

Figura 3.19: Esquema utilizado para cálculos dos desvios a partir de formatos padronizados



Fonte: elaborado pelo autor

Resultados e Discussões

Neste capítulo, os resultados obtidos no cálculo dos desvios de trajetórias de ferramenta são apresentados e analisados sob o ponto de vista estatístico. Foi avaliada a influência dos fatores geométricos de peça, ferramenta, tolerância CAM e resolução de programas CN, sobre a precisão das trajetórias de ferramenta geradas em diferentes softwares CAM comercialmente disponíveis. A análise da influência da conversão dos dados através de formatos padronizados nos desvios de trajetórias também foi analisada sob o ponto de vista estatístico. Todos os dados estatísticos destas análises estão disponíveis no Apêndice C.

4.1 Análise da Variação dos Fatores nos Desvios de Trajetória da Ferramenta

A influência dos fatores geométricos de peça, ferramenta e tolerância CAM sobre a precisão das trajetórias de ferramenta foi analisada estatisticamente. O procedimento experimental adotado nesta análise está descrito na Seção 3.3 do Capítulo 3.

A significância dos fatores foi avaliada mediante o gráfico de Pareto, gráfico de efeitos principais e de interações. As avaliações gráficas estabelecidas pela análise dos fatores em torno das médias, caracterizam a influência de cada fator isoladamente, ou combinado, nos desvios médios ($\bar{\Delta}$) e máximos (Δ_{max}) das trajetórias de ferramenta calculados a partir dos programas CN gerados pelo software CAM avaliado.

4.1.1 Análise de Significância dos Fatores

A Figura 4.1 apresenta o gráfico de Pareto dos efeitos para os fatores: raio da geometria (A), diâmetro da ferramenta (B) e tolerância de trajetória (C), individuais e combinados, sobre o desvio de trajetória médio para o programa CN.

Figura 4.1: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para os fatores analisados sobre os desvios médios de trajetória obtidos a partir do programa CN



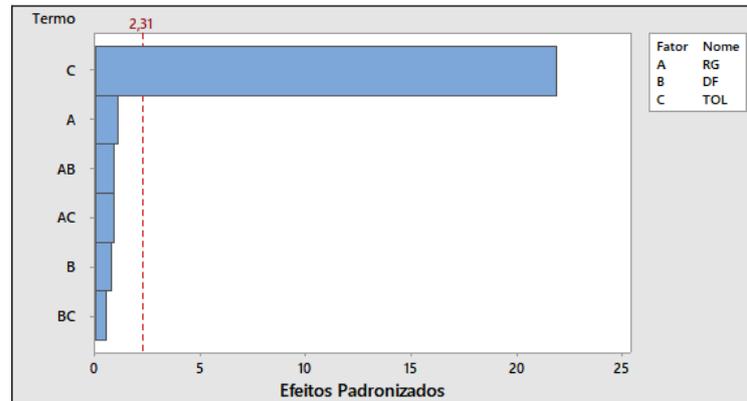
Fonte: dados da pesquisa

As barras que cruzam a linha de referência (em 2,31), são consideradas estatisticamente significativas. Nesse caso, observa-se que os fatores avaliados não apresentam influência significativa no desvio médio das trajetórias (com 95% de confiança), com exceção da tolerância (C).

Isto significa que não há relevância estatística nos desvios em decorrência da variação do raio da geometria (A), diâmetro da ferramenta (B) e na interação entre eles. Em outras palavras, a redução das proporções da geometria da peça (R_g) e do diâmetro da ferramenta (D_f) não levaram a uma menor precisão (maior desvio) das trajetórias de ferramenta.

A análise do gráfico de Pareto para os maiores desvios de trajetória de ferramenta encontrados (Figura 4.2), também remete à conclusão de que, em termos de geometria da peça e diâmetro de ferramenta, não há influência destes fatores, isolados ou combinados, na precisão de trajetória de ferramenta. Entretanto, assim como na avaliação da Figura 4.1, a tolerância é considerada estatisticamente relevante ao ponto em que se torna um fator influente nos desvios de trajetória de ferramenta. Desta forma, é possível inferir que os pontos máximos de desvios de trajetória de ferramenta calculados sofreram influência significativa do fator tolerância.

Figura 4.2: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para os fatores analisados sobre os desvios máximos de trajetória obtidos a partir do programa CN



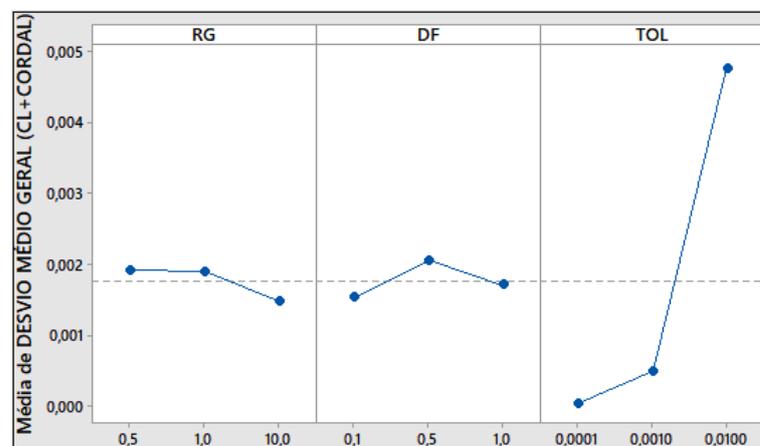
Fonte: dados da pesquisa

4.1.2 Análise dos Efeitos Principais

Como o gráfico de Pareto exhibe o valor absoluto dos efeitos, é possível determinar quais fatores, ou combinação destes, possui maior influência no desvio das trajetórias, no entanto, não é possível determinar de modo específico quais efeitos possuem influência no aumento ou redução destes desvios. Assim sendo, para apoiar adequadamente as considerações aqui descritas, os gráficos de efeitos principais e de interações foram investigados.

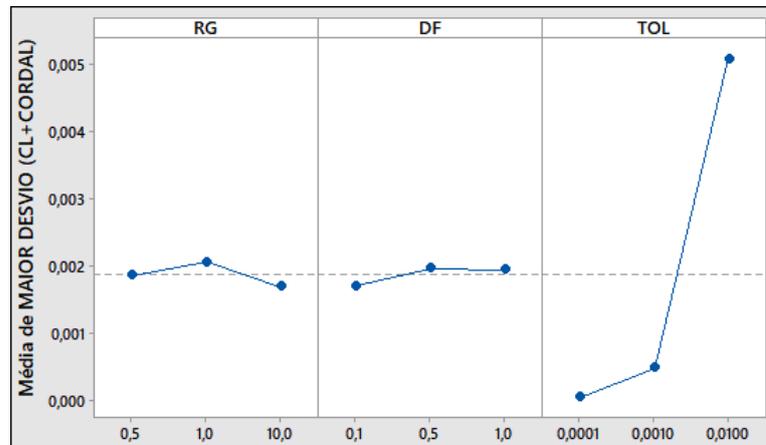
As avaliações gráficas estabelecidas pela análise dos efeitos principais em torno das médias, caracterizando a influência de cada fator isoladamente nos desvios médios e máximos para os programas CN, podem ser visualizadas nas Figuras 4.3 e 4.4.

Figura 4.3: Gráfico de efeitos principais para os desvios médios obtidos a partir do programa CN



Fonte: dados da pesquisa

Figura 4.4: Gráfico de efeitos principais para os desvios máximos obtidos a partir do programa CN



Fonte: dados da pesquisa

Assim como analisado nos gráficos de Pareto, os gráficos de efeitos principais apresentados mostram que a tolerância apresentou maior variação em torno da média e distanciamento entre os níveis e, portanto, exerce maior influência nos desvios médios e máximos das trajetórias, quando comparada com os outros fatores, raio da geometria e diâmetro da ferramenta.

Considerando os efeitos individuais dos níveis do fator tolerância, pode-se observar que os maiores desvios de trajetória foram encontrados para a tolerância de 0,01 mm. Não foram encontradas diferenças estatisticamente significativas nos desvios para os níveis de tolerância 0,001 mm e 0,0001 mm, desta forma, os desvios de trajetórias para esses níveis de tolerância afetam a resposta do mesmo modo.

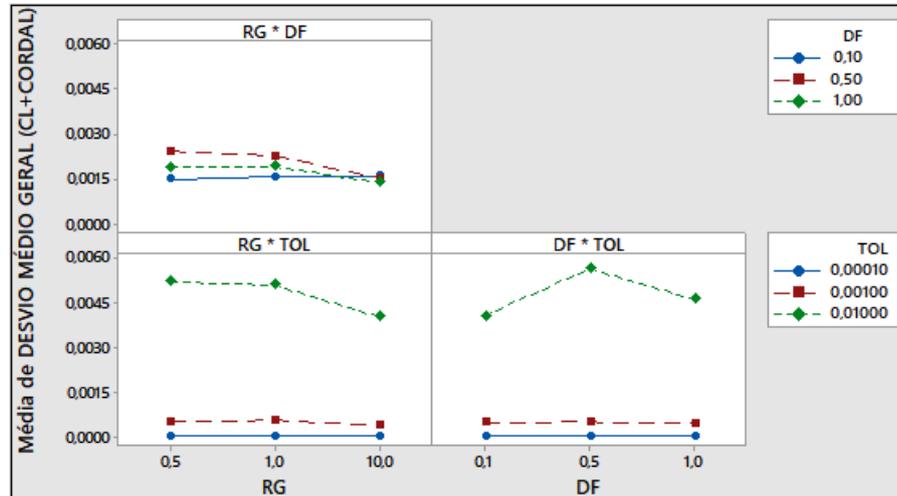
Para os fatores raio da geometria (RG) e diâmetro da ferramenta (DF), não foi evidenciada significância, pois, as distâncias entre os pontos relacionados aos desvios médios para os diversos níveis são considerados irrelevantes estatisticamente.

4.1.3 Análise de Interações Entre os Fatores

A análise de interação entre os fatores corresponde ao comportamento de um fator nos diferentes níveis de outro fator, com respeito a característica de interesse que é o desvio de trajetória de ferramenta. Desta forma, como não houve interações significativas entre os fatores, raio da geometria e diâmetro da ferramenta, o gráfico de efeitos principais é suficiente para analisar adequadamente as relações destes fatores com os desvios de trajetória. Entretanto, a análise de interação destes fatores com a tolerância torna-se relevante.

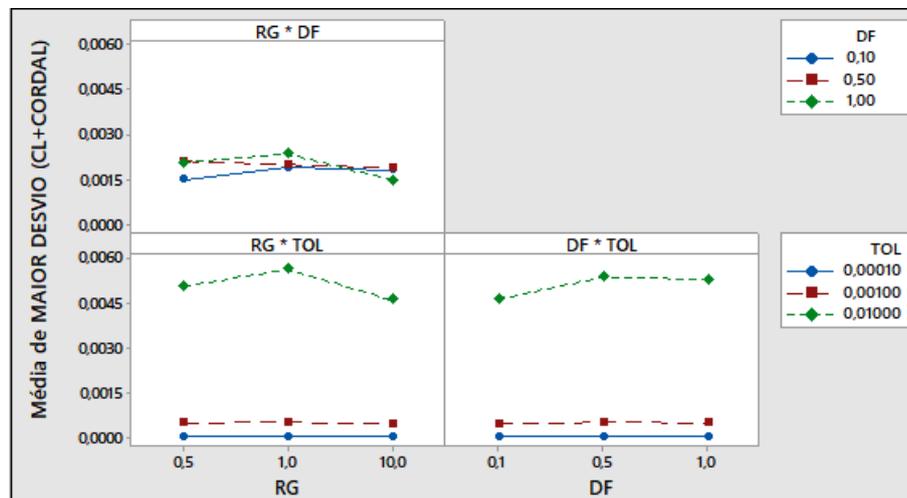
As Figuras 4.5 e 4.6 representam os gráficos de interações para os desvios médios e máximos calculados a partir dos programas CN gerados para o software CAM avaliado.

Figura 4.5: Gráfico de interação para os desvios médios obtidos a partir do programa CN



Fonte: dados da pesquisa

Figura 4.6: Gráfico de interação para os desvios máximos obtidos a partir do programa CN



Fonte: dados da pesquisa

Assim como as análises descritas nas Seções 4.1.1 e 4.1.2, a análise gráfica dos desvios médios e máximos obtidos a partir do programa CN permite avaliar que não são evidenciadas interações significativas para a relação entre os fatores, raio da geometria e diâmetro da ferramenta (RG*DF), indicando irrelevância estatística. Entretanto, evidenciam-se interações para a geometria com maior dimensão, ou seja, a que possui raio de curvatura convexa de 10 mm. Neste caso, apesar das linhas não serem paralelas entre si e se cruzarem em alguns momentos, mostrando interação entre os níveis e fatores, a faixa de variação destes desvios e interações é extremamente pequena.

Contudo, como já constatado nos gráficos de Pareto (Figuras 4.1 e 4.2) e de efeitos principais (Figuras 4.3 e 4.4), o fator tolerância possui considerável relevância em interação com estes fatores.

A avaliação das Figuras 4.5 e 4.6 permite inferir que para as relações entre tolerância e raio de geometria ($RG * TOL$) e diâmetro da ferramenta e tolerância ($DF * TOL$), tanto para a análise dos desvios médios quanto para a dos desvios máximos, não existem diferenças estatísticas significantes para as tolerâncias de 0,001 mm e 0,0001 mm em todos os fatores, evidenciado nos gráficos pelas linhas paralelas entre si, ou seja, não existem interações significativas entre estas tolerâncias e os fatores, raio da geometria, diâmetro da ferramenta. Percebe-se, entretanto, que os maiores desvios de trajetória estão relacionados com a tolerância de 0,01 mm, mostrando maior magnitude de interação entre os fatores. Neste caso, os maiores desvios de trajetória de ferramenta foram observados para a geometria com raio de 1 mm e ferramenta com 0,5 mm de diâmetro (Figura 4.6).

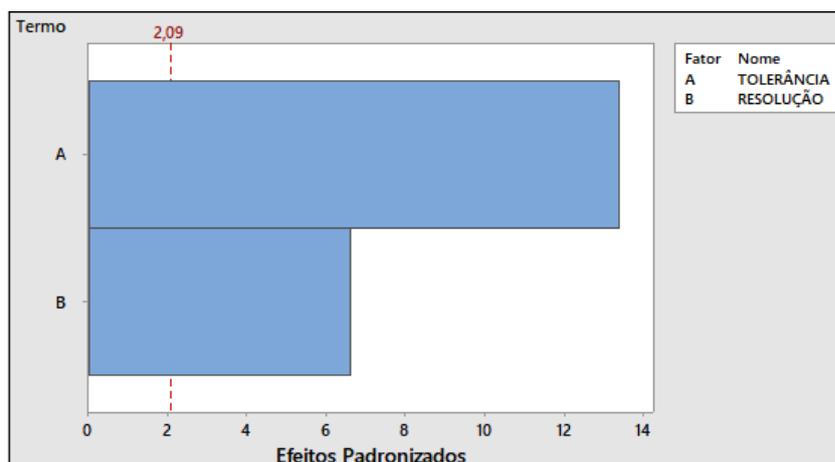
4.2 Análise dos Efeitos da Resolução dos Programas CN e Tolerância CAM sobre os Desvios de Trajetória de Ferramenta

Pelas análises descritas nas Subseções 4.1.1, 4.1.2 e 4.1.3, percebe-se o efeito da tolerância sobre os desvios de trajetória da ferramenta. Para estes, foram configurados programas CN com resolução de 4 casas decimais, entretanto, esta análise se restringe às variações estabelecidas dentro deste limite.

Aspectos relacionados à variação de tolerância CAM e resolução de programas CN foram analisados em experimentos cuja finalidade foi avaliar a influência destes fatores sobre os desvios de trajetória de ferramenta.

Assim, com a finalidade de avaliar tais aspectos, conforme descrito na Seção 3.4 do Capítulo 3, o software *Inventor HSM* foi configurado com resolução do programa CN de 4, 5, 6, 7 e 8 casas decimais, utilizando as tolerâncias de 0,01 mm, 0,001 mm, 0,0001 mm, 0,00001 mm, 0,000001 mm e 0,0000001 mm. Os dados desta análise e os resultados da resposta sobre estes fatores pode ser visualizado nas Figuras 4.7 e 4.8.

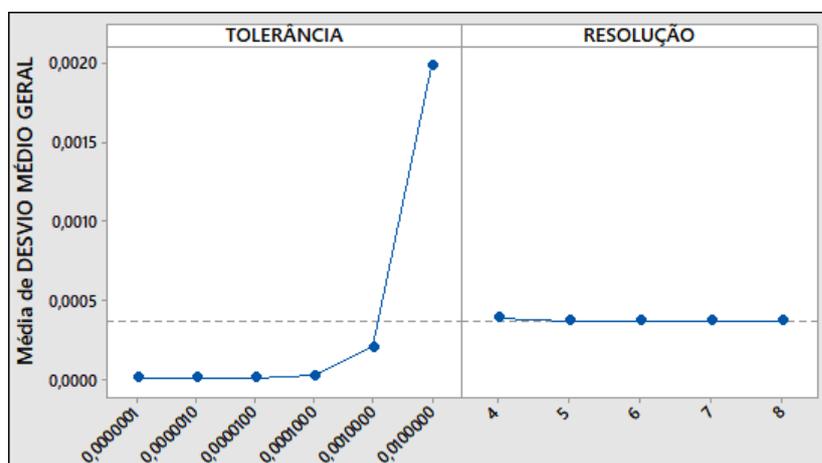
Figura 4.7: Gráfico de Pareto para os desvios médios obtidos a partir do programa CN



Fonte: dados da pesquisa

O gráfico de Pareto da Figura 4.7 possibilita a identificação visual dos efeitos importantes, permitindo comparar a magnitude e a significância estatística destes efeitos. Nesta análise, é possível avaliar que tanto a tolerância CAM quanto a resolução dos programas CN, possuem influência significativa nos desvios médios de trajetória de ferramenta. Entretanto, não é possível determinar quais efeitos aumentam ou diminuem a variável de resposta. Portanto, a análise do gráfico de efeitos principais torna-se necessária (Figura 4.8).

Figura 4.8: Gráfico de efeitos principais para os desvios médios obtidos a partir do programa CN



Fonte: dados da pesquisa

A análise de efeitos principais para o fator tolerância demonstra maior variação em torno da média, representando significância estatística, ratificando com a análise do gráfico de Pareto (Figura 4.7) e com as análises descritas na Subseção 4.1.2.

Em particular, a tolerância de 0,01 mm apresentou maior magnitude nos desvios de trajetória de ferramenta e, portanto, exerce maior influência quando comparada com os outros níveis de tolerância.

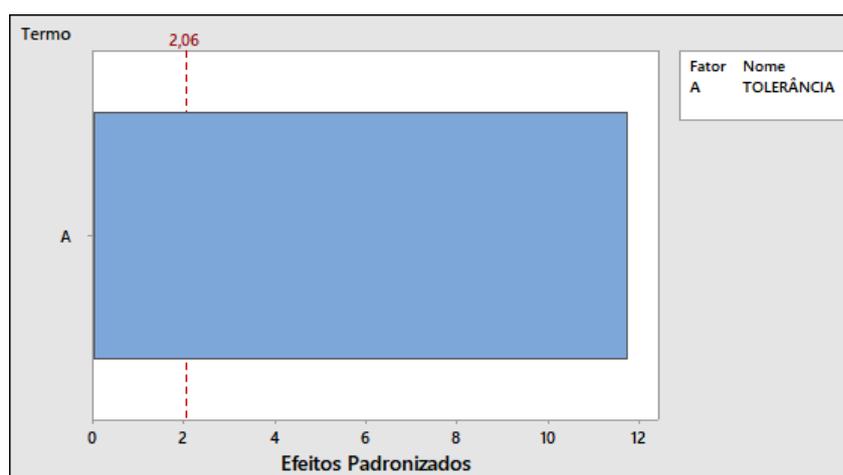
Não foram identificadas diferenças estatisticamente significantes nos desvios para os níveis de tolerância 0,001 mm e 0,0001 mm, desta forma, os desvios de trajetórias para esses níveis de tolerância são desprezíveis e afetam a resposta do mesmo modo.

As tolerâncias 0,00001 mm, 0,000001 mm e 0,0000001 mm, apresentam comportamento linear, paralelo ao eixo "x", demonstrando não existirem efeitos destas tolerâncias sobre os desvios médios de trajetória de ferramenta.

A análise do fator resolução permite inferir que, como a linha de efeitos em torno da média é horizontal e coincidente, não há nenhum efeito principal presente na análise, ou seja, a média de resposta é a mesma em todos os níveis deste fator. Entretanto, tal análise diverge da avaliação realizada pelo gráfico de Pareto (Figura 4.7), onde o fator resolução é considerado significativo do ponto de vista estatístico. Considerando estas constatações, foi realizada a avaliação de cada fator isoladamente de maneira a identificar a influência de um destes fatores na resposta do outro.

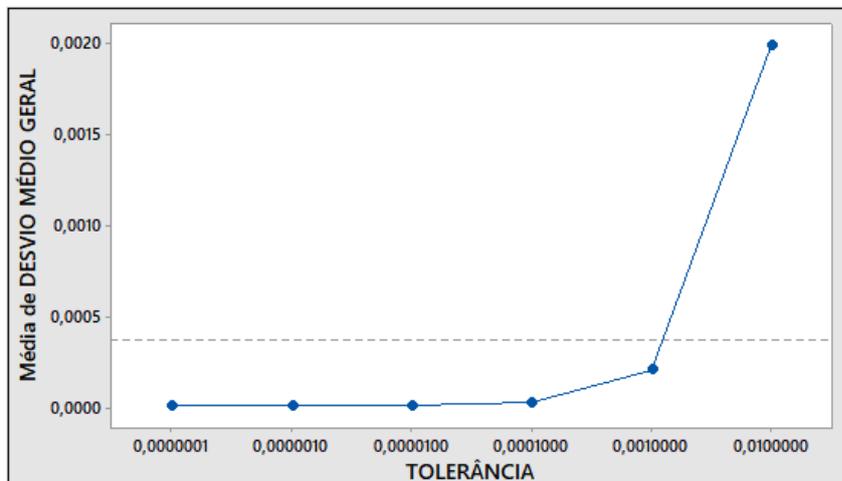
As Figuras 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12 ilustram, respectivamente, as análises individuais do gráfico de Pareto e de efeitos principais sobre a resposta desvio médio de trajetória de ferramenta.

Figura 4.9: Gráfico de Pareto do fator tolerância para os desvios médios obtidos a partir do programa CN



Fonte: dados da pesquisa

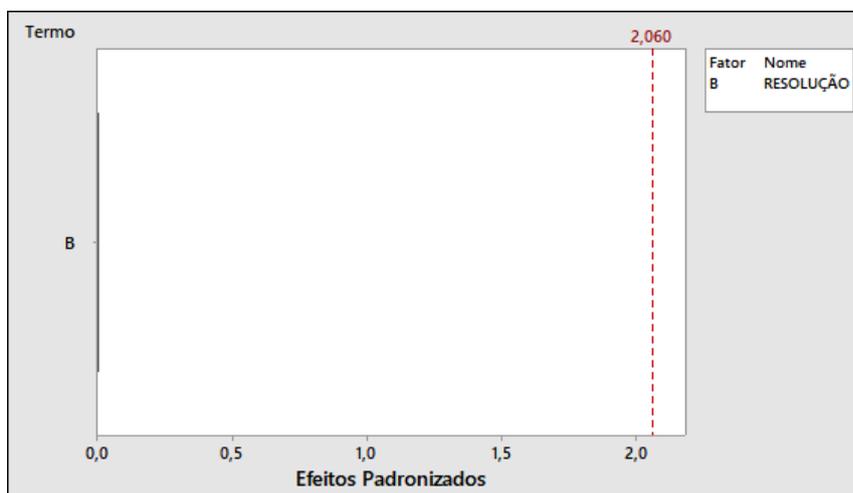
Figura 4.10: Gráfico de efeitos principais do fator tolerância para os desvios médios obtidos a partir do programa CN



Fonte: dados da pesquisa

A análise individual da tolerância nos gráficos de Pareto e de efeitos principais (Figuras 4.9 e 4.10) retoma as constatações vistas anteriormente, onde a tolerância é tida como fator de influência significativa nos desvios de trajetória de ferramenta. Adiante, as Figuras 4.11 e 4.12, ilustram o comportamento individual do fator resolução.

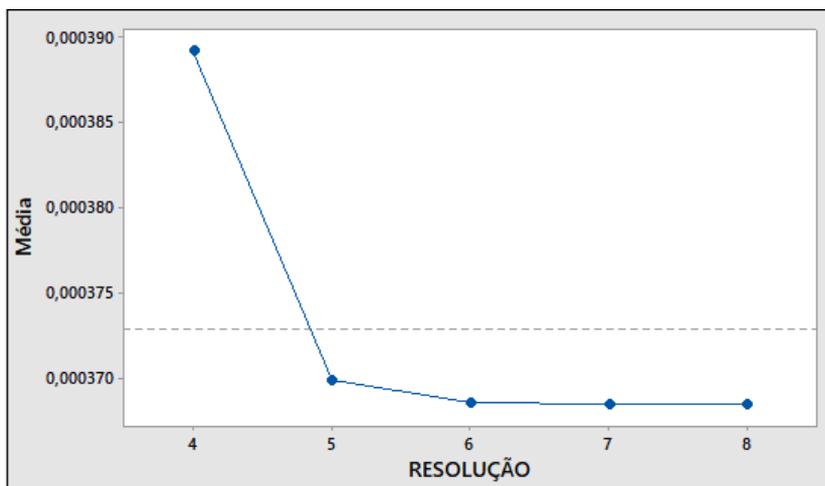
Figura 4.11: Gráfico de Pareto do fator resolução para os desvios médios obtidos a partir do programa CN



Fonte: dados da pesquisa

A análise da Figura 4.11 reitera a conclusão das avaliações no gráfico de efeitos principais (Figura 4.8), de que a resolução não possui influência significativa nos desvios de trajetória de ferramenta. Percebe-se, todavia, na Figura 4.12, que apesar da inclinação aparente para as resoluções de 4 e 5 casas decimais, evidenciando magnitude no efeito, que a variação das médias é extremamente pequena (cerca de 0,00002), o que denota insignificância estatística na resposta do experimento.

Figura 4.12: Gráfico de efeitos principais do fator resolução para os desvios médios obtidos a partir do programa CN



Fonte: dados da pesquisa

É importante mencionar que, os gráficos de Pareto e efeitos principais para o desvio máximo de trajetória de ferramenta demonstraram afetar a resposta da mesma maneira que as estabelecidas nos gráficos para os desvios médios, vistos anteriormente, não apresentando diferenças significantes, por este motivo, foram omitidos da análise. Como as interações não foram estatisticamente significativas, não houve evidência de interações entre os fatores, portanto, não foram gerados gráficos de interações.

Outro fato relevante a ser considerado na análise da relação entre tolerância CAM e resolução de programa CN, remete ao fato de que, em termos de configuração de resolução do software CAM na etapa de pós-processamento, os programas CN gerados apresentaram desvios de trajetória de ferramenta acima da banda de tolerância estabelecida na trajetória de ferramenta CAM, sempre que a equivalência de casas decimais estabelecida para as duas configurações, resolução do programa CN e tolerância CAM, não é obedecida.

Em outras palavras, sempre que a quantidade de casas decimais das coordenadas de posição do programa CN for menor do que a quantidade de casa decimais do limite de tolerância de trajetória da ferramenta configurado no software CAM, os desvios de trajetória serão maiores. Percebe-se, portanto, que a configuração de resolução dos programas CN gerados possui relação direta com o aumento dos desvios de trajetórias calculados. A exemplo, têm-se um ponto qualquer $Z = 0,856$, para uma tolerância CAM de 0,0001.

As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam os desvios médios e máximos calculados, respectivamente, em função da variação de tolerância de trajetória de ferramenta CAM e resolução de programas CN. Os números de desvios das tabelas destacados em negrito, demonstram as situações onde a condição de equivalência de resolução de programa CN e tolerância CAM

não é obedecida.

Tabela 4.1: Desvios médios calculados em função da tolerância CAM e resolução de programas CN

Tol.(mm)	Resolução (casas decimais)				
	4	5	6	7	8
0,01	0,001992280	0,001984286	0,001983549	0,001983648	0,001983631
0,001	0,000207790	0,000202867	0,000203477	0,000203404	0,000203414
0,0001	0,000039651	0,000021110	0,000020614	0,000020575	0,000020576
0,00001	0,000031318	0,000004204	0,000002644	0,000002559	0,000002558
0,000001	0,000031849	0,000003232	0,000000386	0,000000224	0,000000223
0,0000001	0,000032113	0,000003259	0,000000329	0,000000079	0,000000065

Fonte: dados da pesquisa

Tabela 4.2: Desvios máximos calculados em função da tolerância CAM e resolução de programas CN

Tol.(mm)	Resolução (casas decimais)				
	4	5	6	7	8
0,01	0,002580133	0,002583238	0,002584146	0,002584139	0,002584134
0,001	0,000336851	0,000325266	0,000323407	0,000323237	0,000323247
0,0001	0,000083251	0,000035310	0,000032532	0,000032292	0,000032301
0,00001	0,000064209	0,000008420	0,000003983	0,000003735	0,000003730
0,000001	0,000065542	0,000006723	0,000000908	0,000000384	0,000000341
0,0000001	0,000067979	0,000006635	0,000000761	0,000000162	0,000000129

Fonte: dados da pesquisa

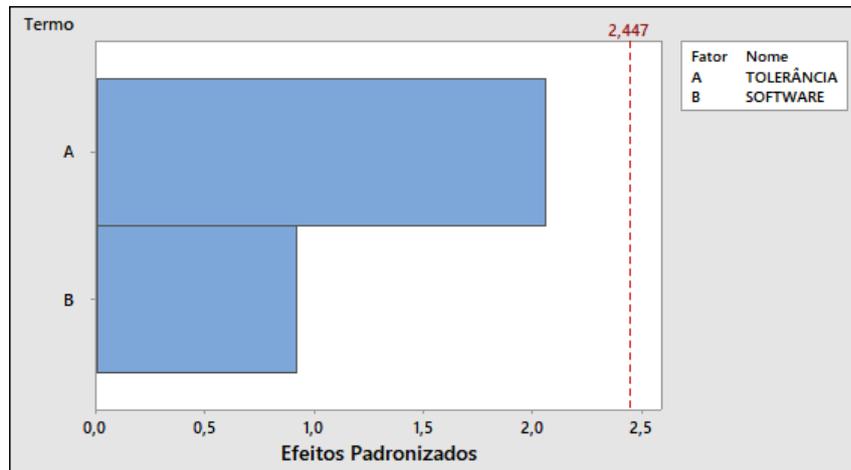
4.3 Análise dos Desvios de Trajetórias Geradas em Diferentes Softwares CAM

O tratamento dos dados de desvios de trajetória da ferramenta para softwares CAM diferentes, permitiu estabelecer diferenças significativas entre o potencial de cada software em gerar trajetória de usinagem precisas.

As análises que contemplam os estudos associados à avaliação dos softwares CAM, *Inventor HSM*, *Cimatron*, *CATIA* e *NX*, podem ser visualizadas a seguir. Os valores dos desvios de trajetórias de ferramenta calculados para cada software CAM podem ser visualizados na Tabela C.4, Apêndice C.

A Figura 4.13 ilustra o gráfico de Pareto dos fatores software CAM e tolerância para os desvios médios obtidos a partir do programa CN.

Figura 4.13: Gráfico de Pareto dos fatores software CAM e tolerância para os desvios médios obtidos a partir do programa CN

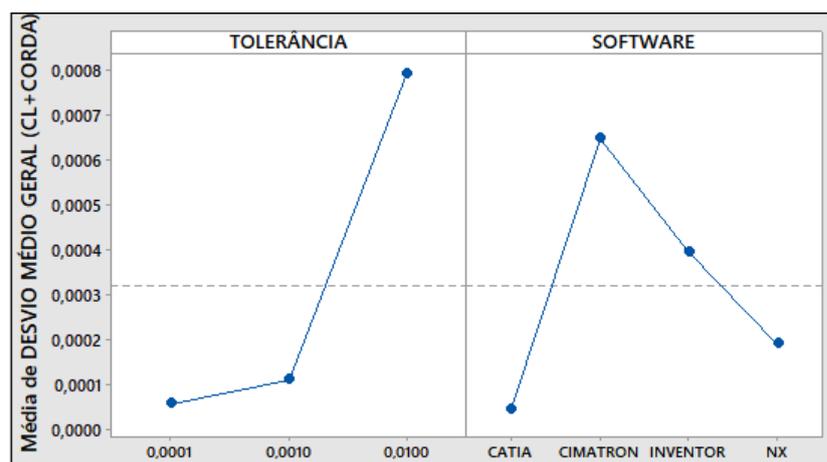


Fonte: dados da pesquisa

Para os desvios médios de trajetória de ferramenta (Figura 4.13), a análise de Pareto permite inferir que não existe influência dos fatores, software e tolerância, sobre os desvios, demonstrando irrelevância estatística.

Como o gráfico de Pareto apresenta apenas valores absolutos, a análise do gráfico de efeitos principais, Figura 4.14, permite avaliar o comportamento dos softwares individualmente.

Figura 4.14: Gráfico de efeitos principais dos fatores software CAM e tolerância para os desvios médios obtidos a partir do programa CN

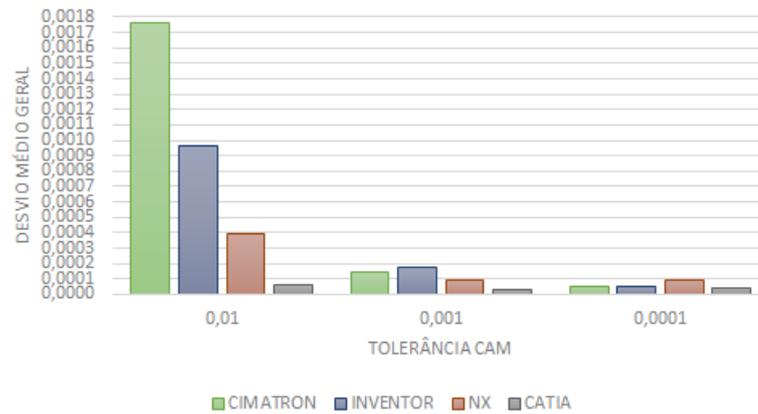


Fonte: dados da pesquisa

Conforme observado na Figura 4.14, a tolerância de 0,01 mm mostra-se a mais influente. Não foi evidenciada significância estatística para as demais tolerâncias. Dentre os softwares CAM avaliados, o que apresentou maior efeito no desvio médio de trajetória foi o software *Cimatron*, seguido do *Inventor HSM*, *NX* e *CATIA*. Entretanto, ainda assim, não é possível identificar o comportamento individual dos softwares para cada limite de tolerância

estabelecido. Desta forma, o gráfico de barras da Figura 4.15, representa, de forma categórica, o conjunto de dados que apresentam a variação de precisão dos softwares no que tange a capacidade de processamento de cálculo dos desvios de trajetória de ferramenta.

Figura 4.15: Gráfico de barras dos desvios médios calculados pelos softwares CAM

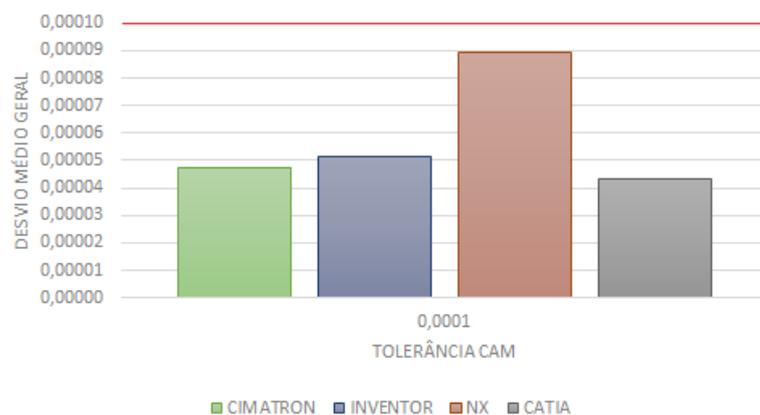


Fonte: dados da pesquisa

Como constatado na Figura 4.15, para a tolerância de 0,01 mm, os softwares que apresentaram maiores desvios médios de trajetória de ferramenta foram o *Cimatron*, seguido do *Inventor HSM*, *NX* e *CATIA*. Entretanto, para a tolerância de 0,001 mm, o software *Inventor HSM* foi o que apresentou maior desvio de trajetória, seguido do *Cimatron*, *NX* e *CATIA*.

De modo particular, para a tolerância típica do processo de microfresamento, que normalmente é de 0,0001 mm, é possível perceber que em termos de precisão de cálculo de trajetória de ferramenta, todos os softwares permaneceram dentro do limite de tolerância estabelecido. Desta forma, atendendo às condições de precisão exigidas pelo processo. A Figura 4.16 apresenta esta relação.

Figura 4.16: Gráfico de barras dos desvios médios calculados pelos softwares CAM para a tolerância de 0,0001 mm



Fonte: dados da pesquisa

Da análise da Figura 4.16, é possível perceber que, para a tolerância de 0,0001 mm, o software que apresentou maior desvio de trajetória de ferramenta foi o *NX*, seguido *Inventor HSM*, *Cimatron* e *CATIA*.

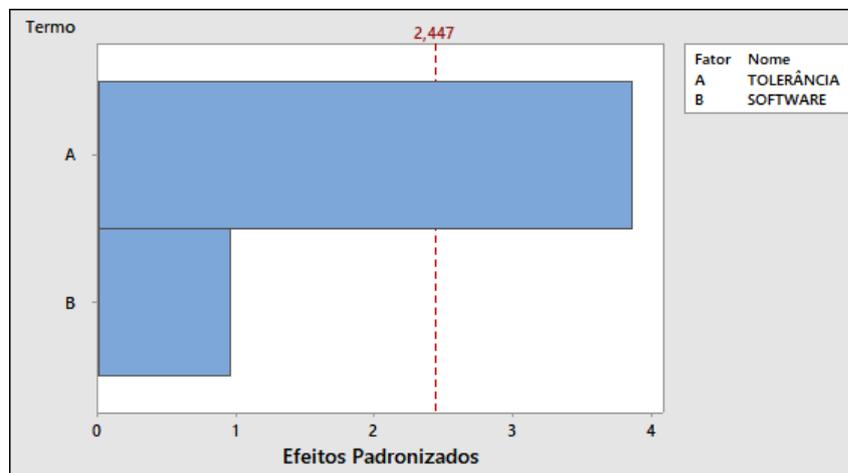
Para todas as análises de tolerância descritas, o software *CATIA* foi o que apresentou melhor precisão de cálculo de trajetória, ou seja, menor desvio, quando comparado com os outros softwares.

Além da análise de precisão de trajetória de ferramenta a partir da avaliação dos desvios médios de trajetória de ferramenta, foram verificados possíveis pontos máximos de desvios para cada tolerância.

Esses desvios máximos remetem à possibilidade de, em termos de precisão de usinagem, garantir, ou não, que a peça será usinada dentro dos limites seguros de tolerância e que não haverá nenhum ponto (desvio), para fora deste limite, assegurando que a usinagem não será realizada para além da fronteira de tolerância especificada pelo usuário.

O gráfico de Pareto da Figura 4.17 representa a influência dos fatores, software CAM e tolerância, sobre a resposta desvios máximos de trajetória de ferramenta.

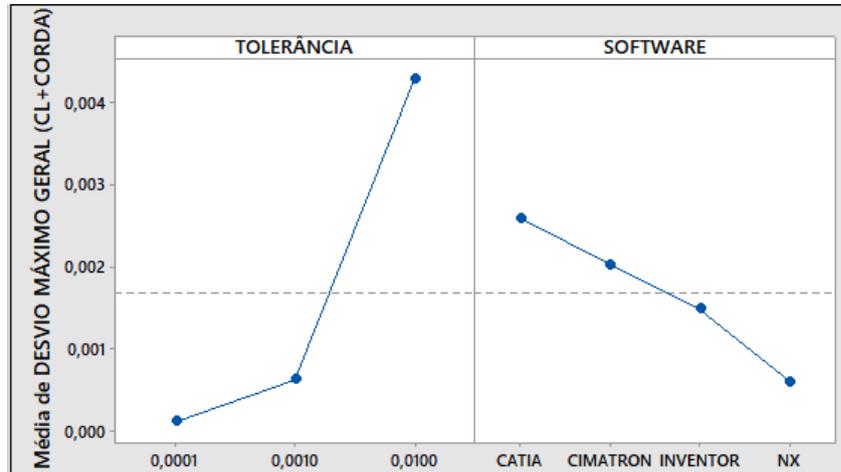
Figura 4.17: Gráfico de Pareto dos fatores software CAM e tolerância para os desvios máximos obtidos a partir do programa CN



Fonte: dados da pesquisa

No caso da análise da Figura 4.17, a tolerância possui influência significativa nos desvios de trajetória de ferramenta, entretanto, conforme observado, os softwares CAM não. O comportamento individual de cada software, bem como os níveis de tolerância, indicando as variações para a resposta, pode ser avaliado pelo gráfico de efeitos principais, Figura 4.18.

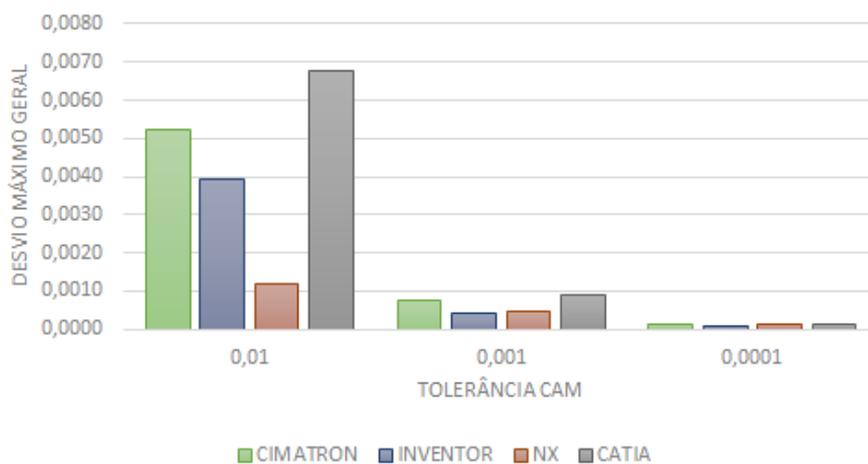
Figura 4.18: Gráfico de efeitos principais dos fatores software CAM e tolerância para os desvios máximos obtidos a partir do programa CN



Fonte: dados da pesquisa

A avaliação dos efeitos principais reitera que, dentre os fatores, a tolerância continua sendo o fator mais influente e, em particular, a tolerância de 0,01 mm. Para as tolerâncias de 0,001 mm e 0,0001 mm, não foi evidenciada significância estatística. Os softwares que apresentaram maiores desvios de trajetória de ferramenta foram, na sequência, o *CATIA*, *Cimatron*, *Inventor HSM* e *NX*. Para cada limite de tolerância estabelecido, a resposta dos softwares, individualmente, está descrita no gráfico de barras representado na Figura 4.19

Figura 4.19: Gráfico de barras dos desvios máximos calculados pelos softwares CAM

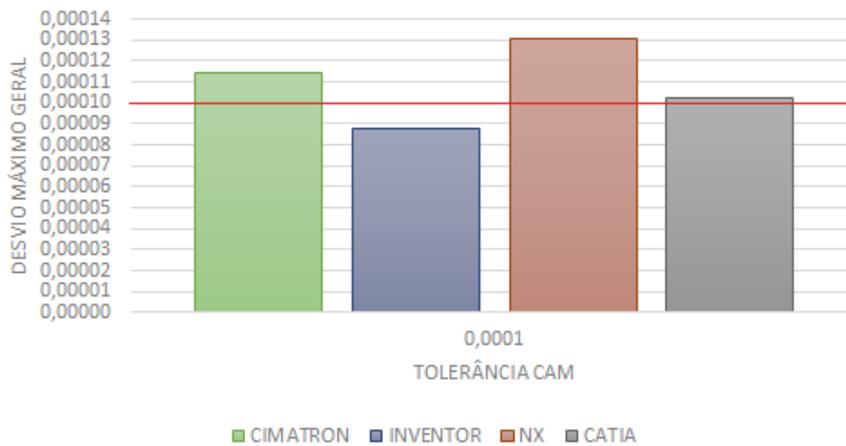


Fonte: dados da pesquisa

Conforme avaliação do gráfico (Figura 4.19), para a tolerância de 0,01 mm, o software que apresentou maior desvio máximo de trajetória de ferramenta foi o *CATIA*, em seguida o *Cimatron*, *Inventor HSM* e por fim o *NX*. Para a tolerância de 0,001 mm, o software *CATIA* continua sendo o que apresenta maior desvio máximo, seguido do *Cimatron*, *NX* e *Inventor HSM*.

A análise individual para a tolerância de 0,0001 mm, conforme Figura 4.20, normalmente indicada para trabalhos como microfresamento, representa o conjunto de dados que apresentam a capacidade dos softwares calcularem trajetórias de ferramenta que atendam aos limites de tolerância estabelecidos.

Figura 4.20: Gráfico de barras dos desvios máximos calculado pelos softwares CAM para a tolerância de 0,0001 mm



Fonte: dados da pesquisa

A observação do comportamento dos softwares na Figura 4.20, permite avaliar que, dentre os softwares analisados, o único que atende às condições de não extrapolar este limite é o software *Inventor HSM*. O software que apresentou maior desvio máximo foi o *NX*, em seguida o *Cimatron*, por fim o *CATIA*.

O percentual de erros de precisão de trajetórias, ou seja, pontos fora do limite de tolerância, para cada software CAM é apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Percentual de erros de precisão de trajetória em cada software CAM para a tolerância de 0,0001 mm

Software	Nº de pontos fora da tolerância	Maior desvio (mm)	Erro (%)
CIMATRON	1	0,0001139004302800650	13,9
INVENTOR	0	0,000040307191350827	0
NX	16	0,0001309792323266560	30
CATIA	1	0,000102089020152797	2

Fonte: dados da pesquisa

Como observado na Tabela 4.3, o software *NX* apresentou a maior quantidade de pontos (dispersão) de desvio de trajetória de ferramenta fora da banda de tolerância (16 pontos), apresentando também, o maior ponto de desvio de trajetória (0,0001309792323266560), o que equivale, em termos percentuais, a um desvio cerca de 30% acima do limite de tolerância estabelecido.

Os softwares *Cimatron* e *CATIA*, apresentaram a mesma quantidade de pontos fora da banda de tolerância (1 ponto), entretanto, o *Cimatron* apresentou maior valor de desvio, o equivalente a 13,9% acima do valor da tolerância, contra 2% do *CATIA*.

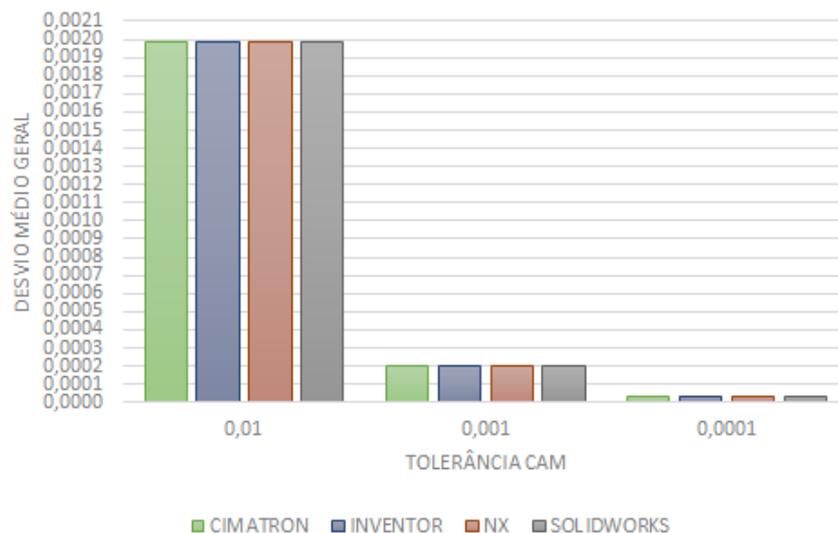
O software *Inventor HSM* apresentou o melhor desempenho, realizando as trajetórias dentro da banda de tolerância, ou seja, mantendo os pontos de desvios máximos de trajetória de ferramenta dentro do limite estabelecido.

4.4 Análise da Influência da Troca de Dados Geométricos nos Desvios

A análise da troca de dados geométricos entre softwares CAM de fabricantes diferentes a partir de arquivos de formatos padronizados, teve como principal objetivo avaliar as implicações da troca geométrica de dados por softwares CAM distintos nos desvios de trajetória de ferramenta, uma vez que, erros de tradução de dados entre pacotes CAD e CAM diferentes afetam a precisão da usinagem, sendo ainda mais acentuado no microfresamento.

A Figura 4.21 ilustra o gráfico dos desvios de trajetória de ferramenta calculados a partir da conversão do modelo CAD utilizado, conforme descrito na Seção 3.6, no formato de extensão neutra IGES, que em seguida foi importado para o software *Inventor HSM* para geração de trajetórias e posterior cálculo dos desvios de trajetória de ferramenta.

Figura 4.21: Gráfico de barras dos desvios médios calculados pelos softwares CAM para trajetórias geradas em arquivos no formato IGES



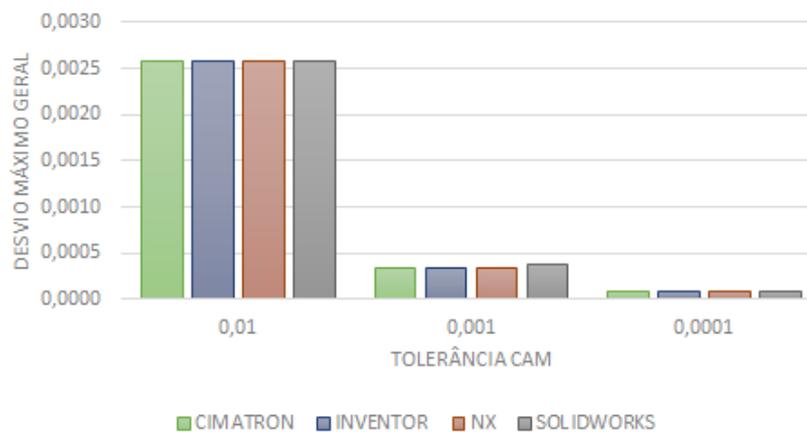
Fonte: dados da pesquisa

Conforme observado na Figura 4.21, os desvios médios de trajetória apresentaram compor-

tamento uniforme, com os mesmos desvios de trajetória de ferramenta, e isso, independente do softwares CAM avaliado.

A análise dos desvios máximos, conforme Figura 4.22, também remete à conclusão de que os desvios de trajetória de ferramenta permanecem iguais para os diferentes softwares, denotando não ter ocorrido diferenças significativas no processo de conversão dos arquivos CAD para o formato IGES para os softwares avaliados.

Figura 4.22: Gráfico de barras dos desvios máximos calculados pelos softwares CAM para trajetórias geradas em arquivos no formato IGES



Fonte: dados da pesquisa

Considerando as análises das Figuras 4.21 e 4.22, é possível inferir que tal acontecimento está relacionado ao fato de que o modelo CAD utilizado possui geometria facilmente transferível entre os softwares CAM. Desta forma, os pontos de coordenada dos programas CN gerados foram aproximadamente iguais.

Em razão disto, a análise comparativa dos softwares CAM a partir do cálculo dos desvios de trajetória de ferramenta para o formato STEP não foram realizadas, pois, assim como para o formato IGES, os desvios de trajetória de ferramenta para os softwares avaliados foram aproximadamente os mesmos, tornando, portanto, sua análise irrelevante.

Os valores dos desvios calculados em função dos formatos padronizados, IGES e STEP, para cada softwares CAM pode ser encontrado no Apêndice C.3.

Considerações finais

Este trabalho apresenta como objetivo estudar os impactos da tolerância CAM e da resolução de programas CN, levando em consideração a influência de fatores como o raio de curvatura convexa de uma geometria e o diâmetro da ferramenta, sobre a precisão de trajetórias de ferramenta para aplicações de microfresamento. Além disso, importantes aspectos relacionados às implicações de se gerarem trajetórias de ferramenta a partir de arquivos CAD importados em formatos padronizados foram avaliados.

O estudo inicial desta dissertação perpassou por uma pesquisa em busca de softwares CAM comercialmente disponíveis com recursos voltados às aplicações em microescala, em especial à microfresamento. Este levantamento serviu de apoio para compreensão dos principais recursos que estes softwares oferecem e quais suas implicações na geração de trajetórias de ferramenta em condições comuns ao processo de microfresamento, o que culminou em conhecimentos mais sólidos em relação às tecnologias CAD-CAM.

As análises experimentais utilizando o software *Inventor HSM* permitiram avaliar aspectos relacionados à fatores como o raio de geometria, diâmetro da ferramenta e tolerância CAM, nos desvios de trajetórias de ferramenta calculados a partir dos dados de coordenadas do programa CN. A partir destas análises, foi possível concluir que os fatores raio de geometria e diâmetro da ferramenta não possuem influência nos desvios de trajetórias de ferramenta, individualmente, ou quando se relacionam, indicando irrelevância estatística. Em outros termos, é possível dizer que a redução das proporções da geometria da peça e do diâmetro da ferramenta não levaram a uma menor precisão, ou seja, maior desvio, das trajetórias de ferramenta.

Por outro lado, foi possível apreciar que o fator que apresentou maior influência nos desvios médios e máximos de trajetórias da ferramenta, individualmente e nas interações com outros fatores, foi a tolerância.

Os maiores desvios de trajetória encontrados estão relacionados com a tolerância de 0,01 mm. Para tolerâncias na faixa micrométrica (0,001 mm) e submicrométrica (0,0001 mm), os desvios não são considerados significativos para os diversos fatores e suas interações.

No que diz respeito à influência da variação da resolução de programas CN gerados e da variação da tolerância CAM sobre a precisão de trajetórias de ferramenta, foi possível notar que, de modo geral, para operações de microfresamento, em termos de configuração de programas CN na etapa de pós-processamento, não se deve utilizar uma resolução com

a quantidade de casas decimais menor do que a do limite de tolerância estabelecido. Tal conclusão se torna importante na condição em que aponta para a necessidade de ajuste da resolução dos programas CN gerados para operações em microescala, pois, para tarefas típicas de usinagem, as configurações de resolução padrão determinadas pelos fabricantes dos softwares CAM funcionam bem, entretanto, para operações de microusinagem podem não ser precisas o suficiente para atender às características específicas oriundas deste processo.

Portanto, de certo que, de nada adianta criar um programa ou gerar trajetórias de ferramenta em softwares CAM com tolerâncias rigorosas para máquinas CNC's que limitam a resolução do programa CN gerado. Ou seja, para máquinas que possuem resolução de programas CN de 0,0001 ou que limitam a resolução de programas CN a 0,0001, fazer um programa ou gerar trajetórias CAM com tolerâncias menores do que isso, não resultará em uma melhor precisão.

Em relação a análise dos desvios de trajetória de ferramenta em softwares CAM de fabricantes diferentes, a análise estatística dos desvios mostrou que, em termos de precisão dos cálculos matemáticos de geração de trajetórias, foram encontradas diferenças significativas entre os softwares CAM na geração de trajetórias com tolerâncias normalmente recomendadas para aplicações em microfresamento.

Dentre os softwares CAM avaliados, para todas as análises de tolerâncias realizadas, o software *CATIA* foi o que apresentou melhor precisão de cálculo, apresentando os menores valores de desvios médios de trajetória de ferramenta. De modo particular, para a tolerância típica do processo de microfresamento, foi possível constatar que todos os softwares permaneceram dentro do limite de tolerância estabelecido, atendendo, desta forma, às condições de precisão exigidas pelo processo.

Entretanto, da análise dos desvios máximos de trajetória foi possível concluir que, dentre os softwares CAM avaliados, o *Inventor HSM* demonstrou os melhores resultados em termos de precisão de cálculo na geração de trajetórias para aplicações típicas de microfresamento, mantendo os pontos de desvios dentro da banda de tolerância estabelecida. Mesmo quando comparado com o software *Cimatron*, pioneiro em operações de microfresamento e único software que alega possuir um módulo dedicado às operações de microfresamento, o *Inventor HSM* apresentou melhores resultados, o que é uma conclusão importante, uma vez que aponta para a possibilidade de se gerarem trajetórias de ferramenta precisas em softwares CAM que não possuem módulos dedicados a estas aplicações.

O processo de exportação e importação de modelos CAD padronizados para geração de trajetórias de ferramenta em softwares CAM, visando avaliar a influência desta conversão nos desvios de trajetória de ferramenta, crítico nas operações em microescala, não pôde ser

avaliado, pois, o fato da geometria utilizada possuir superfície cilíndrica, sendo facilmente modelável em qualquer CAD, simplifica os cálculos realizados pelos softwares CAM, desta forma, na etapa de geração de trajetórias CAM a partir dos arquivos nos formatos neutros IGES e STEP, foi possível perceber que os pontos de coordenadas CN gerados pelos softwares CAM foram aproximadamente os mesmos, o que leva a cálculos de desvios de trajetórias aproximadamente iguais, não sendo observadas diferenças significativas nestes desvios, logo, não sendo possível realizar uma análise comparativa entre os softwares avaliados.

Os resultados desta dissertação mostram que, a partir de análises experimentais da geração de trajetórias de ferramentas em softwares CAM disponíveis comercialmente, aspectos relacionados a fatores geométricos de peça e ferramenta, tolerância CAM e resolução de programas CN, podem, ou não, influenciar nos desvios de trajetórias de ferramenta calculados. Desta forma, através da proposta deste trabalho é possível fornecer informações que permitam aos usuários de softwares CAM compreenderem melhor questões relacionadas aos fatores aqui estudados, ao ponto em que contribui de forma significativa com a produção de conhecimentos voltados aos processos de microusinagem, em especial, ao microfresamento, já que poucos estudos relacionados, como mostrado no Capítulo 2, foram encontrados.

5.1 Sugestão Para Trabalhos Futuros

- Estudar os impactos de se gerarem trajetórias de ferramenta em modelos CAD importados a partir de arquivos de extensão neutra sobre uma geometria de maior complexidade do que a utilizada neste trabalho.

Softwares CAD-CAM Comerciais

A.1 Principais Desenvolvedores de Softwares CAD-CAM e Seus Produtos

Tabela A.1: Softwares CAD-CAM Comerciais (*Continua*)

	Desenvolvedor	Produto
1	Autodesk, Inc.	Autodesk HSM
2	Cadem	CAPSmill, CAPSturn, CAMLite
3	Camtek Ltd.	PEPS
4	Camssoft	Advanced System 3000
5	Cimatrom Group (3D Systems)	Cimatrom E, GibbsCAM
6	Cimplex	Cimskil Manufacturing Automation
7	CNC Software, Inc.	Mastercam
8	Dassault Systemes S.A	CATIA
9	Delcam International	PowerMILL, FeatureCAM, ArtCAM
10	DP Technology	ESPRIT
11	Engineering Geometry Systems	FeatureCAM
12	ERCII	e-NC
13	EZ-CAM Solutions	EZ MILL & EZ-TURN Express
14	EXAPT	EXAPT
15	FastCAM	FastCAM
16	Geometric Technologies, Inc.	CAMWorks
17	ICAM Technologies Corporation	CAM-POST, Virtual Machine
18	Intelitek	SpectraCAM Turning, SpectraCAM Milling
19	Kubotek Corporation	KeyMachinist
20	LAB	SUM3D, BAMBOO, DRILLMATRIX, RHINONC
21	Lectra	Vector, GraphicPilot
22	MasterShip Software	MasterShip
23	MCS	ANVIL
24	MecSoft Corporation	VisualMill
25	Metalix CAD/CAM Ltda.	cncKad

(Continuação)

	Desenvolvedor	Produto
26	Metamation	MetaCAM
27	MicroTech StellaData AB	CamModul, TrigFix-32
28	Missler Software	TopSolidCAM
29	MMTechnologies	MachineWorks
30	Module Works	5AxCore
31	MTC Software, Inc.	ProNest, TurboNest, Design2fab, GeoPoint
32	NC Graphics	DEPOCAM, Toolmaker
33	Open Mind Software	HyperMILL
34	OptiTex	3D Runway
35	Parametric Technology Corp.	Creo Parametric (antigo Pro/ENGINEER)
36	Progressive Software Corp.	X-CAM
37	QARM Pty Ltd	OneCNC
38	Vero Software	Machining STRATEGIST, RADAN
39	Vero Software	WorkNC, SurfCAM, EdgeCAM, AlphaCAM, VISI
40	SmartCAMcnc	SmartCAM
41	SolidCAM	SolidCAM
42	SolutionWare Corporation	GeoPath, MazaCAM, PowerCAM
43	Sprut Technology	Sprutcam
44	Tebis	Tebis
45	UGS (Siemens PLM Solutions)	NX

Fonte: dados da pesquisa

Análise de Variância para os Desvios

B.1 Análise de Variância (ANOVA) para o Desvio Médio do programa CN

Tabela B.1: Análise de Variância para o Desvio Médio do programa CN

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	18	0,000032	0,000002	35,31	0,000
Linear	6	0,000031	0,000005	101,95	0,000
RG	2	0,000000	0,000000	2,61	0,134
DF	2	0,000000	0,000000	3,19	0,096
TOL	2	0,000031	0,000015	300,06	0,000
Interações de 2 fatores	12	0,000001	0,000000	1,99	0,168
RG*DF	4	0,000000	0,000000	1,08	0,425
RG*TOL	4	0,000000	0,000000	1,80	0,222
DF*TOL	4	0,000001	0,000000	3,08	0,082
Erro	8	0,000000	0,000000		
Total	26	0,000033			

Fonte: dados da pesquisa

B.2 Análise de Variância (ANOVA) para o Desvio Máximo do Programa CN

Tabela B.2: Análise de Variância para o Desvio Máximo do programa CN

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	18	0,000144	0,000008	37,86	0,000
Linear	6	0,000141	0,000024	111,50	0,000
RG	2	0,000001	0,000000	1,38	0,306
DF	2	0,000000	0,000000	0,90	0,443
TOL	2	0,000141	0,000070	332,23	0,000
Interações de 2 fatores	12	0,000003	0,000000	1,03	0,499
RG*DF	4	0,000001	0,000000	1,20	0,382
RG*TOL	4	0,000001	0,000000	1,17	0,392
DF*TOL	4	0,000001	0,000000	0,72	0,599
Erro	8	0,000002	0,000000		
Total	26	0,000146			

Fonte: dados da pesquisa

Desvios de Trajetória de Ferramenta

C.1 Desvios de Trajetória Calculados para o Software Inventor HSM

Tabela C.1: Desvios de Trajetória para o Programa CN - Raio de Geometria de 10 mm

Diâmetro da fresa (mm)	Tolerância (mm)	Desvio Médio ($\bar{\Delta}$)	Maior Desvio ($\Delta_{m\acute{a}x}$)
1	0,01	0,001826382987603320	0,003906802475418330
1	0,001	0,000204502310098084	0,000417326195753021
1	0,0001	0,000019589499089718	0,000041767592654481
0,5	0,01	0,002066389082238870	0,005015056495413950
0,5	0,001	0,000180438928001307	0,000504298174020002
0,5	0,0001	0,000018414931004897	0,000050324134948340
0,1	0,01	0,002151300932479990	0,004895830946479010
0,1	0,001	0,000206247238636100	0,000472242110546051
0,1	0,0001	0,000020688823164712	0,000047255069481830

Fonte: dados da pesquisa

Tabela C.2: Desvios de Trajetória para o Programa CN - Raio de Geometria de 1 mm

Diâmetro da fresa (mm)	Tolerância (mm)	Desvio Médio ($\bar{\Delta}$)	Maior Desvio ($\Delta_{m\acute{a}x}$)
1	0,01	0,002586815637743210	0,006452413308761120
1	0,001	0,000226831979308213	0,000526707313401427
1	0,0001	0,000022454313376173	0,000051684640440510
0,5	0,01	0,003079638431885660	0,005382203244832810
0,5	0,001	0,000289414179893029	0,000516952765461407
0,5	0,0001	0,000022877403017744	0,000049149559265065
0,1	0,01	0,001958367579110380	0,005043714461254230
0,1	0,001	0,000338736406146113	0,000521119737858782
0,1	0,0001	0,000020447433816209	0,000041608450378125

Fonte: dados da pesquisa

Tabela C.3: Desvios de Trajetória para o Programa CN - **Raio de Geometria de 0,5 mm**

Diâmetro da fresa (mm)	Tolerância (mm)	Desvio Médio ($\bar{\Delta}$)	Maior Desvio ($\Delta_{máx}$)
1	0,01	0,002506564708757710	0,005517871701897790
1	0,001	0,000267714688515025	0,000559532771945961
1	0,0001	0,000026092019025191	0,000056262728358899
0,5	0,01	0,003303932740709560	0,005700068447633670
0,5	0,001	0,000294620064128225	0,000537523551185456
0,5	0,0001	0,000022980636077274	0,000051729165838977
0,1	0,01	0,000960287165709038	0,003949063731230340
0,1	0,001	0,000176927327686362	0,000409440566811610
0,1	0,0001	0,000051301182248097	0,000087860064022390

Fonte: dados da pesquisa

C.2 Desvios de Trajetória Calculados para cada Software CAM

Tabela C.4: Desvios de Trajetória Calculados para cada Software CAM - **Raio de Geometria 0,5 mm e Diâmetro de Ferramenta de 0,1 mm**

Tolerância (mm)	Software	Desvio Médio ($\bar{\Delta}$)	Desvio Máximo ($\Delta_{máx}$)
0,01	Cimatron	0,001761307637584460	0,005233937822848620
0,001	Cimatron	0,000140341811507132	0,000725419302877284
0,0001	Cimatron	0,000047176273799752	0,000113900430280065
0,01	Inventor	0,000960287165709038	0,003949063731230340
0,001	Inventor	0,000176927327686362	0,000409440566811610
0,0001	Inventor	0,000051301182248097	0,000087860064022390
0,01	NX	0,000389560318976432	0,001177977391577470
0,001	NX	0,000094549994148984	0,000473713094632909
0,0001	NX	0,000089576657537215	0,000130979232326656
0,01	CATIA	0,000063090748240667	0,006781899233834560
0,001	CATIA	0,000032776868895247	0,000894989551178874
0,0001	CATIA	0,000043272059821395	0,000102089020152797

Fonte: dados da pesquisa

C.3 Desvios de Trajetória Calculados pelos Softwares CAM - Formatos IGES e STEP

Tabela C.5: Desvios de Trajetória Calculados pelos Softwares CAM para Trajetórias Geradas em Arquivos no Formato IGES

Tolerância	Software	Desvio Médio ($\bar{\Delta}$)	Desvio Máximo ($\Delta_{máx}$)
0,01	Cimatron	0,001988183635456250	0,002579629398386420
0,001	Cimatron	0,000200611419489651	0,000335498163557484
0,0001	Cimatron	0,000029738030799209	0,000081831118045647
0,01	Inventor	0,001981195454149330	0,002579629398386420
0,001	Inventor	0,000200611419489651	0,000335498163557484
0,0001	Inventor	0,000030178070470390	0,000081831118045647
0,01	NX	0,001980787581811900	0,002579629398386420
0,001	NX	0,000200611419489651	0,000335498163557484
0,0001	NX	0,000030041770992736	0,000081831118045647
0,01	SOLIDWORKS	0,001989907023339960	0,002579629398386420
0,001	SOLIDWORKS	0,000205257820651360	0,000380638856035907
0,0001	SOLIDWORKS	0,000030041770992736	0,000081831118045647

Fonte: dados da pesquisa

Tabela C.6: Desvios de Trajetória Calculados pelos Softwares CAM para Trajetórias Geradas em Arquivos no Formato STEP

Tolerância	Software	Desvio Médio ($\bar{\Delta}$)	Desvio Máximo ($\Delta_{máx}$)
0,01	Cimatron	0,001981206129494730	0,002579629398386420
0,001	Cimatron	0,000201590586956221	0,000335498163557484
0,0001	Cimatron	0,000030041770992736	0,000081831118045647
0,01	Inventor	0,001981195454149330	0,002579629398386420
0,001	Inventor	0,000200611419489651	0,000335498163557484
0,0001	Inventor	0,000030041770992736	0,000081831118045647
0,01	NX	0,001981195454149330	0,002579629398386420
0,001	NX	0,000200611419489651	0,000335498163557484
0,0001	NX	0,000030041770992736	0,000081831118045647
0,01	SOLIDWORKS	0,001980787581811900	0,002579629398386420
0,001	SOLIDWORKS	0,000200611419489651	0,000335498163557484
0,0001	SOLIDWORKS	0,000030041770992736	0,000081831118045647

Fonte: dados da pesquisa

Referências Bibliográficas

- AFAZOV, S. M. et al. Chatter modelling in micro-milling by considering process nonlinearities. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Elsevier, v. 56, p. 28–38, 2012. ISSN 08906955. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.12.010>>.
- ARAMCHAROEN, A.; MATIVENGA, P. T. Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel. **Precision Engineering**, v. 33, n. 4, p. 402–407, 2009. ISSN 01416359.
- ARDILA, L. K. R. et al. Micro-milling process for manufacturing of microfluidic moulds. 2012.
- ARIAS, M.; SOUZA, A. F. Descrição matemática das funções Spline. *Revista Máquinas e Metais*, p. 290–311, 2008.
- AUTODESK. **Soluções CAM**. 2012. Disponível em: <<http://www.isolidcam.com/pt/solucoes-cam>>. Acesso em: 04-10-2017.
- AUTODESK. **CAD/CAM**. 2016. Disponível em: <<https://www.autodesk.com.br/solutions/cad-cam>>. Acesso em: 04-10-2017.
- BALDO, D. Estudo do microfresamento da liga de titânio Ti 6Al 4V utilizando análise de sinais de força e emissão acústica. 2013.
- BESANT, C. B. **CAD/CAM: projeto e fabricação com o auxílio de computador**. [S.l.]: Campus, 1986.
- BISSACCO, G.; HANSEN, H. N.; DE CHIFFRE, L. Size effects on surface generation in micro milling of hardened tool steel. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, Elsevier Science, v. 55, n. 1, p. 593–596, 2006.
- CÂMARA, M. A. et al. State of the Art on Micromilling of Materials, a Review. **Journal of Materials Science and Technology**, v. 28, n. 8, p. 673–685, 2012. ISSN 10050302.
- CAMARGO, L. G. et al. Influência das Trajetórias de Usinagem e da Tolerância de Cálculo no Tempo Real de Fresamento de Formas Complexas. **8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, maio 2015.
- CAMPOS, F. **Estudo das forças de corte no microfresamento da liga de alumínio 6351-T6**. 114 p. Tese (Doutorado) — Mestrado em Engenharia Mecânica - COPPE Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.
- CARDOSO, P.; DAVIM, J. P. Micro milling of metallic materials - A brief overview. **Transactions of Famena**, v. 36, n. 2, p. 79–85, 2012. ISSN 13331124.

- CARLSON, W. **Critical history of computer graphics and animation**. 2003. Disponível em: <<http://excelsior.biosci.ohio-state.edu/~carlson/history/lesson2.html>>. Acesso em: 28-06-2017.
- CAVALHEIRO, A. **Sistemização do Planejamento da Programação via CAM do Fresamento de Cavidades de Moldes Para Peças Injetadas**. Tese (Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)), Universidade Federal de Santa Catarina, 1998.
- CHAE, J.; PARK, S. S.; FREIHEIT, T. Investigation of micro-cutting operations. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n. 3-4, p. 313–332, 2006. ISSN 08906955.
- CHOI, B. K.; JERARD, R. B. **Sculptured surface machining: theory and applications**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012.
- CIMATRON. **CimatronE Micro Milling: Pioneering Solutions for Micro-Milling and Manufacturing**. 2005. 4 p.
- CIMATRON. Apostila CIMACAD Soluções em CAD/CAM, **Treinamento Cimatron E10 – Comando Numérico**. Santa Catarina: [s.n.], 2012.
- CIMATRON. Version 11.0 64-Bit Edition. Copyright (c). 2013.
- CIMATRON; KERN. **Capitalizing on the Growing Demand for Micro-Milling: A Mold Maker's Guide**. 2009. Disponível em: <<https://resources.cimatron.com/whitepaper/capitalizing-on-the-growing-demand-for-micro>>. Acesso em: 17-08-2017.
- CIMDATA. **CIMdata Publishes Global CAM Market Analysis Report, 2017**. 2017. Disponível em: <<http://www.cimdata.com/en/news/item/8210-cimdata-publishes-global-cam-market-analysis-report>>. Acesso em: 23-07-2017.
- CIMDATA. Industry Summary Articles, **GibbsCAM 2016 Is Certified for Autodesk Inventor 2017**. 2017. Disponível em: <<https://www.cimdata.com/en/industry-summary-articles/item/7631-gibbscam-2016-is-certified-for-autodesk-inventor-2017>>. Acesso em: 07-11-2017.
- COELHO, R. T. et al. Mechanistic approach to predict real machining time for milling free-form geometries applying high feed rate. p. 1103–1111, 2010.
- DANFORD, M. Machining to Microns Means Never Looking Back. **Modern Machine Shop**, Cincinnati, v. 89, p. 72–78, jul 2016. Disponível em: <http://mms.epubxp.com/read/account_titles/155254>.
- DIMOV, S. Micromilling strategies: optimization issues. n. March, p. 731–736, 2004. ISSN 0954-4054. Disponível em: <<http://orca.cf.ac.uk/8242/>>. Acesso em: 24-8-2017.

DORNFELD, D.; MIN, S.; TAKEUCHI, Y. Recent advances in mechanical micromachining. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 55, n. 2, p. 745–768, 2006. ISSN 17260604.

DÜRR, H.; SCHÜNEMANN, R.; SCHULZE, J. Cadeia de processo baseada em nurbs. **Máquinas e Metais, São Paulo**, v. 33, n. 415, p. 18–27, 2000.

EDGE CAM. **Edgecam Milling**. 2012. Disponível em: <<http://www.edgecam.com/edgecam-milling>>. Acesso em: 04-10-2017.

FERREIRA, L.; FERNANDES, J. Microdispositivos na atualidade. **Publicação da Associação Brasileira de Ciências Mecânicas-ABCM**, v. 9, n. 1, p. 8–10, 2003.

FLEISCHER, J.; KOTSCHENREUTHER, J. The manufacturing of micro molds by conventional and energy-assisted processes. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 33, n. 1-2, p. 75–85, 2007. ISSN 02683768.

GHERMAN et al. Manufacturing technology: Micro-machining. In: FASSI, I; SHIPLEY, D. (Ed.). **Micro-Manufacturing Technologies and Their Applications: A Theoretical and Practical Guide**. Cham: Springer, 2017. cap. 4, p. 97–127.

GROOVER, M.; ZIMMERS, E. **CAD/CAM: computer-aided design and manufacturing**. [S.l.]: Pearson Education, 1983.

GROOVER, M. P. **Fundamentos da Moderna Manufatura**. [S.l.]: LTC, 2017.

GROSSMAN, D. D. Opportunities for research on numerical control machining. **Communications of the ACM, ACM**, v. 29, n. 6, p. 515–522, 1986.

HELLENO, A. L. **Investigação de Métodos de Interpolação para Trajetória da Ferramenta na usinagem de Moldes e Matrizes com Alta Velocidade**. Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado)-Universidade Metodista de Piracicaba, 2004.

HOFFMANN, T. C.; SOUZA, A. F.; SANTOS, J. A. Avaliação de centros de usinagem CNC, convencionais e microfresamento, e o comportamento de trajetórias de ferramenta geradas por sistemas CAM para a fabricação de formas complexas. **Revista Ferramental**, Joinville, p. 10–14, 2015. Disponível em: <https://issuu.com/revistaferramental8/docs/n__60>. Acesso em: 02-07-2017.

HOLTZ, M. L. **Estudo sobre a transferência de informações geométricas entre sistemas CAD-CAM**. Tese (Dissertação de mestrado) — Sociedade Educacional de Santa Catarina, Joinville., 2009.

HSU, L.; YEH, S. S. Adaptive federate interpolation for parametric curves with a confined chord error. In: **Computer Aided Design**, v. 34, p. 229–237, 2002.

HYPERMILL. **Software CAM Hypermill**. 2012. Disponível em: <<http://www.openmind-tech.com/br/produtos/software-cam-hypermill.html>>. Acesso em: 04-10-2017.

JAIN, V. **Micromanufacturing Processes**. [S.l.: s.n.], 2013. 221–240 p. ISBN 143985291X.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing Processes for Engineering Materials**. New Jersey: Prentice-Hall, 2003. 954 p. ISSN 00280836. ISBN 9788178089904. Disponível em: <<http://books.google.co.uk/books?id=63CSygAACAAJ>>.

KATHAVATE, V.; CHEKE, P.; ADKINE, A. An Experimental Investigation Of Micromilling. **International Journal of Technology Enhancements and Emerging Engineering Research**, v. 3, n. 04, p. 36–41, 2015.

KENNEDY, B.; DEVOR, R.; ROSOCHOWSKI, A. First-place finish: imparting fine surface finishes when micromilling. **Micromanufacturing**, v. 3, n. 1, p. 29–32, 2010.

KIM, C.-J.; MAYOR, J. R.; NI, J. A Static Model of Chip Formation in Microscale Milling. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 126, n. 4, p. 710, 2004. ISSN 10871357.

KIM, J. D.; KIM, D. S. Theoretical analysis of micro-cutting characteristics in ultra-precision machining. **Journal of Materials Processing Tech.**, v. 49, n. 3-4, p. 387–398, 1995. ISSN 09240136.

KNOPPERS, R.; GUNNINK, J. Ferramental de compactação de tempo usando tecnologia e arquivos stl. **Máquina e Metais**, p. 124–137, 2000.

KOREN, Y. **Computer control of manufacturing systems**. [S.l.]: McGraw-Hill New York et al., 1983.

KORN, D. **CAD/CAM Considerations For Micromilling**. 2006. 84–87 p. Disponível em: <<https://www.mmsonline.com/articles/cadcam-considerations-for-micromilling>>. Acesso em: 28-07-2017.

KUMAR, P. et al. Recent advances in characterization, modeling and control of burr formation in micro-milling. **Manufacturing Letters**, Society of Manufacturing Engineers (SME), v. 13, p. 1–5, 2017. ISSN 22138463.

LAI, X. et al. Modelling and analysis of micro scale milling considering size effect, micro cutter edge radius and minimum chip thickness. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 48, n. 1, p. 1–14, 2008. ISSN 08906955.

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

MASTERCAM. **Milling Solutions**. 2014. Disponível em: <<https://www.mastercam.com/en-us/Solutions/Milling-Solutions>>. Acesso em: 04-10-2017.

MASUZAWA, T. State of the Art of Micromachining. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 49, n. 27, p. 473–488, 2000.

MATSUMURA, T. Micromilling. In: HASHMI, S. et al. (Ed.). **Comprehensive Materials Processing**. Tokyo: Elsevier, 2014. cap. 11, p. 151–177.

MERCHANT, M. E. Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal cutting and a type 2 chip. **Journal of Applied Physics**, v. 16, n. 5, p. 267–275, 1945. ISSN 00218979.

MIAN, A. J.; DRIVER, N.; MATIVENGA, P. T. Identification of factors that dominate size effect in micro-machining. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 51, n. 5, p. 383–394, 2011. ISSN 08906955.

MONARO, R. **Desenvolvimento de um índice para avaliação dinâmica de estratégias de usinagem voltadas para a manufatura de superfícies complexas**. 101 p. Tese (Dissertação (mestrado)) — Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste, 2011.

MOREIRA, F. **Influência do ângulo entre trajetórias lineares no tempo de execução de blocos em usinagem CNC de superfícies**. 128 p. Tese (Dissertação (mestrado)) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

NX. **NX CAM: Uma solução completa de manufatura assistida por computador**. 2013. Disponível em: <<https://www.plm.automation.siemens.com/pt/products/nx/for-manufacturing/cam>>. Acesso em: 04-10-2017.

OLIVEIRA, F. B. et al. Size effect and minimum chip thickness in micromilling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Elsevier, v. 89, p. 39–54, 2015.

ÖZEL, T.; LIU, X.; DHANORKER, A. Modelling and Simulation of Micro-Milling Process. **4th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds**, p. 21–23, 2007.

PAGáč, M. **Jak funguje mikrofrézování od Cimatronu**. 2011. Disponível em: <<https://www.konstrukter.cz/2011/03/28/jak-funguje-mikrofrézovani-od-cimatronu>>. Acesso em: 29-01-2018.

PAGANO, C.; FASSI, I. Introduction to miniaturisation. In: **Micro-Manufacturing Technologies and Their Applications**. [S.l.]: Springer, 2017. p. 1–22.

POPOV, K. et al. The effects of material microstructure in micro-milling. In: ELSEVIER. **4M 2006-Second International Conference on Multi-Material Micro Manufacture**. [S.l.], 2006. p. 127–130.

- POPOV, K. et al. New solutions for improving reliability and reducing uncertainty in micro-milling. **Manufacturing Engineering**, 2007.
- PROMOLDING. **Final technical report and progress report (combined)**. 2005. Disponível em: <<http://www.promoldingshanghai.com/contentdownloads/Final-Report-MicroMilling-18.pdf>>. Acesso em: 17-01-2018.
- QUEIROZ, A. A.; STEMMER, C. Cenário da programação cn–da programação manual ao cad/cam. **Simpósio sobre CAD/CAM–Revisão da situação Brasileira, Anais, SOBRACON, São Paulo**, 1986.
- RAO, P. N. **CAD/CAM: principles and applications**. [S.l.]: Tata McGraw-Hill Education, 2010.
- RODRIGUES, A. R. Microusinagem: crescimento no Brasil e no mundo. **Revista NEI**, 2014. Disponível em: <<http://www.nei.com.br/artigo/microusinagem-crescimento-no-brasil-e-no-mundo>>. Acesso em: 03-11-2017.
- SANDVIK, C. **Posições da fresa**. 2012. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/getting-started/general-guidelines/cutter-position/pages/default.aspx>>.
- SCHMIDT, J.; TRITSCHLER, H. Micro cutting of steel. **Microsystem Technologies**, v. 10, n. 3, p. 167–174, 2004. ISSN 0946-7076.
- SCHÜTZER, K.; HELLENO, A. Importância do recurso de associatividade entre os sistemas de cad/cam na geração do programa nc. **O Mundo da Usinagem, São Paulo**, p. 27–32, 2005.
- SHMUEL, G. **First commercial solution for Micro-Milling**. 2005. Disponível em: <<http://www.cimatron.com/Main/homepagegroup-68-2150-EN-2.html?FolderID=68docID=2150lang=EN>>. Acesso em: 20-08-2017.
- SIMONEAU, A.; NG, E.; ELBESTAWI, M. A. The effect of microstructure on chip formation and surface defects in microscale, mesoscale, and macroscale cutting of steel. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 55, n. 1, p. 97–102, 2006. ISSN 00078506.
- SIMONEAU, A.; NG, E.; ELBESTAWI, M. A. Grain size and orientation effects when microcutting AISI 1045 steel. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 56, n. 1, p. 57–60, 2007. ISSN 17260604.
- SMID, P. **CNC programming handbook: a comprehensive guide to practical CNC programming**. [S.l.]: Industrial Press Inc., 2007.
- SOLIDWORKS. Documento Técnico, **Integração CAD/CAM: Aprimore significativamente seu processo de desenvolvimento de produto**. 2013. Disponível em:

<<http://www.solidworksbrasil.com.br/sw/docs/WPSWCADCAMIntegrationPTB.pdf>>. Acesso em: 03-11-2017.

SOUZA, A. F.; ULBRICH, C. Engenharia integrada por computador e sistemas cad. **CAM/CNC**, 2013.

SOUZA, G. O. **Avaliação da Aplicação do Fresamento em 5 Eixos a Conjuntos de Superfícies Complexas**. 218 p. Tese (Doutorado) — Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2011.

SPECK, H. J. et al. Proposta de método para facilitar a mudança das técnicas de projetos: da prancheta à modelagem sólida (cad) para empresas de engenharia de pequeno e médio porte. Florianópolis, SC, 2005.

SRIDHARAN, H. Articles White-Papers, **New Opportunities for Mold Shops with Micro Molds**. 2005. Disponível em: <<http://www.cimatron.com/Main/article-72-3143-en.html?FolderID=72docID=3143lang=en>>. Acesso em: 23-07-2017.

SRIDHARAN, H. Mold Making Technology, **Micro-Milling Opportunities and Challenges**. 2010. Disponível em: <<https://www.moldmakingtechnology.com/articles/micro-milling-opportunities-and-challenges>>. Acesso em: 07-11-2017.

SUTHERLAND, I. E. Sketch pad a man-machine graphical communication system. In: ACM. **Proceedings of the SHARE design automation workshop**. [S.l.], 1964. p. 6–329.

THEPSONTHI, T.; ÖZEL, T. An integrated toolpath and process parameter optimization for high-performance micro-milling process of Ti6Al4V titanium alloy. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 75, n. 1-4, p. 57–75, 2014. ISSN 14333015.

UHLMANN E.; ROEDER, M. R. S. Cutting of titanium matrix composite using statistical design of experiments. **CIRP General Assembly**, Budapest, p. 21–27, 2011.

URIARTE, L. et al. Comparison between microfabrication technologies for metal tooling. **Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part C: Journal of mechanical engineering science**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 220, n. 11, p. 1665–1676, 2006.

VÁZQUEZ, E. et al. Process planning considerations for micromilling of mould cavities used in ultrasonic moulding technology. **Precision Engineering**, Elsevier, v. 39, p. 252–260, 2015.

VOGLER, M. P.; DEVOR, R. E.; KAPOOR, S. G. Microstructure-Level Force Prediction Model for Micro-milling of Multi-Phase Materials. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 125, n. 2, p. 202, 2003. ISSN 10871357.

WARFIELD, B. **Enjoy CNC Micromachining Micro-Cutter Success: Easy Guide**. 2017? Disponível em: <<http://s3.cnccookbook.com/CCNCMillFeedsSpeedsMicroMachining.htm>>. Acesso em: 23-07-2017.

WARFIELD, B. **Results of the 2016 CNCCookbook**. 2017. Disponível em: <<http://blog.cnccookbook.com/2017/01/03/results-2016-cnccookbook-cam-survey>>. Acesso em: 23-07-2017.

WU, X.; LI, L.; HE, N. Investigation on the burr formation mechanism in micro cutting. **Precision Engineering**, Elsevier Inc., v. 47, p. 191–196, 2017. ISSN 01416359.

YUN, H. T. et al. Ploughing detection in micromilling processes using the cutting force signal. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 51, n. 5, p. 377–382, 2011. ISSN 08906955.

*ESTUDO DOS IMPACTOS DA TOLERÂNCIA CAM E DA RESOLUÇÃO DE
PROGRAMAS CN SOBRE A PRECISÃO DE TRAJETÓRIAS DE FERRAMENTA
PARA MICROFRESAMENTO*

Marcus Vinícius Pascoal Ramos

Salvador, 4 de abril de 2019.