



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
ESCOLA POLITÉCNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

**ORLANDO VICENTE DE OLIVEIRA FILHO**

**ANÁLISE HOLÍSTICA PARA LEVANTAMENTO DE ERROS  
NO FRESAMENTO DE SUPERFÍCIES DE FORMA LIVRE**

Salvador  
2013

**ORLANDO VICENTE DE OLIVEIRA FILHO**

**ANÁLISE HOLÍSTICA PARA LEVANTAMENTO DE ERRO  
NO FRESAMENTO DE SUPERFÍCIES DE FORMA LIVRE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Mecatrônica da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, como requisito para a obtenção do título de mestre em Engenharia Mecatrônica.

**Orientador:** Prof. Dr. Herman Augusto Lepikson

SALVADOR  
2013

---

O48 Oliveira Filho, Orlando Vicente de.  
Análise holística para levantamento de erro no  
fresamento de superfícies de forma livre / Orlando Vicente de  
Oliveira Filho. – Salvador, 2013.

132 f.: il. color.

Orientador: Prof. Dr. Herman Augusto Lepikson.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia.  
Escola Politécnica, 2013.

1. Usinagem. 2. Erro - mapeamento. 3. Superfícies  
complexas. I. Lepikson, Herman Augusto. II. Universidade  
Federal da Bahia. III. Título.

CDD: 671.3

---

## RESUMO

A obtenção de superfícies de forma livre a partir de usinagem por centros de usinagem de 5 eixos leva à necessidade constante de avaliação e controle das diversas fontes de erros presentes neste tipo de processo. Uma avaliação holística de como tais fontes de erros interagem entre si é importante para que seja possível avaliar como a geometria da peça final produzida por esse tipo de equipamento se afastou do que foi projetado no modelo inicial. Conhecer a contribuição de cada fonte de erro para o resultado final é importante para se poder analisar e controlar esse distanciamento de forma a manter todo o processo dentro de limites de tolerâncias e aceitabilidade. A análise das fontes de erros de forma direta, seja pela sua medição, pela modelagem matemática e física de seus efeitos ou por análises e medições indiretas servem para avaliar, de forma combinada, os efeitos dessas fontes de erros no momento em que atuam em partes específicas do processo. Este trabalho tem como objetivo geral estudar as fontes de erros existentes em processos de produção de superfícies de forma livre por meio de centros de usinagem de 5 eixos, bem como propor um método de avaliação indireta dos efeitos que tais fontes de erros têm sobre a peça usinada. Para tanto, foi realizado um mapeamento dos efeitos das fontes de erros em toda a cadeia de usinagem e, ao final, uma rotina foi desenvolvida para comparar o modelo CAD com a saída das diversas etapas do processo de usinagem, a fim de identificar como as fontes de erros presentes em tais etapas contribuíram para criação das diferenças entre a forma do produto final e o que foi estabelecido como ideal no modelo CAD. Os resultados demonstram o crescimento do erro ao final de cada etapa e que, as etapas relacionadas aos movimentos e operações físicas do próprio Centro de Usinagem possuem maiores influências das fontes de erros, embora tenha se confirmado a interdependência entre as fases de definição de estratégias e de execução do trabalho no tocante à criação e combinação dos erros.

**Palavras-chave:** Mapeamento de Erros, Centros de Usinagem, Fresamento em 5 Eixos, Superfícies Complexas, Incertezas.

## ABSTRACT

The manufacturing of freeform surfaces using 5-axis machining leads to constant need for evaluation and control the various error sources present in this kind of process. In light of that, a holistic assessment of how these errors sources interact with each other aim to distance of the final workpiece geometry, which was designed in the initial model is a way to analyze and control this distance so to maintain the process within the limits of acceptability and tolerance. The analysis of the sources of errors directly, either by their empirical survey or by mathematical modeling and physical effects, serves as a support in the evaluation of the comprehensive and complete, which analyzes and indirect measurements are used to assess, on a combined basis, the effects of these sources of error when working on specific parts of the process. This work has as main objective to provide a study of the sources of errors existing in the process of machining free surfaces through 5-axis machine tool, and create a method of indirect assessment of the effects that such sources of errors have on the piece machined. Therefore, a mapping of the effects of the sources of errors on the machining process throughout the chain machining was conducted, where, at the end, a routine was developed to assess the gap between the workpiece and the nominal model that the sources of errors present at each step in the process was inserted. The results demonstrate the growth of the error at the end of each step and the steps related to the movements and operations of their own physical machine tools have major influences of the sources of errors, although he confirmed the interdependence between phases defining strategies and execution of the work regarding the creation and combination of errors.

**Key words:** Error mapping, machine tools, machining chain, freeform surfaces, uncertainty

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 1: RELAÇÃO ENTRE SOBREMATERIAL E INTERFERÊNCIA (WARKENTIN, 1998)                                                                 | 20 |
| FIGURA 2: ZONA DE CONFORMIDADE (ISO/TS 14253-1:, 1998)                                                                                  | 21 |
| FIGURA 3: EXEMPLO DE VÁRIAS TOLERÂNCIAS NA CADEIA DE PRODUÇÃO                                                                           | 22 |
| FIGURA 4: REPRESENTAÇÃO E TOLERÂNCIA EM SUPERFÍCIE DE FORMA LIVRE                                                                       | 23 |
| FIGURA 5: AJUSTE DE UMA CURVA DE FORMA LIVRE A UMA ENTRADA POR NUVEM DE PONTOS                                                          | 24 |
| FIGURA 6: LOCALIZAÇÃO E POSICIONAMENTO DE DESVIOS GEOMÉTRICOS (CAO <i>ET AL.</i> , 2010)                                                | 26 |
| FIGURA 7: RELAÇÃO TOLERÂNCIA E DIMENSÃO DAS PEÇAS (SAVIO; DE CHIFFRE; SCHMITT, 2007)                                                    | 26 |
| FIGURA 8: REGRA DA MÃO DIREITA(WALSH, 2001)                                                                                             | 32 |
| FIGURA 9: REPRESENTAÇÃO PARAMÉTRICA(SOUZA, 2011)                                                                                        | 36 |
| FIGURA 10: A IMPORTÂNCIA DA TOPOLOGIA (HORMANN, 2000)                                                                                   | 37 |
| FIGURA 11: REPRESENTAÇÕES PARAMÉTRICAS DE SUPERFÍCIE E CURVA (RADZEVICH, 2008)                                                          | 38 |
| FIGURA 12:LEVANTAMENTO BÁSICO DAS FONTES DE ERROS NA CADEIA CAM-MMC                                                                     | 40 |
| FIGURA 13: EXEMPLO DE COMPENSAÇÃO DE CURVA                                                                                              | 41 |
| FIGURA 14: FONTES DE ERROS DA ETAPA CAD-CAM                                                                                             | 42 |
| FIGURA 15: RELAÇÃO DE INTERFERÊNCIA E COLISÃO (ADAPTADO (LASEMI; XUE; GU, 2010))                                                        | 48 |
| FIGURA 16: REPRESENTAÇÃO DOS MÉTODOS ZIG, ZIG-ZAG OU ESPIRAL (SOUZA, 2011)                                                              | 50 |
| FIGURA 17: TRAJETÓRIA DA FERRAMENTA <i>SPACE FILLING</i> (CHOI, 2004)                                                                   | 52 |
| FIGURA 18: ÂNGULOS B E A DEFINIDOS NO MÉTODO DE STURZ (SOUZA, 2006)                                                                     | 53 |
| FIGURA 19: MÉTODO STURZ (BOZ; ERDIM; LAZOGLU, 2011)                                                                                     | 54 |
| FIGURA 20: SUPERFÍCIES REGRADAS (ADAPTADO DE HARIK; GONG; BERNARD, 2013)                                                                | 56 |
| FIGURA 21: TIPOS BÁSICOS DE FERRAMENTA DE TOPO (WARKENTIN, 1998)                                                                        | 57 |
| FIGURA 22: DESGASTE DE FLANCO E DESGASTE DE CRATERA (ADAPTADO DE GROOVER, 2010)                                                         | 59 |
| FIGURA 23: RELAÇÃO DO ERRO E FLEXÃO DA FERRAMENTA (LOPEZ DE LACALLE <i>ET AL.</i> , 2004)                                               | 61 |
| FIGURA 24: RELAÇÃO DAS FONTES DE ERROS DO CONTROLE CNC                                                                                  | 65 |
| FIGURA 25: TIPOS DE CONTROLE CNC (ADAPTADO SOUSA, 2000)                                                                                 | 67 |
| FIGURA 26: DESCRIÇÃO DO CONTROLE A PARTIR DA DESCRIÇÃO <i>DESOFTARE</i> E <i>HARDWARE</i> (ADAPTADO DE SUH, S.-H. <i>ET AL.</i> , 2008) | 68 |
| FIGURA 27:COMPARAÇÃO ENTRE UM PROGRAMA G-CODE E UM STEP NC (SUH, S.-H. <i>ET AL.</i> , 2008)                                            | 74 |
| FIGURA 28: ORÇAMENTO DE ERROS DA TRANSIÇÃO CNC-CENTRO DE USINAGEM                                                                       | 75 |
| FIGURA 29: REPRESENTAÇÃO DO PLANO DE CISALHAMENTO ADAPTADO DE (FERRARESI, 1977)                                                         | 79 |
| FIGURA 30: DIFERENÇA ENTRE CORTE ORTOGONAL E OBLÍQUO (CARDOSO, 2012 APUD FERRARESI, 1977)                                               | 79 |
| FIGURA 31: DISPOSIÇÃO DOS EIXOS NAS MÁQUINAS (SOLIDWORKS, 2008)                                                                         | 82 |
| FIGURA 32: EXEMPLO DE MÁQUINA CORRIGIR A REFERÊNCIA E TROCAS AS FIGURASTIPO PORTAL (MIRALLES, 2009)                                     | 83 |
| FIGURA 33: EXEMPLOS DE MÁQUINAS RFTTTR CORRIGIR AS REFERÊNCIAS (GROOVER, 2010)                                                          | 84 |
| FIGURA 34: ORÇAMENTO DE ERROS QUASE ESTÁTICOS                                                                                           | 84 |

|                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| FIGURA 35: RELAÇÃO DOS ERROS GEOMÉTRICOS ( SOUSA, 2000)                                       | 87  |
| FIGURA 36: ORÇAMENTO DE ERROS DINÂMICOS                                                       | 88  |
| FIGURA 37: PEÇA DE TRABALHO UTILIZADA COMO OBJETO DE ESTUDO (PAPA, 2012)                      | 99  |
| FIGURA 38: ERRO DE INTERPOLAÇÃO DO AVANÇO EM 2500 MM/MIN (A LINHEAR, B NURBS 5C E C NURBS 5M) | 103 |
| FIGURA 39: CRESCIMENTO DO ERRO CAM – CENTROS DE USINAGEM (INTERPOLAÇÃO LINEAR)                | 104 |
| FIGURA 40: CRESCIMENTO DO ERRO CAM – CENTROS DE USINAGEM (INTERPOLAÇÃO NURBS 5C)              | 105 |
| FIGURA 41: CRESCIMENTO DO ERRO CAM – CENTROS DE USINAGEM (INTERPOLAÇÃO NURBS 5M)              | 106 |
| FIGURA 42: ERROS MEDIDOS PELA MMC                                                             | 107 |

**LISTA DE TABELAS**

|                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| TABELA 1: CLASSES DE INVARIÂNCIA (ALMACINHA, 2005)                                                                    | 33  |
| TABELA 2: RECURSOS GEOMÉTRICOS CONTIDOS NAS INTERFACES NORMALIZADAS (MIRALLES, 2009)                                  | 46  |
| TABELA 3: SEQUÊNCIA CNC (SUH, S.-H. <i>ET AL.</i> , 2008)                                                             | 69  |
| TABELA 4: RELAÇÃO DOS 42 ERROS GEOMÉTRICOS DE UM CENTRO DE USINAGEM DE 5 EIXOS ( <i>ABBASZADEH-MIR ET AL.</i> , 2002) | 86  |
| TABELA 5: RESUMO DO ORÇAMENTO TOTAL DE ERROS                                                                          | 96  |
| TABELA 6: RELAÇÃO DE PONTOS COM ERROS PARA A INTERPOLAÇÃO LINEAR, NURBS 5C E NURBS 5M                                 | 103 |



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

|         |                                                                                                                |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ABIMAQ  | Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos                                                  |
| $A_c$   | Largura de Corte                                                                                               |
| AIM     | <i>Arc intersect method</i>                                                                                    |
| APT     | <i>Automatically Programed Tooling</i>                                                                         |
| CAD     | <i>Computer Aided Design</i>                                                                                   |
| CAI     | <i>Computer Aided Inspection</i>                                                                               |
| CAM     | <i>Compter Aided Manufactruing</i>                                                                             |
| CAT     | <i>Computer Aided Tolerance</i>                                                                                |
| CGH     | <i>Computer Generated Holograms</i>                                                                            |
| CHM     | Controlador Homem Máquina                                                                                      |
| Cldata  | Cutter Location Data                                                                                           |
| CLP     | Computador Lógico Programado                                                                                   |
| CNC     | Controle Numérico Computadorizado                                                                              |
| $D_i$   | Diâmetro interno da ferramenta de corte                                                                        |
| DRV     | Driver                                                                                                         |
| F       | Força                                                                                                          |
| $F_c$   | Força de corte                                                                                                 |
| F-CODE  | Código CNC de tipo F                                                                                           |
| $F_N$   | Força normal                                                                                                   |
| $F_s$   | Força de cisalhamento                                                                                          |
| $F_T$   | Força normal à força de cisalhamento                                                                           |
| G-CODE  | Código CNC do tipo G, o qual também se refere à própria linguagem de programação padronizada para máquinas CNC |
| GPS     | <i>Geometrical Product Specification</i>                                                                       |
| GUM     | <i>Guide of Uncertainty Measurements</i>                                                                       |
| HTM     | <i>Homogeneous Transformation Matrices</i>                                                                     |
| IGES    | <i>Initial Graphics Exchange Specification</i>                                                                 |
| IHM     | Interface Homem Máquina                                                                                        |
| LOD     | <i>Level of Details</i>                                                                                        |
| min     | Minutos                                                                                                        |
| MIT     | <i>Massachusetts Institute of Technology</i>                                                                   |
| mm      | Milímetro                                                                                                      |
| MMC     | Máquina de Medir por Coordenadas                                                                               |
| MMQ     | Método dos Mínimos Quadrados                                                                                   |
| MPM     | <i>Multipoint Machining</i>                                                                                    |
| NC-DATA | <i>Numerically Controled Data</i>                                                                              |
| NCN     | Núcleo de Controle Numérico                                                                                    |
| NURBS   | <i>Non Uniform Rational B-Spline</i>                                                                           |
| PAM     | Principal Axis Method                                                                                          |
| RBM     | Rolling Ball Method                                                                                            |
| S-CODE  | Código CNC do tipo S                                                                                           |
| STEP    | Padrão neutro de troca de informação CAD - CAM                                                                 |
| STL     | <i>Lithography Tesselation Language</i>                                                                        |

|                |                                                |
|----------------|------------------------------------------------|
| T <sub>c</sub> | Cavaco deformado                               |
| T-CODE         | Código NC do tipo T                            |
| TCP            | <i>Tool Center Point</i>                       |
| T <sub>o</sub> | Cavaco não deformado                           |
| TMP            | Tempo médio de processamento                   |
| V <sub>c</sub> | Velocidade de corte                            |
| VDAFS          | Padrão neutro de troca de informação CAD - CAM |
| VDOF           | <i>Virtual Degrees of Freedom</i>              |
| V <sub>f</sub> | Velocidade de avanço da mesa                   |

## SUMÁRIO

|        |                                                                               |     |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1.     | INTRODUÇÃO                                                                    | 12  |
| 2.     | ESTADO DA ARTE                                                                | 19  |
| 2.1.   | O erro e a incerteza de medição                                               | 19  |
| 2.1.1. | Análise da tolerância                                                         | 21  |
| 2.1.2. | Cálculo da incerteza de medição                                               | 27  |
| 2.2.   | Topologia de superfícies de forma livre                                       | 30  |
| 2.2.1. | Caracterização de uma superfície de forma livre                               | 31  |
| 2.2.2. | Representações matemáticas de superfícies de forma livre                      | 33  |
| 2.2.3. | Metrologia de superfície de forma livre                                       | 39  |
| 2.3.   | Definição de estratégias de fresamento e geração de trajetória                | 41  |
| 2.3.1. | Definição da operação a ser executada                                         | 42  |
| 2.3.2. | Captação da geometria a ser usinada                                           | 43  |
| 2.3.3. | Trajetória de ferramenta                                                      | 46  |
| 2.3.4. | Definição da ferramenta de corte                                              | 56  |
| 2.3.5. | Simulação da Usinagem                                                         | 63  |
| 2.3.6. | O Arquivo CL-Data                                                             | 63  |
| 2.4.   | O Controle CNC                                                                | 64  |
| 2.4.1. | Pós Processamento                                                             | 69  |
| 2.4.2. | O arquivo G-code                                                              | 71  |
| 2.5.   | Usinagem com Centros de Usinagem                                              | 74  |
| 2.5.1. | O Corte                                                                       | 75  |
| 2.5.2. | Caracterização de Centros de Usinagem                                         | 80  |
| 2.5.3. | Erros Quase – Estáticos                                                       | 84  |
| 2.5.4. | Erros dinâmicos                                                               | 87  |
| 2.6.   | Medição por coordenadas                                                       | 89  |
| 2.7.   | Calibração e compensações de Centro de Usinagem, medições diretas e indiretas | 92  |
| 3.     | ORÇAMENTO GERAL DE ERROS EM PROCESSOS DE USINAGEM                             | 94  |
| 3.1.   | Orçamento geral de erros                                                      | 95  |
| 4.     | ANÁLISE DE ERROS NA FABRICAÇÃO DE SUPERFÍCIE COMPLEXA                         | 99  |
| 4.1.   | Avaliação quanto ao método de interpolação                                    | 101 |

|        |                                                                                |     |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2.   | Avaliação quanto às diversas saídas da cadeia CAM- Centros de Usinagem         | 102 |
| 4.2.1. | Erros entre as etapas CAM- Centros de Usinagem a partir da interpolação Linear | 103 |
| 4.2.2. | Erros entre as etapas CAM- Centros de Usinagem com interpolação NURBS 5C       | 103 |
| 4.2.3. | Erros entre as etapas CAM- Centros de Usinagem com interpolação NURBS 5M       | 105 |
| 4.2.4. | Erros obtidos partir da MMC                                                    | 106 |
| 4.2.5. | Síntese de resultados                                                          | 107 |
| 5.     | CONCLUSÃO                                                                      | 109 |
| 6.     | REFERÊNCIAS                                                                    | 111 |
| I.     | ANEXO A - MÉTODO DE AJUSTE E AVALIAÇÃO DAS CURVAS MEDIDAS                      | 123 |

## 1. INTRODUÇÃO

Tradicionalmente a maioria dos produtos industriais é formada a partir de geometrias simples como planos, esferas e cilindros. Porém, a demanda por novos e mais instigantes desenhos de produtos, a disponibilidade de novas tecnologias de projeto e fabricação e a crescente sofisticação dos mercados promoveram um crescimento na utilização de produtos utilizando formas geométricas que não se assemelham às convencionais e regulares. Tais produtos, cujas geometrias complexas normalmente são denominadas superfícies de forma livre, são caracterizados por possuírem curvaturas ou padrões de acabamento superficial que representam uma maior dificuldade de manufatura do que quando trabalhadas por geometrias regulares. O crescimento da utilização de tais superfícies na indústria se justifica pela necessidade de agregar funcionalidades ou características estéticas, bem como melhorar o processo de manufatura de uma forma geral com o intuito final de atender às demandas de mercado (RUFENG *et al.*, 2010; YU *et al.*, 1996).

A necessidade de ciclos de produção mais curtos, produção de uma maior diversidade de produtos juntamente com lotes menores, redução de tempo de lançamento de novos produtos, diminuição gradativa dos custos de produção e a grande competitividade industrial dos dias atuais são alguns fatores que levam a indústria de manufatura a buscar melhorarias para os processos de produção, bem como desenvolver tecnologias avançadas de manufatura capazes de constante adaptação, reajustes e grande flexibilidade (HELLENO; SCHÜTZER, 2004; RAJA; MURALIKRISHNAN; FU, 2002; SCHWENKE *et al.*, 2008).

A garantia de qualidade das superfícies de forma livre representa um crescente desafio para a indústria de manufatura, pois, ao contrário das superfícies de forma simples, que podem ser avaliadas em termos de planeza, cilindricidade, paralelismo etc., as superfícies de forma livre devem ser inspecionadas por comparação com o seu modelo tridimensional juntamente com as variações permitidas e intrínsecas ao processo de produção. Este tipo de inspeção normalmente é dependente da experiência do operador, o qual se utiliza de equipamentos e métodos de medição que quase sempre alteram o padrão de referência de localização e posicionamento entre o medido e o projeto a ser comparado. Isto torna fácil a percepção de que fatores como eficácia e custo de medição são de difícil estimativa, ao passo que a precisão desejada no ato de medir pode não ser alcançada.

Termos como erro de localização e posicionamento são comuns quando se trata da dificuldade de se avaliar e caracterizar as superfícies de forma livre no tocante à exatidão geométrica. Do ponto de vista metrológico, tais termos se referem à capacidade de estabelecer

o posicionamento e a orientação geométrica de um produto medido em relação a um modelo pré-estabelecido, a fim de localizar um determinado ponto sobre a superfície do projeto ideal e prever, na superfície do projeto executado, onde o ponto relativo a esse deveria estar (CAO *et al.*, 2010; POLINI, 2011; RADZEVICH, 2002).

Outra característica que classifica uma superfície de forma livre é não ser necessariamente simétrica em relação a nenhum eixo (radial ou axial) (RADZEVICH, 2008). Tal condição torna a necessidade de garantia de uma exatidão geométrica do produto um fator importante, e até mesmo crítico, na modelagem e fabricação deste tipo de geometria. Para tanto, as propriedades matemáticas para a representação deste tipo de objeto depende do contexto da aplicação em que se deseja atribuir à superfície, pois suas representações matemáticas podem ser ineficientes ou desperdiçarem recursos de modelagem matemática capazes de tornar uma representação computacional inviável. A este paradigma Campbell e Flynn (2001) denominaram como modelo de representação completo *versus* discriminatório, onde quanto mais completo o modelo maior o consumo de recurso computacional e quanto mais discriminatório maior a omissão de características inerentes à superfície a ser representada. Assim, para se executar o fresamento de superfícies de forma livre a partir de centros de usinagem, a representação analítica (formal) da superfície se torna um requisito importante.

Centros de Usinagem em 5 eixos têm sido utilizadas cada vez mais extensivamente na indústria de moldes e matrizes bem como em processos de fresamento de peças que possuem superfície de forma livre. Tais equipamentos são capazes de produzir peças mais rapidamente e com melhor qualidade final que os centros de usinagem em 3 eixos (WARKENTIN, 1998). Os Centros de Usinagem em 5 eixos têm sido importantes aliados dos meios de produção modernos, onde a sua capacidade de exatidão e precisão volumétricas permite uma melhor adequação às novas necessidades da indústria (SCHWENKE *et al.*, 2008; TUTUNEA-FATAN; BHUIYA, 2011).

Esses equipamentos representam uma classe particular de Centros de Usinagem, os quais são capazes de trabalhar em todos os 6 graus de liberdade de um corpo no espaço, pela interação de seus 5 eixos permitindo assim, ainda que teoricamente, a realização de todas as características da peça sem a necessidade de reajustes de fixação ou qualquer outra modificação da mesma na mesa de trabalho. Fator que diminui a necessidade de operações manuais de finalização, e que pode melhorar a produtividade da operação de fresamento bem como diminuir o tempo de usinagem em até 75% (BOHEZ, 2002a; TUTUNEA-FATAN; BHUIYA, 2011).

O mesmo fator que agrega versatilidade e flexibilidade aos centros de usinagem em 5 eixos também agrega fontes de erros que interferem em sua movimentação fazendo-as produzir peças diferentes do que foi projetado. Isto ocorre porque esse tipo de equipamento tem na adição de dois eixos de rotação um expressivo aumento das fontes de erros quando comparadas aos centros de usinagem em 3 eixos que, por sua vez, são mais rígidos (WARKENTIN; ISMAIL; BEDI, 1998). Tais fontes de erros, devido à sua capacidade de distanciar a geometria do produto realizado do que foi projetado, têm relação direta com os custos gerais de usinagem e influenciam a qualidade da peça usinada por Centros de Usinagem de 5 ou de 3 eixos. Desta forma, um projeto de usinagem de um determinado produto a partir de tais máquinas, deve ser executado com o devido suporte de técnicas de controle e medições constantes e sistemáticas, a fim de se garantir um processo de produção dentro de uma tolerância especificada (JUNG; CHOI; LEE, 2006).

Tolerância é o termo que define distanciamento aceitável de dimensão, ângulo ou forma de uma determinada peça. Esse distanciamento representa quão diferente uma peça pode estar de um modelo pré-estabelecido sem que seja considerada inadequada. Isto significa que, embora uma peça possa estar diferente do que foi proposto na concepção do projeto, esta será considerada aceitável se o distanciamento entre as geometrias estiver dentro de uma faixa prevista, ou seja, num intervalo de valor que uma determinada dimensão geométrica pode assumir sem que seja considerada fora de conformidade (FENG, S. C.; YANG, 1995).

Uma superfície cuja dimensão assuma qualquer valor compreendido entre a maior e menor dimensão admissível, também conhecida como dimensão máxima e mínima, está dentro da faixa de tolerância e deve ser considerada correta independente de seu valor (FENG, Y., 2004; JANEIRO, 1995; LI, Y.; GU, 2004). Desta forma, a qualidade geométrica de um determinado produto tem relação direta com os parâmetros de tolerância definidos no seu projeto de fabricação, desta forma, peças produzidas dentro de uma menor tolerância possuem uma menor possibilidade de distanciamento de sua forma, em relação ao modelo ideal, que outra peça de mesma forma, porém produzidas dentro de uma faixa de uma maior tolerância. Este conceito tem impacto direto no custo de produção e a definição de uma tolerância deve ser do tamanho exato capaz de aliar o menor custo de produção com a maior qualidade que se deseja dar ao produto.

Sem o conceito de tolerância, a manufatura de superfícies, complexas ou regulares, seria inalcançável, pois as diversas fontes de incertezas presentes tanto nas etapas do processo de produção quanto nas medições e análises devem ser levadas em consideração. Isto quer dizer que tanto é impossível reproduzir uma peça idêntica a um projeto qualquer quanto é

impossível garantir que uma medição expresse fidedignamente o valor do mensurando. Desta forma, o estudo sistemático das fontes de erros bem como das suas relações com todo o ambiente de trabalho leva ao desenvolvimento de técnicas e artefatos capazes de eliminar ou diminuir as influências dos erros sistemáticos, que definem a exatidão, além de ajudar a elaborar meios de prever, compensar e minimizar os erros aleatórios ou não elimináveis, que definem a precisão (DORNFELD; LEE, 2008).

Aliando esses estudos a conceitos predefinidos de metrologia industrial, um conjunto de opções pode ser criado a fim de auxiliar o processo de tomada de decisões e minimizar os riscos chegando a eliminar os possíveis problemas que podem ocorrer no processo de usinagem. Assim, no presente trabalho o termo risco é entendido como a possibilidade de um evento indesejado e prejudicial ocorrer no momento da usinagem e que seja capaz de colaborar para o distanciamento entre a geometria usinada e o modelo proposto na concepção do projeto (SMITH; EL-SHAARAWI; PIEGORSCH, 2002).

Embora o risco represente a possibilidade de ocorrência de um evento indesejado, não é possível prever fidedignamente todos os eventos indesejáveis e corrigi-los antes de sua ocorrência. Isto significa que tanto a quantidade de fontes de erros e suas interações podem crescer exponencialmente como a ocorrência dos eventos desencadeantes de tais erros pode ter um caráter aleatório (DORNFELD; LEE, 2008; SARTORI; ZHANG, 1995; SOURLIER, 1995). Com o intuito de diminuir o caráter aleatório e a capacidade de combinação das diversas fontes de erros, medições sistemáticas devem ser executadas em diversas fases do processo de produção a fim de corrigir ou compensar uma fonte de erro tão logo esta seja detectada. A metrologia industrial é constantemente utilizada para este fim (ABBASZADEH-MIR; MAYER; FORTIN, 2003; SHEN *et al.*, 2012).

O termo holístico, utilizado no presente trabalho, tem como significado principal a reunião das partes para se alcançar o todo, onde se pressupõe que a soma ou a diferença de todas as partes possa ser utilizada para se obter uma análise total do processo. Com o intuito de qualificar corretamente o conceito holístico no que diz respeito à geração de erros presente neste documento, o processo de produção de superfícies de forma livre por Centros de Usinagem em 3 ou 5 eixos pode ser dividido em dois grandes grupos de ações: as que determinam a criação do arquivo de programa de Comando Numérico a ser interpretado pelo Controle Numérico Computadorizado (CNC), que se inicia na etapa do design auxiliado por computador (CAD – *Computer Aided Design*), passa pela etapa de manufatura auxiliada pelo computador (CAM – *Computer Aided Manufacturing*), também denominado ciclo CAD-CAM-CNC, que contém todo o conceito lógico a ser seguido pela ferramenta de corte, e o



processo de fresamento por meio do centro de usinagem de 3 ou 5 eixos, quando haverá o contato entre a fresa e a peça bruta que gerará a superfície a ser produzida, e onde serão avaliados os comportamentos dinâmicos da máquina juntamente com as características gerais da usinagem.

O passo inicial de uma comparação holística é entender toda a cadeia de usinagem, identificar suas principais fontes de erros e avaliar as influências de tais fontes de erros na geometria final da peça usinada, uma vez que esta irá reunir todas as influências de todas as partes do processo global de geração de uma superfície. A partir do modelo do CAD, tido aqui como ideal e sem fontes de erros, até o passo final de medições após as ações do Centro de Usinagem se faz necessário avaliar como os erros ocorrem e quais as suas principais causas, ou seja, as fontes de erros.

Considerando-se o cenário descrito no decorrer deste capítulo, bem como a complexidade de se estabelecer parâmetros capazes de descrever e avaliar fidedignamente uma superfície de forma livre, este trabalho tem como objetivo principal estudar as fontes de erros existentes em processos de produção de tais superfícies, e propor um método de avaliação indireta dos efeitos que essas fontes de erros têm sobre a peça usinada.

Para facilitar a separação e o entendimento das diversas fontes de erros, tanto o ato de gerar o arquivo a ser interpretado pelo Comando Numérico, quanto o ato de executar o fresamento pelo Centro de Usinagem, foram divididos em quatro etapas, desta forma, os efeitos das fontes de erros serão avaliados nas transições entre uma etapa e outra, se iniciando na transição CAD-CAM e terminando na etapa de medição por meio de Máquina de Medir por Coordenadas (MMC):

- As fontes de erros relativas à etapa de criação das estratégias de usinagem, a etapa CAD-CAM, cujos efeitos serão repassados para a etapa de Controle Numérico Computadorizado CNC, denominada por este trabalho como etapa CAM-CNC.
- As fontes de erros relativas à etapa CNC e que influenciam negativamente o centro de usinagem, denominado neste trabalho etapa CNC–Centro de Usinagem.
- As fontes de erros provenientes do centro de usinagem e que influenciam negativamente a produção da peça final, desviando a sua forma do que foi projetado nas etapas anteriores e que pode ser detectado pela MMC, que será tratado neste trabalho como etapa centro de usinagem - MMC.

- As fontes de erros inerentes ao próprio ato de medir e que poderá exibir como resultado final um valor medido diferente que o valor real existente na peça, ou seja, os erros da própria MMC.

De acordo com Mehrad, Xue e Gu (2013), a inspeção de superfícies de forma livre em qualquer etapa de medição ocorre em quatro passos que serão explicados futuramente:

- Aquisição de dados a serem inspecionados.
- Localização e alinhamento dos pontos medidos no sistema de coordenadas original.
- Reconstrução da superfície produzida.
- Comparação entre os dados medidos e reconstruídos e a superfície ideal e suas tolerâncias.

Por hora, cabe salientar que esses passos serão seguidos para cada avaliação de cada etapa da cadeia de produção, e a aquisição de dados considerada neste trabalho deverá, sempre que possível, obedecer às mesmas características para todas as entradas. Isso significa que independente da etapa de medição executada, CAM ou MMC, o formato dos dados, os eixos de medição e o número de pontos medidos devem ser os mesmos.

Desta forma o presente trabalho tem por objetivos secundários explicitar:

- O processo de criação de uma superfície de geometria livre a partir de centro de usinagem de 3 e 5 eixos a partir da inserção das estratégias de usinagem na etapa CAM até a medição da peça usinada por MMC;
- O processo de modelagem de superfícies de forma livre, e suas implicações nas incertezas de medição;
- O levantamento dos principais erros presentes no processo de usinagem de superfícies de forma livre;
- Uma forma de ajuste de uma curva de forma livre capaz de permitir uma comparação entre as curvas medidas e o projeto CAD, a partir da reconstrução das formas por funções paramétricas.

Para atender a esses objetivos, este trabalho está subdividido em 6 capítulos, onde o capítulo 2 trata do atual estado da arte do levantamento das fontes de erros e caracterização do processo de fabricação de superfícies de forma livre por meio de centros de usinagem de 3 e 5

eixos, a partir da caracterização, classificação, modelagem e avaliação destes tipos de superfície, bem como do levantamento das características gerais de usinagem partindo da fase de projeto até a medição do produto final.

O capítulo 3 propõe uma organização das fontes de erros levantadas no capítulo 2, definida neste trabalho como orçamento de erros, onde se pretende quantificar e separar as principais fontes de erros de acordo com o a sua origem. O capítulo 4 descreve, como proposta estabelecida neste trabalho, a criação de uma avaliação holística da produção de uma determinada peça de forma livre, a partir da avaliação dos erros aparentes na transição entre as diversas etapas do processo de produção, ou seja, a partir da avaliação das diversas entradas e saídas de cada etapa do processo de produção. Para isso foi desenvolvida uma aplicação prática de um conjunto de rotinas criadas neste trabalho para prover o mapeamento das principais fontes de erros descritos nas etapas que envolvem a utilização de centros de usinagem para produzir superfícies de forma livre. Tais rotinas podem ser verificadas no Anexo A. Por fim, o capítulo 6 descreve a conclusão de todo o trabalho a partir de uma síntese geral do que foi apresentado em todos os capítulos anteriores bem como as sugestões para trabalhos futuros.

## 2. ESTADO DA ARTE

Este capítulo trata do atual estado da arte no que tange os mapeamentos de erros e avaliação de incerteza em processos de fresamento por centros de usinagem de 3 e 5 eixos. Para alcançar este fim, inicialmente é feita uma caracterização dos erros e das incertezas de medição, bem como seus aspectos na metrologia industrial. O termo cadeia de produção se refere às etapas que devem ser percorridas entre a concepção do produto dentro de um modelo de projeto até o processo final de medição da peça finalizada. Cada etapa é responsável por coletar informações da etapa anterior, inserir informações inerentes às suas contribuições e entregar dados para a etapa seguinte, exceto a primeira, que se refere à definição da topologia de superfícies e a última fase da cadeia que se refere à inspeção do produto, a qual ocorre por meio, muitas vezes, de uma MMC.

### 2.1. O erro e a incerteza de medição

Um erro é a diferença entre um valor medido e o valor ideal de um determinado mensurando. A presença de um erro, ou desvio geométrico, significa que o processo de medição identificou que a geometria do produto medido diverge da geometria do produto nominal em valores fora de uma tolerância pré-estabelecida, ou seja, existem pontos com excesso de material, denominado sobrematerial, na geometria da peça final, ou existem pontos que houve uma retirada excessiva de material da peça usinada como demonstrado na Figura 1 (MIRALLES, 2009). A presença do desvio geométrico na medição significa que foi obtido um valor incorreto, independente da sua origem, sua magnitude é conhecida e deve ser corrigida ou descartada, pois fere o limite da tolerância e compromete a aceitabilidade do produto. O erro é um inimigo natural dos processos de engenharia de precisão e tem sua importância em uma proporção direta ao grau de exatidão que se deseja alcançar para uma determinada peça, desta forma, um erro não existe se sua quantificação for pequena o suficiente para que ele não possa ser medido ou se alcançar valores que estejam abaixo de um padrão de aceitabilidade pré-estabelecido (DORNFELD; LEE, 2008; SMITH; EL-SHAARAWI; PIEGORSCH, 2002). A Figura 1 mostra a diferença entre um erro de sobrematerial e um erro de retirada excessiva. Mais informações sobre as características de remoção excessiva e sobrematerial serão tratados ao decorrer do trabalho.

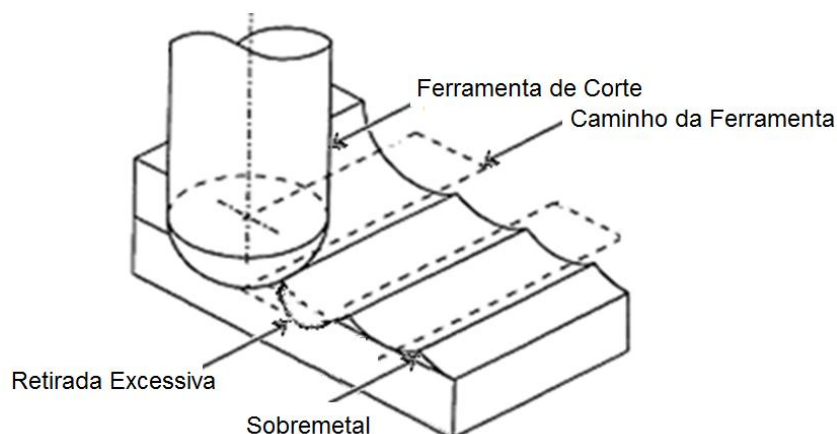


Figura 1: Relação entre sobrematerial e interferência (WARKENTIN, 1998)

O valor medido representa apenas o comportamento momentâneo do mensurando e possui uma variabilidade que se distribui ao longo de repetidas medições independentes. Esta variabilidade recebe o nome de incerteza de medição e está associada à dispersão dos valores encontrados em sucessivas medições, os quais podem ser razoavelmente associados ao mensurando (ALBERTAZZI, 2004; ISO/TS 14253-1:, 1998).

A incerteza está sempre associada a um determinado número de medições que quantifica a diferença entre o que foi medido e o valor esperado, e representa uma faixa de valores onde nada se pode dizer sobre o comportamento da medição além de seus limites máximos e mínimos admissíveis (SMITH; EL-SHAARAWI; PIEGORSCH, 2002). Isto significa que se um resultado de uma medição for  $Y$ , a esse valor deve ser associada uma grandeza que representa a incerteza dessa medição, ou seja, a influência de todos os fatores que não permitem garantir que o valor obtido na medição esteja 100% exato, porém, a sua maior variação deve ser controlada de forma a não comprometer a aceitabilidade da peça. Uma medição  $Y$  está associada a uma faixa de valores que devem variar entre  $Y + u$  e  $Y - u$ , onde  $u$  se refere a um valor numérico denominado incerteza de medição (BIPM, 2008).

A incerteza de medição tem como origem três fontes básicas: as variações intrínsecas ao mensurando, as variações relativas ao meio e as variações intrínsecas ao sistema de medição. Cada variação aparece no resultado sob dois aspectos básicos: variações aleatórias e variações sistemáticas (BIPM, 2008).

Enquanto as variações aleatórias estão associadas a fatores cuja ocorrência não pode ser prevista, as variações sistemáticas estão associadas a fatores que, embora não tenham todas as suas fontes de erros conhecidas, se repetem para todas as medições, e por esta razão podem ser compensadas. De forma conceitual e prática, toda variação de medição é sistemática e apenas possui sua verdadeira causa desconhecida, porém o caráter aleatório tem uma relação

inversa com o número de medições (DORNFELD; LEE, 2008). À medida que o número de medições se aproxima do infinito, os erros aleatórios se aproximam de zero (ALBERTAZZI, 2004). Também não se deve confundir esse conceito com a definição de tolerância, pois enquanto a tolerância representa os valores máximos e mínimos admissíveis para uma determinada grandeza, a incerteza de medição representa uma pequena faixa de valores onde nada pode se dizer sobre o valor medido. Normalmente as incertezas não são demonstradas em medições porque, de acordo com o Guia ISO elas devem ser no máximo 10% do valor de tolerância como demonstra a equação 01 e, salvo em processos de precisão, são consideradas muito pequenas (BIPM, 2008).

$$|IM| \leq IT/10 \quad (01)$$

### 2.1.1. Análise da tolerância

O controle geométrico é o conjunto de ações utilizadas para garantir posicionamento, forma e dimensão dos elementos sólidos. Este conjunto de procedimentos está intimamente ligado aos conceitos metrológicos utilizados para especificar um determinado corpo sólido no tocante às limitações de tolerância capazes de garantir a aceitabilidade deste corpo. Isto ocorre pelo conceito, já previamente descrito, de que o processo de fabricação não é capaz de manter a forma geométrica em relação ao modelo, nem manter um mesmo tipo de desvio para todas as peças produzidas. A norma ISO 14253, em sua parte 1, estabelece as regras de conformidade de peças e erros máximos permitidos para equipamentos. Nesta norma está estabelecido que um determinado valor só pode ser considerado aceitável se estiver dentro de um determinado intervalo de valores denominado zona de conformidade, e, como em todo o processo de medição, deve estar associado a uma incerteza, que neste caso é a incerteza expandida ( $U$ ) (DORNFELD; LEE, 2008). Entre a zona de conformidade e a zona de não conformidade existe uma pequena zona, referente à incerteza de medição, onde nada pode ser afirmado. A zona de conformidade pode ser especificada em um ou dois lados, como mostra a Figura 2 A e B respectivamente (ISO/TS 14253-1:, 1998).

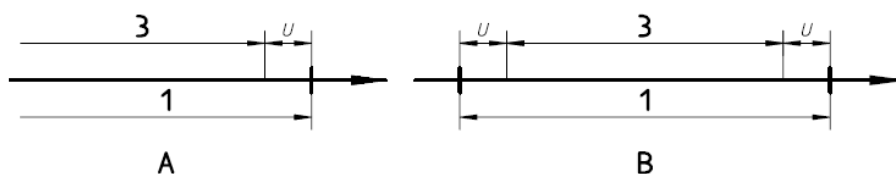


Figura 2: Zona de conformidade (ISO/TS 14253-1:, 1998)

A análise de tolerância tem um peso considerável em processos de engenharia por representar a melhor maneira de executar ajustes a fim de garantir qualidade do produto final. De fato a necessidade de assegurar tolerâncias geométricas e dimensionais existe devido a uma tendência de padronização de produtos aliado a boas práticas de produção, uma vez que o respeito às especificações de tolerância garante uma alta probabilidade de montagem de diferentes peças produzidas em diferentes estágios de fabricação, executados preferencialmente de forma concorrente, sem processos de retrabalhos ou índices de rejeição relevantes (NEJAD, 2009; POLINI, 2011).

A partir da utilização de técnicas computacionais para auxiliar a definição/verificação de tolerâncias em processos de manufaturas foi criado o termo especificação de tolerância assistida por computador (CAT, *Computer-Aided Tolerancing*) como o nome dado às ferramentas computacionais destinadas a modelar as definições de tolerância dentro do processo de manufatura, bem como gerenciar todas as etapas subsequentes à modelagem para garantir que os limites definidos pela tolerância não sejam ultrapassados. Basicamente um sistema CAT é composto de duas grandes áreas: uma destinada à análise do processo que significa gerenciar a tolerância acumulada, ou tolerância final, e outra destinada à síntese do processo que se refere ao gerenciamento das tolerâncias individuais por componente geométrico a partir de uma tolerância global (FENG, Y., 2004; SOUSA; WANDECK; SILVA, 2004).

No processo de análise toma-se como a tolerância máxima admitida a tolerância definida no modelo nominal, ou tolerância de projeto (LASEMI; XUE; GU, 2012). Todas as operações subsequentes não podem ultrapassar a tolerância de projeto, caso contrário existe o comprometimento da peça a ser usinada (Figura 3). A tolerância é expressa sempre por dois valores, um limite de tolerância superior e um limite de tolerância inferior, os quais representam o quanto de sobrematerial pode permanecer e o quanto de material pode ser retirado em um determinado ponto sem que o produto seja comprometido.

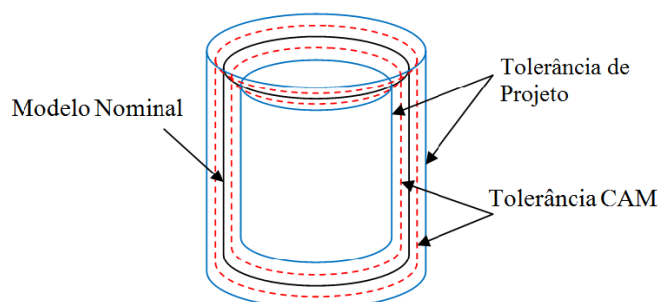


Figura 3: Exemplo de várias tolerâncias na cadeia de produção

O processo de síntese significa trabalhar com a contribuição da inserção de tolerância de cada modificação feita em cada etapa da cadeia de produção de forma a garantir que nenhuma etapa possa comprometer a produção por conta do rompimento da fronteira estabelecida na tolerância de projeto.

A modelagem de tolerância de superfícies de formas livres ocorre na forma de definição de tolerância de perfil. Isto significa que duas superfícies modeladas são projetadas acima e abaixo da superfície a ser produzida. A distância entre essas superfícies é dada por um valor escolhido pelo projetista o qual representará a tolerância estabelecida, ou seja, seus limites superior e inferior serão representados por esferas de diâmetro “t” ( $t$  = tolerância) restritos pelos 6 graus de liberdade como demonstrado na Figura 4 (ABNT, 1997).

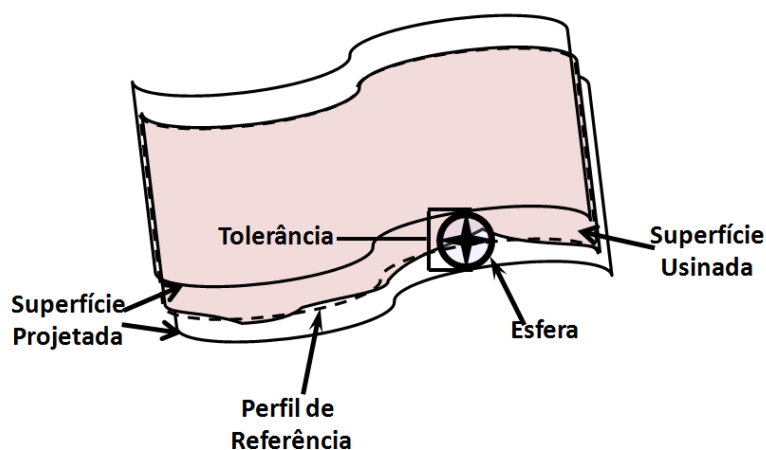


Figura 4: Representação e tolerância em superfície de forma livre

Na prática o que ocorre é que apenas o limite de tolerância inferior deve ser extremamente respeitado em operações de usinagem, pois um erro de corte excessivo inutiliza toda a peça, enquanto um erro de sobrematerial sempre pode ser contornado em etapas posteriores de acabamento, o que representa, frequentemente, um aumento de custo de produção (WALSH, 2001).

Como citado anteriormente o processo de medição envolve definir, na peça medida, uma determinada área e compará-la com os pontos presentes na mesma área no modelo nominal. Porém, e principalmente para superfícies de forma livre, o erro entre as duas superfícies não pode ser obtido diretamente pela comparação de um conjunto de pontos do modelo ideal pelo conjunto de pontos da superfície medida, pois não é possível ter qualquer garantia que ambos os conjuntos de pontos pertenceriam à mesma região caso as superfícies não possuíssem qualquer erro, e, muitas vezes, tais pontos não possuem mais qualquer relação além de representarem a mesma superfície. Tem-se neste caso um problema de localização e



posicionamento, pois o desalinhamento entre dois sistemas de coordenadas impede a avaliação direta dos desvios geométricos (CHEUNG *et al.*, 2006, 2009; CHOI, 2004).

Isto significa que antes que seja possível fazer qualquer comparação entre os pontos de uma curva ou superfície de forma livre para que seja calculado seu desvio geométrico, é necessário garantir que os pontos que serão comparados estão alinhados, sob uma tolerância aceitável, e que pertencem à mesma região da curva medida e ideal respectivamente. Desta forma a tarefa de alinhamento é tão importante quanto a comparação e avaliação das superfícies de forma livre. Isto ocorre, inicialmente, pela dificuldade de se estabelecer um ponto de partida entre as duas superfícies, restando apenas a comparação pela amostragem de pontos, os quais comumente não estão alinhados, e podem não representar a mesma região, como demonstra a Figura 5 onde a curva ideal, está sendo comparada com uma curva medida composta por muito menos pontos em relação essa. O grande problema é estabelecer a garantia que um determinado ponto, na curva medida, será comparado com o ponto relativo na curva ideal.

Para fornecer o alinhamento de duas curvas de forma livre é necessário calcular para todos os pontos medidos os fatores de translação e rotação. Desta forma um erro pode ser expresso como o somatório do quadrado da diferença de todos os pontos medidos na curva não ideal  $Q_i$  pelo conjunto de pontos na superfície ideal após operações de rotação e translação destes pontos, a fim de se ajustarem ao mesmo sistema de coordenadas dos pontos medidos, como descrito na equação 02 (HORMANN, 2000).

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^N \|Q_i - (RP_i + t)\|^2 \quad (02)$$

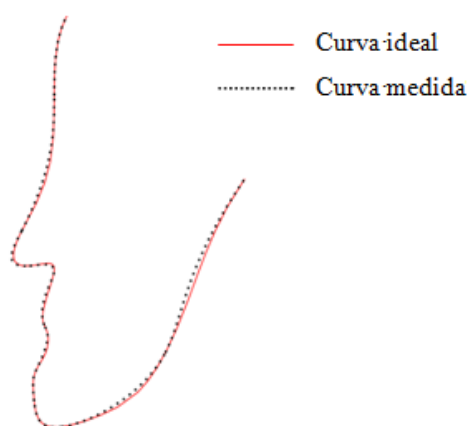


Figura 5: Ajuste de uma curva de forma livre a uma entrada por nuvem de pontos

Nesta equação  $Q_i$  representa o ponto na posição  $i$  da curva  $Q$ ,  $P_i$  representa um ponto na posição  $i$  da curva  $P$ ,  $R$  e  $t$  representam, respectivamente, a matriz de rotação e um vetor de translação, utilizados para promover os ajustes angular e linear sobre a curva  $P$  para que esta se ajuste sobre o sistema de coordenadas da curva  $Q$  (CHEUNG *et al.*, 2009).

Baseado no cálculo da variação dos graus de liberdade virtual (VDof, *Virtual Degrees of Freedom*), Cao e outros (2010) explicam a necessidade de se diferenciar, para superfícies de formas livres, os desvios referentes à forma geométrica ou intrínsecos, dos desvios referentes a erros de localização de uma determinada superfície em relação à outra, denominado por eles como momentâneos e entendidos por este documento como erros de localização e posicionamento. Com esta análise, os autores levantam a possibilidade de se modelar também os desvios de posicionamentos de uma superfície em relação à outra sem que estas estejam, necessariamente, com diferenças geométricas entre si. Tal observação condiz com o trabalho de Zhu e outros (2012) que definem que um processo crítico em operações com superfícies de forma livre é a garantia de alinhamento entre o modelo nominal e o modelo usinado visto que existe uma ausência de ponto referencial entre tais tipos de geometrias. A Figura 6 representa a relação entre o modelo nominal, os desvios geométricos e os desvios momentâneos.

Savio, De Chiffre e Schmitt (2007) destacam a importância de se estabelecer uma relação direta entre as dimensões das peças usinadas e os limites de tolerância aplicados na indústria. Nesta abordagem, os limites de tolerância são diretamente proporcionais à dimensão da peça e à aplicabilidade do produto final como mostrado na Figura 7. Uma peça da indústria aeronáutica, como por exemplo, as fuselagens de avião, normalmente possui uma dimensão entre o metro ( $10^0$  m) e o hectômetro ( $10^2$  m), com uma tolerância relativa que varia entre o milímetro ( $10^{-3}$  m) e algumas centenas de micrômetros ( $10^{-4}$  m), considerada por esses autores como média. A indústria de componentes óticos, por sua vez, possui uma das maiores variações nas dimensões das partes usinadas, variando normalmente entre  $10^{-1}$ m e  $10^0$ m, e cujas tolerâncias relativas podem variar entre  $10^{-4}$ m até valores menores que o  $10^{-5}$ m. Destacam-se também na Figura 7, as indústrias de microssensores, automobilísticas, turbinas e propulsores.

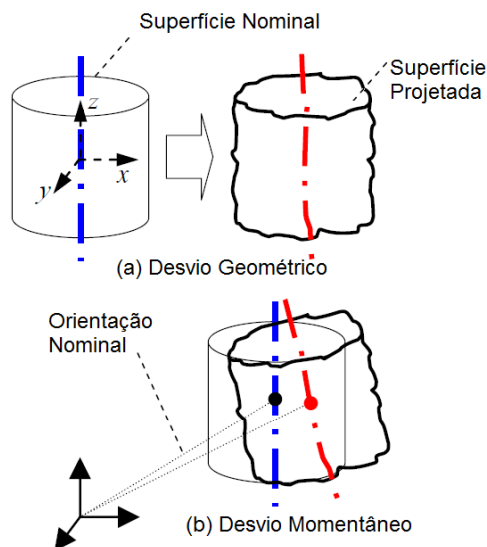


Figura 6: Localização e posicionamento de desvios geométricos (CAO *et al.*, 2010)

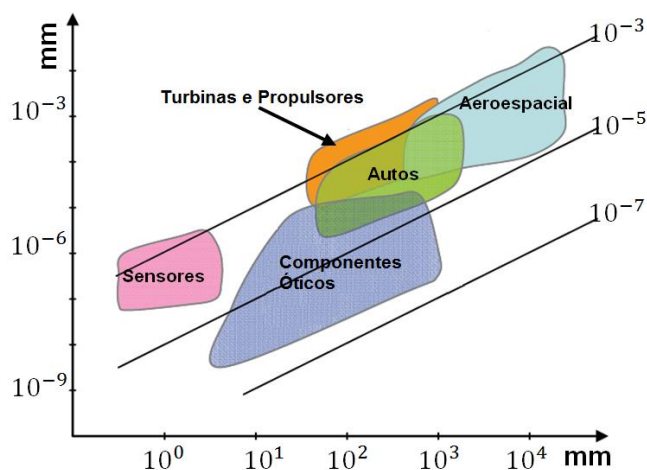


Figura 7: Relação tolerância e dimensão das peças (SAVIO; DE CHIFFRE; SCHMITT, 2007)

A partir de uma tendência de automação de toda a cadeia CAD-CAM Germani e outros (2010) apresentaram um estudo para inspeção de tolerâncias geométricas a partir de duas estruturas de informações as quais fornecem ao mesmo tempo o conjunto completo de informações da geometria a ser usinada e a tolerância geométrica presente na fase de concepção do produto, a partir da fase CAD, até a geração das trajetórias de ferramenta. A ideia principal é permitir a inspeção do produto e das estratégias de usinagem ainda nas etapas de definição de estratégias, a fim de facilitar a inspeção visual no produto usinado, diminuir o tempo de desenvolvimento do produto e evitar futuros erros de inspeção e interação. Porém, a principal limitação desse método está relacionada à qualidade e à quantidade de informações

referentes à tolerância virtual aliada a uma análise insuficiente da incerteza global do processo de medição.

### 2.1.2. Cálculo da incerteza de medição

As grandezas medidas estão sempre associadas à forma como elas são adquiridas: a primeira diz respeito à aquisição por dados estatísticos, denominada incertezas tipo A ( $u_A(x_i)$ ), a outra está relacionada às outras formas de aquisição denominada tipo B ( $u_B(x_i)$ ), as quais podem ser: meio ambiente, temperatura, pressão atmosférica, umidade, sistema de medição ou até mesmo o operador. A incerteza padrão de uma determinada medição deve levar em consideração a combinação das influências das incertezas de ambos os tipos (BIPM, 2008; MARTINS *et al.*, 2010; PAPA, 2012).

O guia para medição de incertezas (GUM, *Guide for Uncertainty Measurement*) apresenta um esquema de avaliação de incertezas baseado no uso das leis de propagação de incertezas e do limite do teorema central. Como definido no GUM, a incerteza é um parâmetro associado ao resultado de uma medição que caracteriza a dispersão dos valores medidos em torno de um valor real e incalculável, o valor do mensurando (BIPM, 2008). De acordo com Gasparin (2012) o método ideal para avaliar e expressar a incerteza do resultado de uma medição deve ser universal, isto significa que o método deve ser aplicável a todos os tipos de medição e de entrada de dados nas medições. A incerteza de uma determinada medição deve ser derivável diretamente desta medição, independente de como esta será agrupada com outras medições ou como é feita a decomposição de seus componentes internos. Também deve ser transferível, que significa que deve ser possível usar a incerteza avaliada por um resultado como um componente na avaliação da incerteza de outra medição em cuja primeira foi utilizada.

A previsão de variâncias dos pontos medidos de uma determinada superfície representa um papel importante na inspeção de superfícies de forma livre, pois a variância dos pontos permite estimar os limites de variação destes pontos a fim de assegurar um nível de confiança esperado e conhecido. Para se entender o conceito de variância, é necessário entender o conceito de esperança em metrologia, o qual conceitua como a posição esperada de um determinado ponto em seu sistema de coordenadas  $X, Y$  e  $Z$ , porém, como este ponto medido tem o comportamento de uma variável aleatória, ou seja, ele pode estar nas infinitas posições próximas à sua localização ideal, a variância é a esperança do desvio quadrático desta variável aleatória em torno de sua própria esperança (BIPM, 2008; MARTINS *et al.*, 2010).

As equações 03 e 04 são as equações de esperança para uma amostragem discreta e contínua respectivamente, descritas em (BIPM, 2008). Onde  $X$  representa o total de pontos que compõem a curva ou superfície,  $x$  e  $p$  representam um ponto deste universo e  $i$  a  $i$ -ésima posição deste ponto.

$$\mu = E(X) = \sum p_i x_i \quad (03)$$

$$\mu = E(X) = \int x f(x) dx \quad (04)$$

A equação de variância é dada por  $\sigma^2 = V(X) = E\{[X - E(X)]^2\}$  e significa que a variância de um universo de pontos é a diferença entre a esperança deste universo e o quadrado desta esperança. Também pode ser expressa pela equação 05.

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^2}{n} \quad (05)$$

O desvio padrão de um mesurando  $Y$  é a raiz quadrada positiva da variância e representa a incerteza padrão da medição associada à estimativa de saída ou resultado de medição  $y$ , projetado por  $u(y)$  e demonstrado na equação 06.

$$u(y) = \sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (06)$$

A incerteza combinada reflete a ação simultânea das diversas fontes de erros. e ainda corresponde a um desvio padrão da distribuição resultante. Isto implica que além de levar em consideração a ação simultânea das diversas fontes de erros (tipo A e tipo B), leva em consideração o grau de influência que cada fonte de erro representa no resultado final da medição. Este grau de influência é denominado no guia ISO como coeficiente de sensibilidade da grandeza de entrada representada pela equação 07 (BIPM, 2008):

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot u(x_i) \right]^2 + 2 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial y}{\partial x_j} \cdot u(x_i) \cdot u(x_j) \cdot r(x_i, x_j)} \quad (07)$$

Onde  $u_c(y)$  representa a incerteza padrão combinada de  $y$ ;  $u(x_i)$  a incerteza de uma grandeza de influência  $x_i$ , conforme descrito na equação 07;  $\frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial y}{\partial x_j}$  o coeficiente de sensibilidade da grandeza  $x_i$  e  $r(x_i, x_j)$  o coeficiente de entre duas grandezas de influência  $x_i$  e  $x_j$  (BIPM, 2008).

Muitas vezes o valor expresso no cálculo da incerteza combinada não demonstra a probabilidade de abrangência necessária às aplicações práticas reais como setores industriais, aplicações regulatórias ou quando a saúde e segurança estão envolvidos. O que ocorre na prática é que embora não seja possível estabelecer o valor real da incerteza de medição, o que apenas ocorreria com um número muito grande de medições, deve-se buscar um valor que possa ser utilizado juntamente com os dados adquiridos de forma a estimar o resto da distribuição, inicialmente descritas pelos valores medidos. Esta medida adicional é um fator de abrangência  $k$ , calculado a partir dos graus de liberdade efetivos e da abrangência desejada. A incerteza calculada a partir da incerteza combinada juntamente com o fator de abrangência inserido recebe o nome de incerteza expandida e é definida pela equação 08 (ALBERTAZZI, 2004):

$$U_p = k_p \cdot u_c(y) \quad (08)$$

Onde  $U_p$  representa o valor da incerteza expandida e  $K_p$  representa um fator de abrangência calculado a partir dos graus de liberdade efetivos  $v_{eff}$  e do nível de confiança desejado  $p$ . O fator de abrangência é um valor associado a um nível de confiança  $p$  que produz um intervalo sobre o resultado de medição capaz de estimar o valor medido para qualquer ponto no intervalo do nível de confiança. A priori o nível de confiança é uma representação em percentual do fator de abrangência e, normalmente parte, por convenção, de 95% (ALBERTAZZI, 2004).

Para se determinar a incerteza de uma determinada curva em um sistema cartesiano, é necessário expressar a incerteza de acordo com os pontos das suas respectivas coordenadas. Se um ponto é descrito por seu sistema de coordenadas  $X, Y$  e  $Z$ , então suas incertezas devem ser expressas nas direções deste mesmo sistema, ou seja,  $uX, uY$  e  $uZ$ . Isto significa que tomando uma curva como um conjunto de pontos, a incerteza deste conjunto de pontos representará a incerteza da forma dessa curva (MEHRAD; XUE; GU, 2013).

Em metrologia o erro grosseiro representa um resultado de medição que diverge consideravelmente do que foi suposto no modelo de medição, normalmente este tipo de erro também possui uma grande diferença da média das diversas medições de um mesmo

mensurando e, por padrão, são descartados por processos de filtragem dos valores coletados (PAPA, 2012). Estende-se que não faz sentido incluir no orçamento de erros dos processos de fabricação de superfícies de forma livre por centros de usinagem os erros oriundos da inaptidão ou não observância do operador com alguns aspectos que devem ser respeitados na usinagem, ou seja, neste trabalho serão descartados os erros grosseiros sendo estes oriundos do operador, do centro de usinagem ou do sistema de medição.

## **2.2. Topologia de superfícies de forma livre**

O conceito de formas geométricas que se diferem claramente das superfícies regulares é mais intuitivo que formal. Nomes como superfície de geometria complexa, superfícies complexas, superfícies esculpidas, superfície de fluxo livre, ou apenas superfícies de forma livre são comuns na literatura vigente para se referir às superfícies cuja topologia não pode ser como superfícies quadráticas, como cilindros, esferas, prismas, cones etc. ou pela combinação de polígonos regulares como cubos, retângulos etc. (PERNOT, 2004; RADZEVICH, 2008).

No presente trabalho todos os termos referentes às superfícies de forma livre, complexas ou que tenham como intenção se referir aos tipos de superfícies citados até agora serão tratados como sinônimos e, independente da nomenclatura escolhida pelo autor de referência será utilizado apenas o termo superfície de forma livre.

Radzevich (2008) define que uma superfície de forma livre é uma superfície regular e lisa em que as vizinhanças de dois pontos quaisquer e infinitamente próximos terão topologias locais diferentes, sua criação depende de uma representação analítica formal capaz de avaliar cada aspecto da superfície separadamente. Campbell e Flynn (2001) a definem como uma caracterização geral de um objeto cuja geometria não possui uma classe facilmente reconhecida como superfícies planares ou quadráticas, e que, muitas vezes, sua classificação ocorre pela combinação de várias classes não planares ou não quadráticas. Li, Yadong e Gu (2004) definem que uma superfície de forma livre se difere de uma superfície regular por não ser restrita a uma representação analítica clássica e sim por equações paramétricas que se utilizam de pontos de controle para se aproximarem tanto quanto possível da forma a ser representada. Nyirenda, Mulbagal e Bronsvort (2006) trabalharam com a classificação das características básicas e necessárias para se criar uma superfície de forma livre de modo a formar bibliotecas de taxonomias capazes de serem organizadas e utilizadas para compor novas superfícies de forma livre, ou seja, eles tentaram reunir os conceitos básicos presentes

nas superfícies de forma livre de forma a organizar bibliotecas capazes de elaborar outras superfícies de forma livre.

### 2.2.1. Caracterização de uma superfície de forma livre

O modelo de um produto é uma representação dos conceitos, relacionamentos, regras e operações necessárias para tornar tal produto uma peça de projeto e fabricação factível. Este modelo deve ser capaz de agregar as propriedades e características necessárias aos processos de fabricação de forma compreensível por operadores humanos bem como interpretável por computadores. As informações de dimensão e tolerância são componentes críticos em processos de projeto e fabricação de produtos, e por esta razão devem ser especificadas de forma a não permitirem dualidade ou ausência de informações (FENG, S. C.; YANG, 1995).

O comitê técnico ISO/TC 213 trata sobre especificação e verificação dimensional e geométrica de produto (GPS – *Geometrical Product Specifications*), é o responsável pelas normas ISO 17450 e ISO 14253, que tratam da especificação (tolerância) e verificação (medição) de produtos bem como os procedimentos metrológicos de cálculo de incerteza de medição e calibração de dispositivos de medição respectivamente (ALMACINHA, 2005). Estas duas normas juntas definem as padronizações de definição de tolerância macro e micro geométrica, os requisitos de verificação e calibração de equipamentos de medição incluindo medições das incertezas geométricas e dimensionais tanto de produtos quanto dos equipamentos de medição.

Graus de liberdade representam todos os movimentos possíveis que um corpo pode efetuar em um espaço tridimensional. Eles estão divididos em graus de translação  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ , e de rotação  $A$ ,  $B$  e  $C$  e estão dispostos conforme a regra da mão direita, como demonstra a Figura 8. Conforme descrito anteriormente, centros de usinagem em 5 eixos têm grande flexibilidade de usinagem de superfícies de forma livre devido a sua capacidade de explorar os seis graus de liberdade de um corpo no espaço. Isto ocorre porque, de forma geral, a orientação de dois corpos no espaço (a ferramenta de corte e a superfície a ser esculpida) deveria ocorrer sob 12 graus de liberdade, 6 de cada corpo, porém, o corte apenas ocorre quando existe movimento relativo entre a ferramenta de corte e a peça a ser usinada, o que permite eliminar todos os movimentos idênticos e reduzir a interação entre ambos, inicialmente, em 6 graus de liberdade. Outro fator importante é que o corte necessita do contato entre a ferramenta e a peça, então um grau de liberdade passa a ser eliminado, pois se permitindo os 6 graus de liberdade o afastamento entre a ferramenta de corte e a superfície



passa a ser uma possibilidade (BOHEZ, 2002a). Desta forma os eixos de rotação de um centro de usinagem em 5 eixos podem ser (A e C), (A e B) ou (B e C).

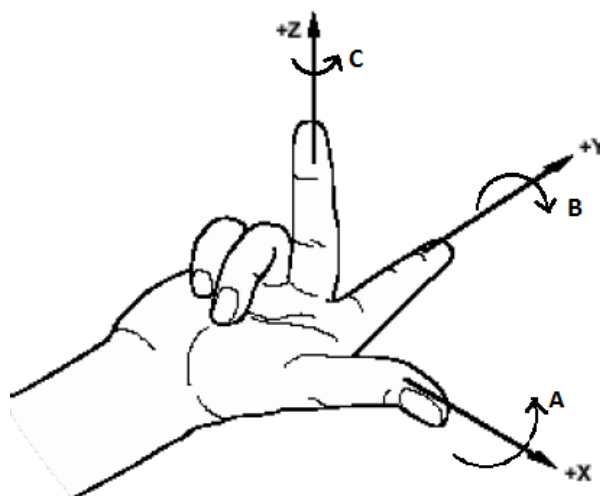


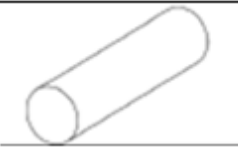



Figura 8: regra da mão direita(WALSH, 2001)

Para a norma ISO 17450, uma superfície pode ser considerada livre se seu grau de invariância for igual a zero (SOARES JUNIOR, 2010). Grau de invariância é a capacidade de se transladar ou rotacionar características ideais de uma superfície, sob o aspecto da cinemática de corpo rígido, sem que esta se modifique no espaço. O grau de invariância igual à zero significa que não existe uma simetria radial nem axial e que não existe qualquer ponto na superfície com a possibilidade de se executar uma rotação ou uma translação sobre qualquer eixo (X, Y ou Z) de forma a preservar seu comportamento no espaço. Isto significa que as superfícies de forma livre são, por definição, restritas em seus seis graus de liberdade (ABNT, 1997), ou seja, ao se ajustar uma superfície de forma livre sobre outra idêntica a uma distância infinitesimal, elas ficarão “encaixadas” de forma a não permitir nenhum tipo de movimento de rotação ou de translação sem a distância entre elas se altere. Uma esfera, por exemplo, tem grau de invariância igual a três, pois se uma esfera for imaginada sobre outra com suas superfícies infinitamente próximas, ambas poderão rotacionar em torno de qualquer eixo que passe em seu centro geométrico sem que a distância entre suas superfícies se altere. Um cilindro tem dois graus de invariância, um referente à rotação em torno de seu eixo e outro referente à translação ao longo deste mesmo eixo, pois se um cilindro for colocado sobre outro a uma distância infinitamente próxima, ambos podem ser movimentados de forma linear ou rotacionados em torno de seus eixos sem que se interfiram mutuamente. De forma semelhante, um cone terá apenas um grau de invariância, pois se o movimento de translação for aplicado, a distância entre ambos tende a variar, como mostra a tabela 1 baseada em (ALMACINHA, 2005; RADZEVICH, 2008).

Para o presente trabalho, considera-se que a condição básica para caracterizar uma superfície de forma livre é não possuir uma simetria radial nem axial, o que tem o mesmo significado de ter grau de invariância igual a zero, estando assim em concordância com a norma ISO 17450 (SOARES JUNIOR, 2010; SRINIVASAN, 2001).

Tabela 1: Classes de invariância (ALMACINHA, 2005)

| Classe de Invariância | Superfície (Exemplo)                                                                | Graus de Invariância                                                   |   |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---|
|                       |                                                                                     |                                                                        |   |
| Complexa              |    | Nenhum (Translação ou Rotação)                                         | 0 |
| De Revolução          |    | 1 Rotação em torno de uma linha reta                                   | 1 |
| Cilíndrica            |    | 1 Translação ao longo do eixo e uma rotação em torno de uma linha reta | 2 |
| Esférica              |  | 3 Rotações em torno de um ponto                                        | 3 |

### 2.2.2. Representações matemáticas de superfícies de forma livre

Existem várias formas de representar matematicamente uma superfície de forma livre, e para os processos de usinagem a partir de centro de usinagem, mais especificamente na cadeia CAD-CAM-CNC, as modelagens mais comuns são as que utilizam a matemática clássica e as representações paramétricas, sendo a última bem mais utilizada que a primeira.

#### a. Representações da matemática clássica (implícitas e explícitas)

As representações de geometrias a partir da matemática clássica podem ser divididas em explícitas e implícitas. Ambas possuem como semelhança a dependência entre os eixos do sistema de coordenadas, bem como a falta de um parâmetro capaz de definir um objeto finito em um campo finito (HELLENO, 2008; LUCENA, 2009; SOUZA, 2001).

A forma explícita  $y = f(x)$  tem como vantagem o fato da variável dependente  $y$  ser dada explicitamente com relação à variável independente  $x$ , e que essa variável tem obrigatoriedade de ser relacionada com, no máximo, um valor da variável independente. Isto

significa que neste tipo de representação  $y$  está em função de  $x$ . Como nesta representação cada  $y$  possui no máximo um valor presente nos possíveis valores de  $x$ , ou seja,  $(x_1, x_2, x_3 \dots)$ , é relativamente fácil, e com baixo custo computacional, estabelecer os valores da variável dependente numa tabela e descobrir os valores da variável independente. A equação 09 representa uma reta em um sistema bidimensional a partir da modelagem explícita, esta equação é conhecida como equação reduzida da reta e os valores constantes  $a$  e  $b$  representam respectivamente os coeficientes lineares e angulares (RADHAKRISHNAN; SUBRAMANYAN; RAJU, 2008).

$$f(x) = y = ax + b \quad (09)$$

As representações implícitas que se apresentam na forma de  $f(x, y) = c$ , onde  $c$  é um valor constante e  $y$  não é uma variável explicitamente em função de  $x$ , são capazes de representar funções com multivalores, ou seja, funções onde é possível associar vários valores da variável  $x$  em função da variável  $y$  e vice-versa. As mais comuns são as funções polinomiais, como a função que descreve um círculo que passa na origem e centro  $(a, 0)$  e possui a equação  $x^2 + y^2 + 2ax = 0$  ou a equação de “folium de descartes” cuja equação é dada por  $x^3 + y^3 - 3axy = 0$  (PERNOT, 2004).

A ideia inicial de se utilizar a matemática clássica na representação de geometrias simples ou complexas está na facilidade de se representar qualquer superfície a partir de um conjunto de representações simples, capaz de englobar um volume fechado, que possuam funções capazes de facilitar a interação com outros objetos e que possam representar figuras de qualquer topologia de forma direta ou em formato de árvores (HORNUS; ANGELIDIS; CANI, 2003). Allegre e Barbier (2004) se utilizaram deste tipo de representação para desenvolver algoritmos capazes de trabalhar com representações implícitas de componentes internos mesclada com representações implícitas de malhas poligonais para a composição da “pele” da superfície, formando uma árvore híbrida de representações implícitas.

Apesar da aparente vantagem de utilização de representações implícitas, elas não são tão populares quanto a representação a partir de funções paramétricas, isto ocorre basicamente por dois problemas: falta de parametrização pode prejudicar a interação de superfícies de forma livre, permitindo facilmente a criação de vincos nos pontos de junção e alto custo computacional ao se gerar uma função de campo que modele tal superfície, ou seja, a utilização de equações implícitas combinadas para gerar uma superfície de forma livre pode, ao mesmo tempo, gerar deformações na combinação entre as várias superfícies e gerar um

esforço computacional desproporcional ao se utilizar um grande número de equações implícitas (HORNUS; ANGELIDIS; CANI, 2003).

#### **b. Representações paramétricas**

As representações paramétricas se utilizam de coordenadas retangulares  $x, y$  e  $z$  em função de parâmetros de coordenadas gaussianas  $u$  e  $v$ . Esse tipo de representação é amplamente utilizado por sistemas CAD-CAM principalmente pela sua facilidade em representar superfícies de forma livre, e por não terem as limitações impostas pela representação da matemática clássica. Este tipo de representação também tem como vantagem o fato de serem matematicamente completos, de fácil amostragem e onde objetos podem ser desenvolvidos em partes e suas continuidades podem ser controladas nas junções (CAMPBELL; FLYNN, 2001; RADZEVICH, 2008).

De acordo com Souza (2011) o entendimento das representações paramétricas pode ser facilitado ao se partir do pressuposto que toda superfície  $S$  pode ser representada como uma justaposição de segmentos de curvas  $C$ , variando entre  $C_0$  (fronteira inicial) até  $C_1$  (fronteira final e que cada segmento de curva  $C$  sendo o resultado da variação de um ponto  $P_0$  (início do segmento) até um ponto  $P_1$  (fim do segmento). Cada ponto  $P$  deve estar em função de um parâmetro capaz de definir a sua direção, o parâmetro  $u$ , enquanto cada curva  $C$  deve estar em função de outro parâmetro capaz de identificar as diversas justaposições, o parâmetro  $v$ . Logo cada  $C$  estará em função de  $P(u)$  e a superfície  $S$  estará em função de  $C(v)$ . A relação entre a superfície  $S$  e um ponto  $P$  qualquer deverá estar em função de ambos os parâmetros, logo  $S = P(u, v)$ , como demonstrado na Figura 9.

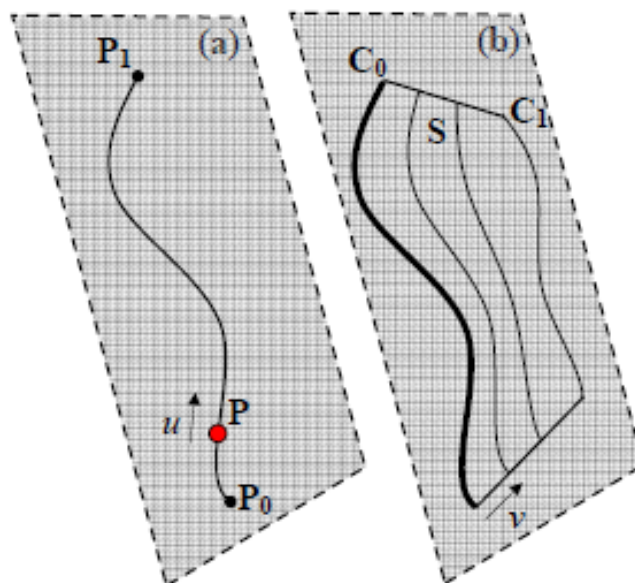


Figura 9: Representação paramétrica(SOUZA, 2011)

Uma forma genérica de se entender as representações gaussianas seria imaginar uma superfície 2D, representada pelos parâmetros gaussianos  $u$  e  $v$ , “trabalhando” sobre uma superfície 3D, representada pelos parâmetros retangulares  $x$ ,  $y$ , e  $z$  como demonstrado na matriz abaixo (equação 10) (RADZEVICH, 2008).

$$S(u, v) = \begin{bmatrix} x = f(u, v) \\ y = g(u, v) \\ z = h(u, v) \end{bmatrix} \quad (10)$$

As três funções  $f(u, v)$ ,  $g(u, v)$  e  $h(u, v)$  trabalham em função das duas variáveis paramétricas  $(u, v)$ .

Existem diversas representações paramétricas, porém as mais comuns na representação de superfícies de forma livre são Bézier, B-Splines e NURBS (*Non Uniform Rational B-Splines*). Entender o seu funcionamento é de fundamental importância para se reconstruir, ajustar e, conseqüentemente, avaliar as formas livres (PERNOT, 2004).

As curvas e as superfícies paramétricas não são, necessariamente, curvas ou superfícies geométricas. Isso significa que os parâmetros, por si só não representam qualquer significado geométrico e que modificando-se qualquer parâmetro é muito difícil prever a mudança da forma sem que seja necessário fazer uma análise adicional de todo o conjunto (MINETTO, 2003). De uma forma geral, um conjunto de pontos em coordenadas retangulares  $P_i \in R^3$  e um domínio de parâmetros  $\Omega \subset R^2$ , sobre os quais os pontos são parametrizados não são suficientes para descrever uma superfície. De forma análoga, para se representar uma curva de

forma livre em um espaço tridimensional  $P_i \in R^3$  não é suficiente apenas um domínio de parâmetros pertencente a um espaço unidimensional  $\Omega \subset R$ .

Em conjunto com estas descrições, se faz necessário estabelecer as informações de topologias, ou seja, qual é o comportamento de cada ponto em relação à sua vizinhança. A Figura 10 demonstra que apenas um conjunto de pontos pode levar a duas reconstruções diferentes caso não se tenha uma informação que descreva, por exemplo, qual a sequência de pontos que se deve seguir (HORMANN, 2000).

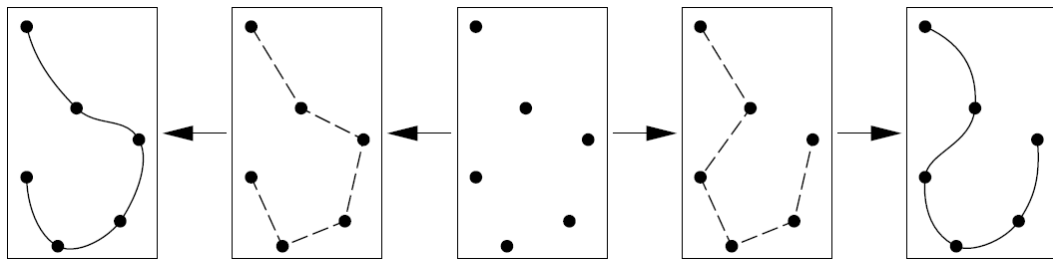


Figura 10: A importância da topologia (HORMANN, 2000)

Uma representação paramétrica que leve em consideração a topologia dos pontos de uma superfície de forma livre ( $P$ ) deve ser feita, de acordo com Radzevich (2008), da seguinte forma (equação 11):

$$r_P = r_P(U_P, V_P) = \begin{bmatrix} X_P(U_P, V_P) \\ Y_P(U_P, V_P) \\ Z_P(U_P, V_P) \\ 1 \end{bmatrix}, (U_{1,P} \leq U_P \leq U_{2,P}); (V_{1,P} \leq V_P \leq V_{2,P}) \quad (11)$$

Onde  $r_P$  é um vetor posição na superfície de forma livre  $P$ ,  $(U_P, V_P)$  são as coordenadas gaussianas de um ponto nesta superfície,  $(X_P, Y_P$  e  $Z_P)$  são coordenadas cartesianas deste mesmo ponto e  $(U_{1,P}, U_{2,P}, V_{1,P}, V_{2,P})$  são as coordenadas gaussianas de valores imediatamente após o intervalo fechado de  $(U_P, V_P)$  respectivamente. Esta mesma explicação mantém a sua coerência caso a representação paramétrica seja uma curva de forma livre no espaço tridimensional, neste caso, apenas se faz necessário omitir todos os parâmetros referentes à  $V_P$ . A Figura 11 demonstra uma representação paramétrica dos principais elementos da topologia local de uma superfície de forma livre em um espaço tridimensional (RADZEVICH, 2008). Para atender os objetivos deste trabalho, a partir deste ponto serão tratadas apenas as representações paramétricas de curvas livres no espaço bi ou tridimensional.

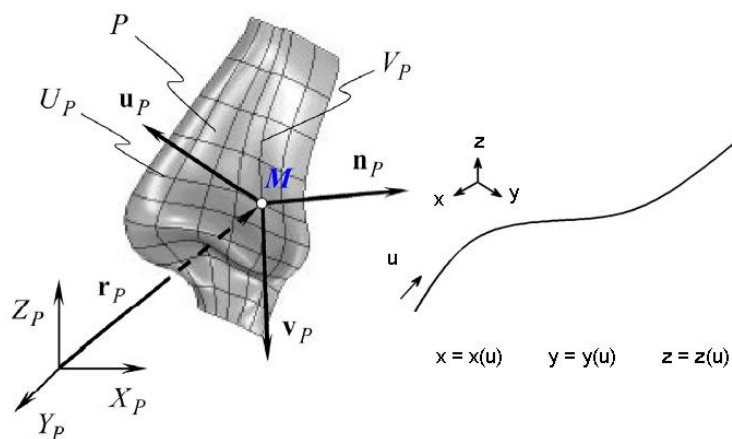


Figura 11: Representações paramétricas de superfície e curva (RADZEVICH, 2008)

De um ponto de vista prático, e no tocante ao cerne deste trabalho, a grande vantagem que as representações paramétricas mais comuns (*Bezier*, *B-Splines*, e *NURBS*) trazem é a capacidade de modelar, analisar e alterar as formas complexas a partir da manipulação de seus componentes básicos, os pontos de controle e o conjunto de nós. Porém, todas têm características próprias que permitem a sua utilização para tipos específicos de curvas e representam maior ou menor complexidade computacional, desta forma, devem ser escolhidas em cada caso de acordo com a curva que se deseja modelar (PERNOT, 2004).

Pontos de controle nas representações paramétricas é um conjunto de pontos que associados a um valor de peso altera uma curva. O peso é um valor real positivo que controla a tangente da curva de forma a aproximá-la ao ponto de controle de acordo com a sua magnitude (HELLENO, 2008).

As curvas de *Bezier* e *B-Splines* são curvas paramétricas polinomiais que possuem como limitação básica a incapacidade de representar formas simples fechadas. O grau do polinômio é definido pelo número de pontos de controle, o que pode causar um grande esforço computacional para se avaliar curvas com um grande número de pontos de controle. Outra característica importante destas duas representações paramétricas, é que a curva sempre interpola o primeiro e o último ponto do polígono de controle, formando assim, uma curva sempre presente no fecho convexo do polígono de controle (PHIL, 2003).

A diferença básica entre essas duas representações está na introdução do conceito de nós nas curvas *B-Spline*. Os nós fazem com que cada segmento de curva, que está sob o controle de um determinado lado do polígono de controle, se comporte como uma curva independente, permitindo assim, que cada alteração naquele ponto do ponto de controle não altere toda a curva, como ocorre nas curvas de *Bezier* (MINETTO, 2003).

Para superar a dificuldade de representação de formas simples fechadas, como os círculos e as elipses, os conceitos das curvas *Bezier* e *B-Splines* foram mesclados com o conceito das coordenadas homogêneas, o que criou respectivamente as curvas de *Bezier* Racional e *B-Spline* Racional não Uniforme (NURBS). Nos sistemas CAD-CAM atuais a implementação de NURBS é ampla, inclusive com sua inserção em normas padronizadas de conversão geométrica como padrão para Intercâmbio de Dados de Produto (STEP – *Standart for the Exchange of Product Model Data*) e, mais antigamente, Especificação Inicial de Intercâmbio Gráfico (IGES – *Initial Graphics Exchange Standart*) (HELLENO, 2008). A grande vantagem das curvas NURBS sobre a curva *Bezier* Racional é o fato de que, além de possuir a característica racional o seu vetor de nós pode ter um espaçamento variado entre cada nó, daí o termo não uniforme. Informações mais completas sobre as curvas paramétricas podem ser adquiridas em (MINETTO, 2003).

### 2.2.3. Metrologia de superfície de forma livre

De acordo com Almacinha (2006) e descrito na ISO 17450, a definição de um produto se inicia no conceito nominal, ou seja, a representação das especificações do produto ideal, sem imperfeições e, apesar disso, sem condições de medição, pois o próprio ato de produzir ou medir implica na aceitação de variabilidades dimensionais do mensurando ou inserção de incertezas de medições por parte do sistema de medição proposto, do operador ou do próprio mensurando (SMITH; EL-SHAARAWI; PIEGORSCH, 2002).

A transcrição do conceito nominal para o sistema computacional que possua um modelador geométrico capaz de representá-la virtualmente, o sistema CAD, representa a criação do modelo nominal. Embora este modelo nominal já contenha as primeiras inserções de erros, para o presente trabalho é considerado livre de desvios de forma e servirá como base de comparação com as outras etapas do processo de produção a fim de quantificar a contribuição de erros de cada etapa na medição da peça final (SOUZA, 2011).

O passo seguinte na definição de um produto representa a criação de um modelo de superfície não ideal, onde são inseridas informações específicas do projeto em questão, como requisitos de fabricação e as informações de tolerância de projeto. Neste momento já é necessário realizar as primeiras comparações com o modelo nominal, a fim de avaliar se as alterações e tolerâncias acrescentadas não comprometem a aceitabilidade da peça final, como citado anteriormente, nenhuma tolerância existente no processo de produção deverá ultrapassar a tolerância de projeto (SRINIVASAN, 2001).



A Figura 12 representa a relação das principais fontes de erros no processo de fresamento por centros de usinagens de acordo com as diversas etapas da cadeia CAM – MMC. Assume-se que existe uma dificuldade em classificar várias fontes de erros como sendo pertencente a uma determinada etapa específica da cadeia de produção, por isso, optou-se em avaliar as suas influências nas transições das etapas principais do processo de produção de uma peça por meio de um centro de usinagem: A definição das estratégias de usinagem e geração das trajetórias da ferramenta, ou etapa CAD – CAM, o controle e execução dos movimentos dos eixos da máquina de maneira a fazer a ferramenta percorrer a trajetória determinada, ou etapa CAM – CNC – Centro de Usinagem e, por fim, o processo de inspeção, ou etapa centro de usinagem – MMC.

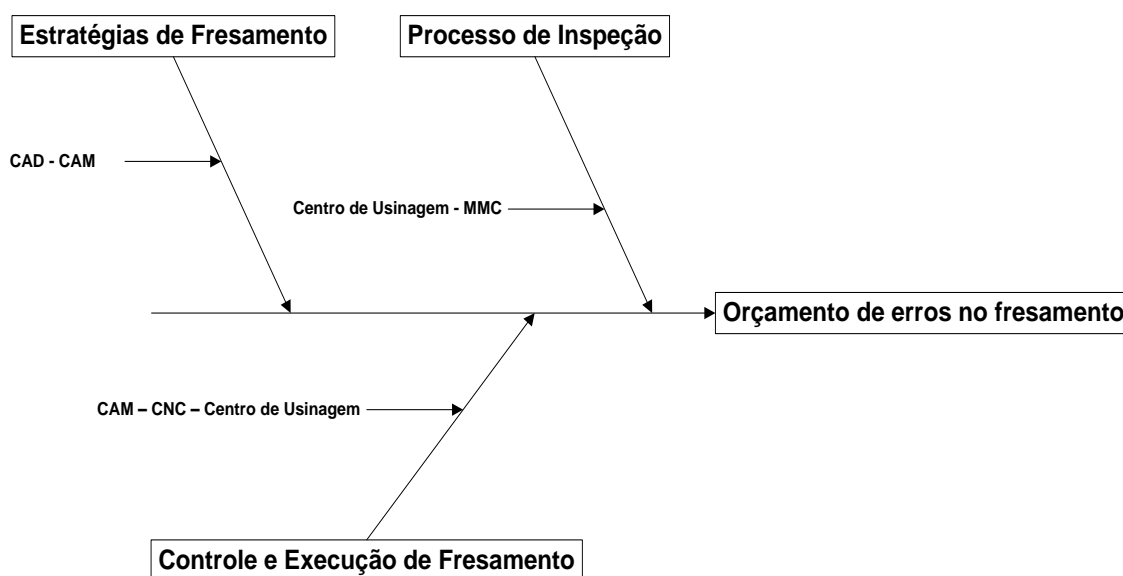


Figura 12: Levantamento básico das fontes de erros na cadeia CAM-MMC

Após as inserções de informações das diversas etapas da cadeia CAD-CAM-CNC, o modelo discreto não ideal já validado vai para a etapa de fabricação, no caso, a usinagem propriamente dita, onde o centro de usinagem vai produzir um produto real. Este produto representa o modelo real, contínuo e não ideal do produto de projeto. Ele deve ser medido pelo metrologista e comparado com o modelo nominal para que seja verificado se as diversas fontes de incertezas inseridas no processo de produção foram capazes de desviar a geometria do produto final para um produto sem aceitabilidade. Ou seja, medir se o produto fabricado encontra-se dentro dos limites de conformidade para com o produto idealizado (MEHRAD; XUE; GU, 2013).

O objetivo das verificações das superfícies de forma livre é estabelecer garantia de que os requisitos de qualidade são alcançados ou os motivos que criam os problemas de conformidade podem ser previstos, evitados ou corrigidos em tempo de não comprometerem a qualidade do produto tampouco os custos de produção. Existe uma relação inversa entre qualidade de produto e custo de produção, e um projeto factível é aquele que agrega a melhor qualidade final do produto e se mantém dentro dos custos possíveis (LUIS *et al.*, 2012).

Outro conceito necessário ao se descrever as necessidades e características do processo de inspeção de peças usinadas é a possibilidade de se compensar erros que não são mais passíveis de correção, podendo ser que tais correções agreguem outra fonte de erro, ou cujas correções representem um custo elevado e inviabilize todo o projeto. A compensação significa que a fonte do erro continuará no mesmo lugar e com a mesma característica de atuação, porém, por decisões técnicas é possível escolher apenas tratar de seus efeitos nas etapas subsequentes ao processo de produção. O exemplo mais comum de compensação de erros de forma é a inserção de um desvio em sentido inverso propositalmente criado e inserido no mesmo segmento de forma a anular aquele erro, conforme demonstra a Figura 13 (SARTORI; ZHANG, 1995).

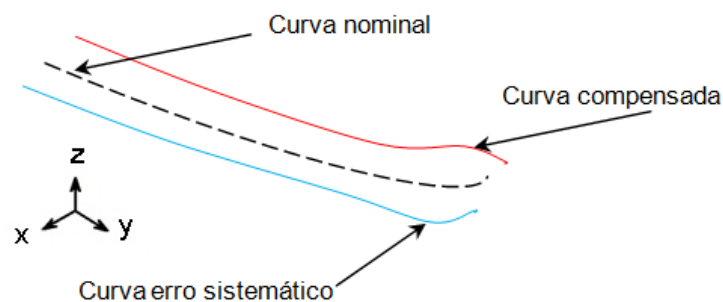


Figura 13: Exemplo de compensação de curva

### 2.3. Definição de estratégias de fresamento e geração de trajetória

A definição de estratégias de fresamento é a função básica da etapa CAM, nesta etapa é definida a trajetória de ferramenta, que é uma consequência da definição da estratégia de orientação do eixo da ferramenta, da estratégia de corte que será empregada no processo de fresamento e do método de interpolação escolhido. Tal definição depende do tipo de operação que será executado e do processo de captura da geometria e dos dados de projeto definidos no CAD. A etapa CAM ocorre em ambiente computacional, no qual fatores como resolução,

precisão e exatidão geométricas, bem como as possibilidades de correção, definição de tolerância e avaliação do produto de forma concorrente ao processo de criação de estratégias, permitem que as suas influências não sejam capazes de agregar grandes desvios na geometria final da peça de trabalho, quando comparados com os desvios de geometria impostos pela ação dos centros de usinagem. Isto é, os valores trabalhados aqui são muito próximos dos valores nominais. O que permite estabelecer que, normalmente, a presença de erros com grandes magnitudes nesta etapa, indica a presença de erros grosseiros como pode se concluir com os estudos de Soares Junior (2010) e de Dornfeld e Lee (2008). A Figura 14 representa o levantamento de fontes de erros na etapa CAD - CAM que contribuem para a criação de desvios geométricos no produto final.

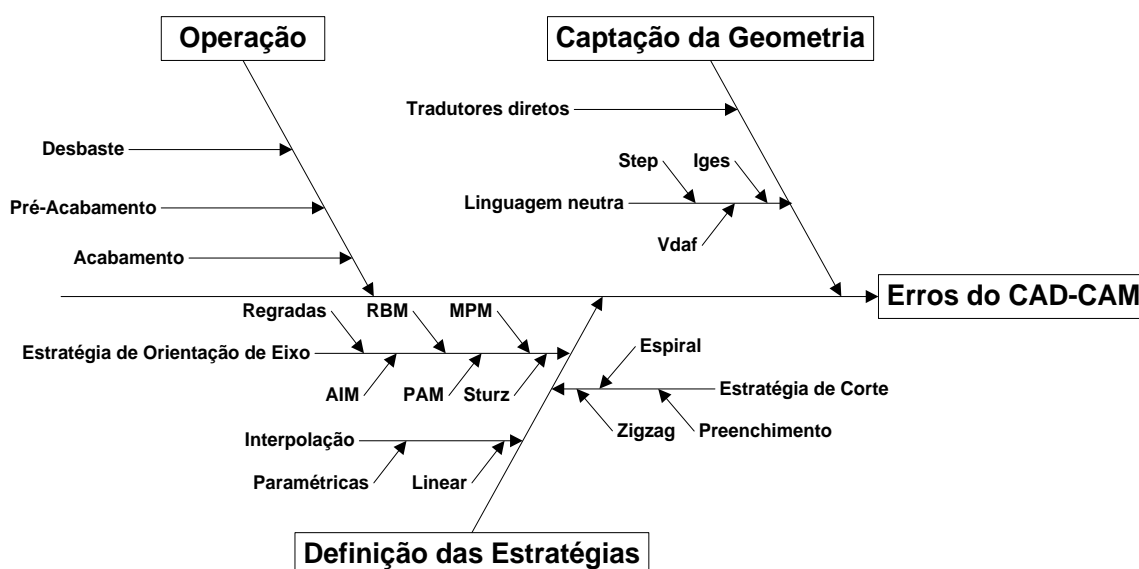


Figura 14: Fontes de erros da etapa CAD-CAM

### 2.3.1. Definição da operação a ser executada

A primeira decisão a ser tomada na etapa CAM é qual a operação será executada, pois a partir dessa escolha as outras decisões podem ser melhores avaliadas. Como descrito por Tutunea-Fatan e Bhuiya (2011) e Warkentin (1998) dentre as 3 operações básicas (desbaste, pré-acabamento e acabamento) as duas últimas representam até 75% do tempo de produção da usinagem (RAO; ISMAIL; BEDI, 1997; TUTUNEA-FATAN; BHUIYA, 2011; WARKENTIN, 1998).

A operação de desbaste consiste em remover grandes quantidades de material com o consumo mínimo de tempo e de recursos, por padrão deve ser a etapa rápida e de menor custo

quando comparada com as etapas subsequentes, o pré-acabamento e o acabamento. É comum que a etapa de pré-acabamento seja composta de várias ações do centro de usinagem, com a utilização de diversas ferramentas de corte diferente e de vários cálculos de trajetória e estratégia de posicionamento diferentes. A etapa de acabamento apenas se difere das etapas anteriores pela necessidade de se alcançar a geometria final desejada, é a última etapa do processo de produção da superfície e qualquer ajuste final deverá ser executado fora do centro de usinagem, por isso não estão mais presentes no processo de fresamento por centro de usinagem, como por exemplo, as ações de polimento e tratamento térmico (CHILDS *et al.*, 2000; NUNES, 2007; SOUZA, 2011).

### **2.3.2. Captação da geometria a ser usinada**

Cada sistema CAD possui uma forma específica de armazenar os dados geométricos do produto, denominado modelador geométrico. São as informações do modelador geométrico que devem ser passadas para o sistema CAM para que sejam criadas as estratégias de usinagem para a geração da trajetória da ferramenta. Essa transferência de informações pode ocorrer sob três aspectos diferentes: Sistemas CAD-CAM sob uma mesma arquitetura de *software* e fornecedor, Sistemas CAD-CAM de mesmo fornecedor, porém sob arquiteturas diferentes, e sistemas de arquitetura e fornecedor diferentes e onde se utiliza de um padrão neutro de troca de informações entre os sistemas (HELLENO; SCHÜTZER, 2005; SOUZA; BODZIAK, 2012). Por via de regra, a idealização do produto a ser usinado, a inserção de informações geométricas complementares, a criação das estratégias de usinagem e o posicionamento de ferramenta de corte são executados por profissionais diferentes, muitas vezes pertencentes a diferentes empresas ou setores. Por este motivo, a etapa e modelagem geométrica em um sistema CAD costumam se preocupar mais em representar a forma geométrica do produto final que representar as restrições funcionais deste produto (SOUZA, 2011).

#### **a. Os sistemas CAD-CAM são representados pelo mesmo software**

Se os sistemas estiverem inseridos na mesma estrutura de software, significa que ambos possuem exatamente o mesmo modelador geométrico e que todas as características definidas pelo CAD possuem uma associatividade com o sistema CAM. Outra vantagem da associatividade entre os sistemas é a possibilidade de se alterar o modelo CAD transportando-

se, automaticamente, a alteração para o modelo CAM, portanto sem representar uma fonte de erros para os sistemas CAD-CAM. A desvantagem está associada aos maiores custos e limitações de plataforma que estes sistemas podem apresentar (HELLENO; SCHÜTZER, 2004; SOUZA, 2001).

#### **b. Sistemas CAD-CAM distintos, porém de mesmo fornecedor**

Nestes casos é possível que os sistemas não compartilhem exatamente o mesmo modelador geométrico e que nem todas as características descritas no modelo nominal sejam corretamente transportadas para o sistema CAM. Quando isso ocorre, as informações que não forem compatíveis com o sistema CAM podem ser perdidas, o que causa a primeira fonte de erro presente no sistema CAM, pois esses erros certamente refletirão perda de qualidade geométrica no modelo do CAM e conseqüentemente perpetuarão para o produto final. Com o intuito de superar este obstáculo, existem softwares auxiliares responsáveis por fazer a tradução dos componentes geométricos de um sistema para o outro através de interfaces normalizadas. Estes softwares podem ser criados para traduções específicas do projeto em questão ou podem ser modelos genéricos que seguem aos padrões de normalização e estão presentes no mercado (HELLENO; SCHÜTZER, 2005).

#### **c. Sistemas CAD-CAM de fornecedores diferentes e as interfaces normalizadas**

Estes casos compreendem as situações em que os modeladores geométricos são incompatíveis, o que torna a utilização softwares de interfaces normalizadas imprescindível. Para tanto é necessário identificar se a interface escolhida tem condições de representar todos os componentes geométricos descritos no modelo nominal, caso contrário, a tradução das informações pode ser perdida causando também um erro no modelador geométrico no CAM que se transpassará para a geometria final da peça (ZHAO; XU; XIE, 2008).

Dentre os vários padrões de normalização existentes no mercado, os mais comuns são IGES, VDAFS e STEP, este último merecendo uma atenção à parte por se tratar do modelo proposto para ser completo na representação dos componentes geométricos. A utilização de tradutores implica não apenas na possibilidade de existirem erros de tradução, mas também no envolvimento de vários sistemas CAD diferentes, o que aumenta exponencialmente os riscos e os custos desta opção. A utilização de padrões neutros implica na escolha de um padrão que seja reconhecido de forma satisfatória tanto pelo sistema CAD quanto pelo sistema CAM,

vale lembrar que em projetos em que existe uma produção concorrente não é incomum a utilização de vários sistemas CAD e vários sistemas CAM diferentes, principalmente em processos de usinagem complexos onde a engenharia concorrente é empregada (HENRIQUES, 2004).

STEP – modelo de dados para um padrão de troca eletrônica de informações de produtos organizada pela ISO 10303 a qual descreve como representar a troca de informações digitais de produtos. O padrão Step foi desenvolvido para ser a mais completa ferramenta de normalização de informações sobre produtos, podendo substituir a linguagem padrão e mais utilizada por equipamentos CNC, o G-code. Graças a sua engenharia de bibliotecas de definições, públicas ou privadas, é possível agregar ao conjunto de componentes geométricos informações como topologia, tolerâncias, atributos etc. Este padrão foi construído tanto para permitir a troca de informações entre diferentes sistemas CAD, o que é comum em grandes projetos, quanto para a troca de informações entre CAD e CAM com modeladores geométricos diferentes (ZHANG *et al.*, 2011; ZHAO; XU; XIE, 2008).

Existem também as formas de representação da superfície a ser transportadas entre os sistemas CAD e CAM que não estão relacionadas com elementos geométricos, mas com modelos matemáticos através da geração de malha de triângulos sobre a superfície original. Os arquivos conhecidos como *Stereo Lithography Tessellation Language* (STL) compreendem um padrão de modelo geométrico utilizado para a representação de superfícies 3D de modelos sólidos construídos inteiramente a partir de triangulação planar. A grande vantagem desse formato de arquivo é a capacidade de comunicação apenas das informações referentes à geometria da parte usinada, sem a existência de qualquer outra informação extra para identificar a estrutura do modelo CAD original. A grande desvantagem, no entanto, é a possibilidade de gerar grandes volumes de dados principalmente quando se representam formas complexas e com uma grande resolução. Neste caso as informações são transferidas por meio de uma nuvem de pontos, e cada ponto, que é um vértice de um ou mais triângulos, representa uma coordenada cartesiana XYZ (BEARD, 1997; HELLENO; SCHÜTZER, 2005).

Com a utilização de um padrão neutro a maior fonte de erro que se pode encontrar é a impossibilidade de implementação de uma determinada parte da superfície a ser produzida, desta forma, uma inspeção da geometria carregada no sistema CAM é capaz de identificar estes pontos de erros para que fique a cargo do operador CAM o conjunto de ações que se deseja tomar. A Tabela 2 mostra a relação entre os principais elementos que compõem uma superfície usinada e a interface normalizada compatível. Observa-se nesta tabela que a

interface STEP é a única capaz de programar curvas paramétricas, que são as formas mais comuns de representação de superfícies de forma livre (HELLENO; SCHÜTZER, 2005; MIRALLES, 2009).

### 2.3.3. Trajetória de ferramenta

A definição da trajetória da ferramenta é a união dos conceitos de definição da estratégia de corte e da estratégia de posicionamento, este último possível apenas em centros de usinagem com o número de eixos acima de 3. Enquanto a estratégia de corte representa a criação de uma sequência de pontos, postos sobre a superfície a ser usinada, que será percorrida pela ferramenta de corte de forma a gerar a superfície desejada, a estratégia de posicionamento representa a forma que a ferramenta de corte deverá se comportar em cada ponto específico, ou seja, qual será a orientação de seu eixo em relação ao ponto da peça que está sendo usinado.

Tabela 2: Recursos geométricos contidos nas interfaces normalizadas (MIRALLES, 2009)

| Tipo de Elemento               | VDAFS | IGES | STEP |
|--------------------------------|-------|------|------|
| Ponto                          | X     | X    | X    |
| Vetor                          | X     |      | X    |
| Reta                           | U     | X    | X    |
| Arco de Círculo                | X     | X    | X    |
| Curva de secção cônica         |       | X    | X    |
| Curva Polinomial               | X     | U    | X    |
| Curva B-Spline                 |       | U    | X    |
| Curva NURBS                    |       | X    | X    |
| Plano                          | U     | X    | X    |
| Cilindro                       |       | X    | X    |
| Cone                           |       | X    | X    |
| Esfera                         |       | X    | X    |
| Elipsoide                      |       | X    | X    |
| Superfície Anelar              |       | X    | X    |
| Superfície Polinomial          | X     | E    | X    |
| Superfície B-Spline            |       | U    | X    |
| Curva em Superfície Polinomial | X     | U    | X    |
| Superfície de Regulagem        | E     | X    | X    |
| Superfície Polinomial Limitada | X     | U    | X    |

| Tipo de Elemento                                         | VDAFS | IGES | STEP |
|----------------------------------------------------------|-------|------|------|
| Sólidos                                                  |       | E    | X    |
| (X = contém; E = Limitado; U = Contido como subelemento) |       |      |      |

No momento da geração da trajetória é necessário diferenciar o tipo de usinagem que está sendo aplicado, uma vez que as trajetórias geradas são diferentes para a utilização de centros de usinagem em 3 e 5 eixos. No caso de Centros de Usinagem em 5 eixos, em cada ponto de contato entre a ferramenta de corte e a superfície usinada é possível se obter uma orientação e inclinação diferente. O fresamento em 3+2 eixos ocorre quando se utiliza um centro de usinagem em 5 eixos, porém, a operação dos eixos rotativos não ocorre de forma simultânea com a operação dos eixos lineares, ficando assim uma configuração fixa de posicionamento dos eixos rotativos ao longo de todo o processo de usinagem. É comum se utilizar do fresamento 3+2 eixos nas operações de desbaste, enquanto nas operações de acabamento se utiliza o fresamento em 5 eixos simultâneos (SOUZA, 2011).

O planejamento da trajetória da ferramenta é umas das tarefas mais complexas executadas pelos sistemas CAM, ele tem relação direta com os processos de prevenção de erros, com a melhora da qualidade geométrica da superfície usinada, bem como com a diminuição do tempo de fresamento, desempenho do Centro de Usinagem, custo de produção dentre outros (SOUZA; BODZIAK, 2012).

Como descrito anteriormente, um erro apenas se torna real quando a ferramenta de corte não reproduz, na peça de trabalho, uma superfície de acordo com o modelo nominal descrito na etapa CAD. Este erro apenas aparece como um excesso de material remanescente, também denominado sobrematerial ou um excesso de corte de superfície, denominado interferência na usinagem. Outro risco de erro presente na definição das estratégias da etapa CAD-CAM é o risco de choque entre os componentes da ferramenta de corte e superfícies adjacentes à máquina, este erro é denominado colisão e é demonstrado na Figura 15c.

A interferência na usinagem representa o contato indesejado entre a ferramenta de corte e a superfície da parte usinada. Pode ocorrer de forma local, quando a retirada excessiva de material ocorre no ponto de corte da fresa e está demonstrado na Figura 15a. A forma mais comum de interferência local é a seleção de uma ferramenta de corte cujo raio de contato é maior que o raio de curvatura no ponto de contato, nestas situações, os sistemas CAM devem permitir um sobrematerial no ponto onde pode ocorrer a interferência para que etapas subsequentes tratem a retirada de material de forma satisfatória. Outra forma de interferência na usinagem é quando ocorre um contato entre a ferramenta de corte e a superfície em um



ponto que já foi usinado pela ferramenta, como demonstrado na Figura 15b, neste caso o sistema CAM deve modificar a estratégia de posicionamento de forma a evitar estes contatos posteriores (MIRALLES, 2009; OLIVEIRA, A. C.; AHRENS; SCHROETER, 2003).

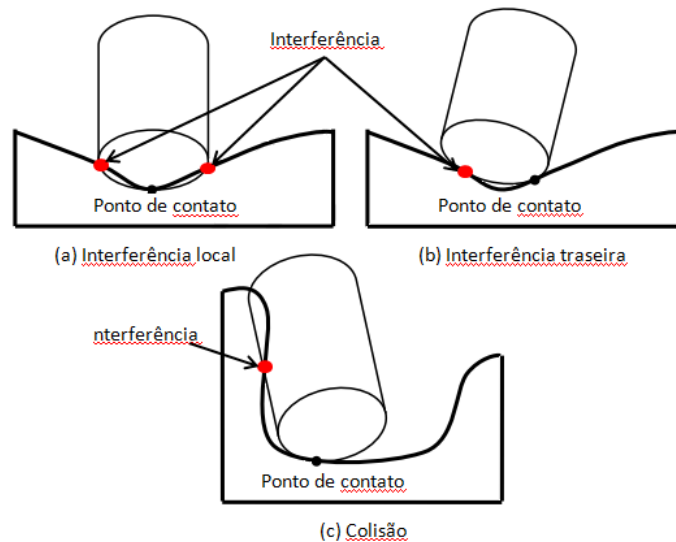


Figura 15: Relação de interferência e colisão (Adaptado (LASEMI; XUE; GU, 2010))

As interferências e as colisões são consideradas fontes de erros críticos em processos de fresamento, e por este motivo devem ser evitados, tanto pela possibilidade de se inutilizar permanentemente uma determinada peça que está sendo usinada, quanto pela possibilidade de se danificar a ferramenta de corte ou o Centro de Usinagem (VAHEBI NOJEDEH; HABIBI; AREZOO, 2011).

Lucena (2009) trata da prevenção de colisão e interferência a partir da utilização de ferramentas de apoio à inspeção (CAI – *Computer Aided Inspeccion*) para medições das superfícies geradas nas etapas anteriores à usinagem com o intuito de simular a operação do Centro de Usinagem. No trabalho de Moura (2003) a integração do ciclo das etapas de desenvolvimento de produto tem como objetivo, dentre outros, eliminar a possibilidade de colisões e interferência por meio da análise dos requisitos geométricos dos diversos componentes que compõem este ciclo. Ele destaca que a partir da análise dos modelos geométricos é possível avaliar a possibilidade de colisões e interferências ainda na fase conceitual do produto. O controle de colisões e interferências por vezes é uma tarefa que ocorre na simulação da usinagem após a criação da trajetória da ferramenta, desta forma o sistema é realimentado com as informações referentes a estes erros de forma a calcular novamente a trajetória da ferramenta em um *loop* que se finaliza com a certeza que os riscos de ocorrência destes erros foram eliminados. Embora os programas de geração de trajetória de

ferramenta sejam inflexíveis e dependentes do operador do CAM, a detecção de interferências é normalmente feita de forma automática no momento da simulação da usinagem. O controle e prevenção de colisões e interferências deve ser uma realidade no processo de fresamento, pois enquanto as colisões podem danificar o centro de usinagem, as interferências representam erros intratáveis na superfície usinada (OLIVEIRA, A. C.; AHRENS; SCHROETER, 2003; SOUZA, 2006, 2011; WARKENTIN; ISMAIL; BEDI, 2000).

Após a definição da operação que se pretende executar, da ferramenta de corte estabelecida, das estratégias de corte e posicionamento da ferramenta, o CAM estará apto para gerar a trajetória que a ferramenta deverá percorrer sobre a matéria-prima a fim de gerar a superfície usinada. Para tanto outros fatores devem fazer parte do conjunto de informações fornecidas ao CAM como os valores máximos e mínimos permissíveis para a trajetória da ferramenta (tolerância do CAM), as especificações do bloco da matéria-prima e as formas de interpolações das trajetórias de ferramenta a ser gerado. Tais fatores não compreendem fontes de erros quando avaliados individualmente, porém merecem atenção por influenciarem passos subsequentes do processo de usinagem ou participarem de métodos de compensação de erros geométricos ou prevenção de problemas como corte excessivo, colisão ou sobrematerial (RADHAKRISHNAN; SUBRAMANYAN; RAJU, 2008).

#### **a. Estratégia de corte**

A definição da estratégia de corte representa o formato geométrico e topológico que a ferramenta de corte deve seguir para usinar a peça. O objetivo desta tarefa é definir o comportamento da ferramenta de corte de forma a abranger toda a peça a ser usinada. Possui influência direta no tempo de usinagem bem como na relação entre o sobrematerial e acabamento. A trajetória da ferramenta é realizada de forma adaptativa levando em consideração as características da superfície usinada, permite uma redução no tempo de usinagem bem como aumenta a qualidade superficial da peça produzida (HELLENO; SCHÜTZER, 2004).

Esta etapa tem relação direta com a operação que se está executando ao mesmo tempo em que depende das características da ferramenta de corte selecionada e representa a principal estratégia utilizada para definir a trajetória de ferramenta de corte para fresamentos de 3 e 3+2 eixos. A vantagem da utilização deste método é a união da rigidez adquirida na usinagem em 3 eixos com a flexibilidade de acesso a algumas partes da peça usinada que se encontra no fresamento em 5 eixos (SOUZA, 2011). Em operações de acabamento, por exemplo, a

estratégia de corte deve ser selecionada de forma a manter a retirada de cavaco a uma taxa menor que quando a operação escolhida for a de desbaste. Cada sistema CAM possui um conjunto de estratégias de corte implementado, porém, todas as estratégias são variações dos tipos básicos, zigzag, espiral ou a junção de ambos Figura 16 (ANOTAIPAIBOON; MAKHANOV, 2011; LASEMI; XUE; GU, 2010; WARKENTIN, 1998).

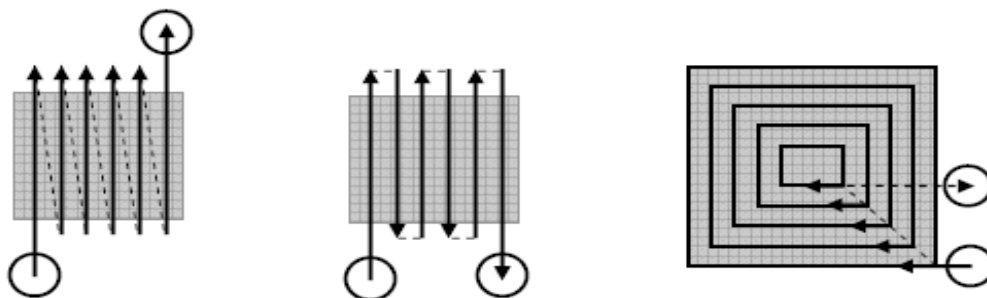


Figura 16: Representação dos métodos zig, zig-zag ou espiral (SOUZA, 2011)

- **ZigZag** - Representa a mais comum e mais usada estratégia de corte devido à sua facilidade de implementação e cálculo de abrangência de forma a completar toda a superfície com retas paralelas ligadas de uma borda à outra. Uma variação comum deste método é denominada apenas zig e ocorre quando a ação de corte ocorre sempre em uma única direção (SOUZA, 2006)
- **Espiral ou Contornos paralelos** – Estas duas estratégias são bastante semelhantes entre si. Representam linhas dispostas paralelamente à borda da superfície ou a um determinado sistema de coordenadas, a escolha desta variação na estratégia altera significativamente o tamanho do segmento de reta (ou curva) que irá compor esta linha, e termina por influenciar outras fontes de erros como, por exemplo, erros térmicos ou de perpendicularidade dos eixos (LASEMI; XUE; GU, 2010). Elas diferenciam entre si apenas pela conexão ou não entre cada alteração entre o sentido da curva, ou passo entre uma curva e outra (CHOI, 2004; LASEMI; XUE; GU, 2010).

O contato entre a ferramenta de corte e a peça de trabalho é a forma mais simples de se avaliar a presença de um erro na usinagem. Desta forma, a escolha de quais ferramentas de corte serão utilizadas também faz parte das escolhas das estratégias presentes na etapa CAD-CAM, embora a descrição da ferramenta de corte e seu levantamento de erros represente uma avaliação à parte para o presente trabalho. Os passos para se gerar a trajetória da ferramenta se iniciam na descrição dos pontos de contato da ferramenta de corte e a superfície a ser usinada

estes pontos são descritos como CC (*Cutter contact*), posteriormente tais pontos são transformados em pontos de localização da ferramenta (CL – *Cutter location*) que são calculados com base no eixo da ferramenta (TCP – *Tool Center point*). O cálculo dos pontos CC e CL é utilizado por diversos métodos de geração de trajetória de ferramenta tanto para o fresamento em 3 e em 5 eixos e juntamente com os método de interpolação presente nos sistemas CAD-CAM se extrai as isolinhas ou seja, linhas que estarão dispostas sobre a superfície a ser usinada e que serão percorridas pela ferramenta de corte (MIRALLES, 2009; SOUZA, 2011). Os métodos mais comuns de extração de isolinhas são:

- **Isoparamétrico** – Tem por princípio a geração da trajetória baseado em parâmetros de  $u$  e  $v$ . Apesar de ser um método simples, tem como principal desvantagem a possibilidade de criação de linhas redundantes, o que torna o processo de retirada de material ineficiente. Outra fonte de erro comum neste método é a ineficiência quanto ao modo de construção da superfície e a capacidade de discretização, ou seja, em situações que estão sujeitas a operações booleanas, como aparamento (*trimming*) ou extensão (*extending*) este método gera curvas isoparamétricas que não coincidem com as curvas iniciais, o que causa trajetória inadequada e exige ação de reparametrização ou remodelagem de toda a superfície (SOUZA, 2006)
- **Isoplanar ou APT (*Automatic Programed Tool*)** – Semelhante ao isoparamétrico este método consiste em gerar as isolinhas em um determinado plano e projetá-lo sobre a superfície que se deseja usinar. A principal desvantagem deste método é a possibilidade de criar sobrematerial excessivo em pontos em que a superfície é muito inclinada, outro fator que merece atenção é o custo computacional devido à necessidade de constantes cálculos matemáticos.
- **Cartesiano** – Este método consiste em se utilizar de entidades geométricas que são projetadas sobre a superfície a ser usinada.
- **Preenchimento de espaços (*space filling*)** – Criado em 1994 para prover trajetória de ferramenta em operações de acabamento e finalização, este método é baseado na geração de direção de corte otimizado para gerar pequenos caminhos de ferramenta. Um ponto positivo deste método é ajustar o comportamento da curva respeitando características locais da área de corte, porém gera um grande número de segmentos de linhas interpoladas (retas ou curvas), o que aumenta tempo de usinagem e do custo computacional Figura 17 (CHOI, 2004).

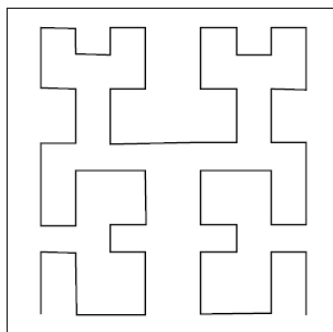


Figura 17: trajetória da ferramenta *space filling* (CHOI, 2004)

### **b. Estratégia de orientação de eixo ferramenta de corte**

A definição da estratégia de orientação de eixo de ferramenta de corte serve para determinar o posicionamento relativo entre a ferramenta de corte e a superfície usinada em um ponto específico da trajetória da ferramenta. De acordo com Warkentin, Ismail e Bedi (2000) o objetivo das estratégias de orientação de eixo de ferramenta de corte é gerar uma quantidade mínima de material remanescente na superfície usinada à medida que a ferramenta se move ao longo de uma trajetória estabelecida. A correta aplicação das estratégias de orientação de eixo de ferramenta de corte é útil para melhorar o desempenho do fresamento, pois, à medida que melhoram a qualidade geométrica do produto reduzem o tempo de usinagem, bem como fatores de desgaste de ferramenta, vibrações, carga e erros térmicos no Centro de Usinagem (LI, Z.; CHEN, 2005).

A orientação de eixo de ferramenta não é possível em processos de fresamento de 3 e 3+2 eixos, uma vez que é necessário se utilizar dos eixos A, B ou C para alterar a orientação do eixo da ferramenta de corte, o que é ausente nesses tipos de usinagem.

A primeira estratégia de orientação de eixo a ser utilizado por Centros de Usinagem em 5 eixos simultâneos foi a inclinação da ferramenta, também conhecido como método de Sturz é o mais básico e fácil de ser implementado (GRAY; BEDI; ISMAIL, 2003; GRAY *et al.*, 2001). Foi inicialmente utilizado com ferramentas de ponta esférica para evitar que o contato entre a ferramenta e a superfície ocorresse com o centro do eixo da ferramenta e ocasionasse um esmagamento do ponto que estava sendo usinado. Essa possibilidade de esmagamento ocorre porque o movimento relativo entre a aresta de corte da ferramenta e a superfície tende a zero em regiões próximas ao eixo. Segundo Sadílek e outros (2011) permitir que o eixo da ferramenta de corte participe do processo de retirada de material gera aumento na temperatura de corte, contração do material, acúmulo de vibrações e de cristas, ao mesmo tempo em que diminui a vida útil da ferramenta.

Esse método consiste em uma inclinação arbitrária e constante da ferramenta de corte em direção ao movimento de avanço e em direção à normal da superfície de contato ferramenta x matéria-prima. São definidos dois ângulos  $\beta$  e  $\alpha$  em relação ao sentido de avanço e à normal da superfície respectivamente. Os eixos do centro de usinagem irão se movimentar para manter tais ângulos constantes ao longo de toda a trajetória da ferramenta Figura 18 (SOUZA, 2006)

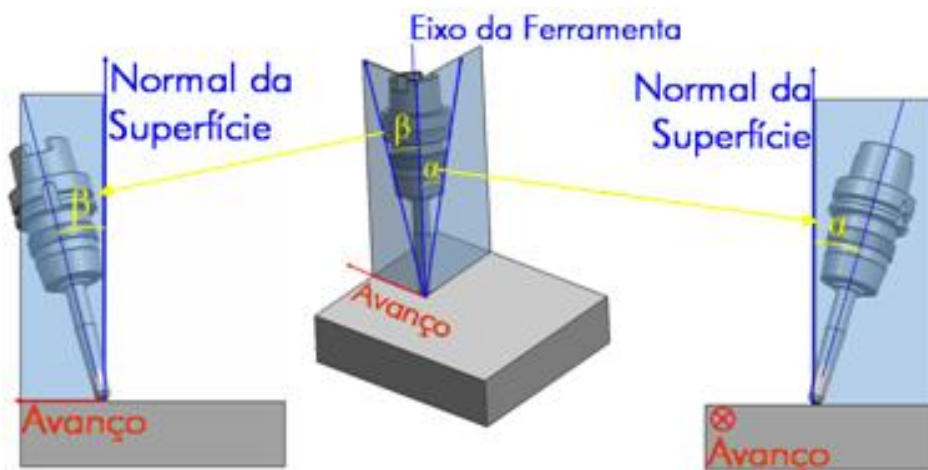


Figura 18: Ângulos  $\beta$  e  $\alpha$  definidos no método de Sturz (SOUZA, 2006)

Exceto pela prevenção de esmagamento da superfície pelo centro da ferramenta método de Sturz não demonstra nenhuma vantagem quando utilizado por ferramentas esféricas (WARKENTIN, 1998), pois a forma de contato entre a ferramenta de topo esférico e a superfície de usinagem sempre será um ponto, entretanto, com a utilização de ferramentas de topo reto ou toroidal a variação do ângulo de ataque pode alterar a taxa de retirada de material. A qual tende a aumentar para o caso de uma baixa inclinação ou se reduzir quando se utiliza um ângulo de inclinação muito alto (GRAY *et al.*, 2001; LASEMI; XUE; GU, 2010). Desta forma, testes empíricos demonstram que embora o ângulo de inclinação da ferramenta dependa de fatores como a rigidez da ferramenta de corte, a operação que se deseja realizar e o diâmetro da ferramenta, comumente é aceito que o ângulo de inclinação deve estar numa faixa entre  $3^\circ$  e  $10^\circ$  (LASEMI; XUE; GU, 2010; SADÍLEK *et al.*, 2011; WARKENTIN; ISMAIL; BEDI, 2000). A Figura 19A mostra a utilização do método de Sturz com inclinação no sentido do avanço do corte em direção ao eixo X bem como centro da ferramenta (Figura 19B) que não deve entrar em contato com a superfície para não se gerar os erros de esmagamento.

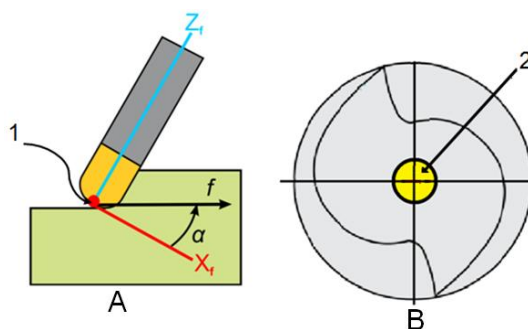


Figura 19: Método sturz (BOZ; ERDIM; LAZOGLU, 2011)

Devido a limitações existentes no método de Sturz outros métodos de posicionamento foram desenvolvidos e aplicados às máquinas de 5 eixos, alguns métodos são implementações comerciais e dependem da experiência do operador do CAM e habilidade com o *software* em questão, outros são definidos como estratégias acadêmicas e se utilizam de funções matemáticas para prover uma inclinação mais eficiente e adaptativa da ferramenta de corte, prevenção de corte excessivo ou colisão entre a ferramenta de corte e alguma parte da máquina, com por exemplo o *Principal Axis Method* (PAM) e o *Rolling Ball Method* (RBM).

No método PAM as informações sobre a curvatura da superfície são incorporadas ao cálculo de inclinação da ferramenta de forma dinâmica para cada ponto que está sendo usinado. A intenção básica é uma curvatura mínima da ferramenta com o ponto de inclinação máxima da superfície para cada ponto de contato. O cálculo se baseia em três vetores perpendiculares entre si (um representando a normal da superfície ou eixo Z e dois vetores de eixos principais que representam X e Y respectivamente) cujas direções são determinadas pela regra da mão direita. A inclinação da ferramenta ocorre a sempre colocar o raio efetivo da ferramenta sempre em direção ao eixo de avanço X e pode ser computado pela equação:  $\beta = \arcsen(k_1 R)$  onde  $\beta$  representa o ângulo de inclinação,  $k_1$  a curvatura máxima da superfície no ponto de contato da ferramenta e  $R$  o raio da ferramenta (GRAY *et al.*, 2001; LI, Z.; CHEN, 2005; WARKENTIN; ISMAIL; BEDI, 2000).

De forma análoga ao método Sturz, o método PAM também não possui nenhum tratamento de prevenção de interferência e representa, nas diversas modificações do ângulo de inclinação, o risco de esmagamento da superfície a ser usinada pelo centro da ferramenta de corte.

Warkentin (1998) definiu os parâmetros para um método de posicionamento da ferramenta capaz de maximizar a retirada de cavacos e reduzir o tempo total de usinagem chamado multiponto (MPM, *multipoint machining*), a ideia básica é utilizar ferramentas de topo reto ou toroidal para manter dois pontos de contato ao longo de toda a superfície, porém Gray e



ouytros (2001), apesar de reconhecer que o método possui a prevenção de interferência já implementada no seu algoritmo, defende que o método possui uma excessiva complexidade de implementação devido ao grande número de parâmetros necessários para manter o contato constante entre os dois pontos da ferramenta e a superfície.

O *Rolling Ball Method* (RBM) usa o princípio do MPM para posicionar a ferramenta do tipo torus dentro de uma esfera de rolamento, e uma modificação do método PAM para posicionar esta esfera. O objetivo principal é criar um método simplificado de posicionamento de ferramentas em fresamentos em 5 eixos simultâneos, capaz de executar procedimento de prevenção de interferências de forma adaptativa. Simplificadamente este método define uma esfera cujo raio dependerá da região de superfície ao redor da ferramenta de corte, como a ferramenta será imersa e se inclinará de acordo com as características da esfera, esta terá o raio calculado levando em consideração uma região de superfície ao redor da ferramenta e a própria ferramenta. Dessa forma não ocorrerá interferência na usinagem, pois a esfera respeita a topologia da superfície e a ferramenta se inclina de acordo com a esfera de rolamento (GRAY; BEDI; ISMAIL, 2003; GRAY; ISMAIL; BEDI, 2004). Embora o RBM seja método em que a interferência é evitada ele pode gerar uma grande inclinação da ferramenta e permitir uma quantidade excessiva de sobrematerial na superfície. Dessa forma o *Arc Intersect Method* (AIM) usa uma rotação da superfície sob a ferramenta ao invés de uma esfera de rolamento com eixo variável. Esta rotação permite calcular o menor ângulo da ferramenta em um conjunto de ângulos calculados com a prevenção de interferência. Embora a eliminação da esfera de rolamento evite o sobrematerial, o método AIM torna-se um método de grande custo computacional devido à necessidade de calcular vários ângulos de inclinação da ferramenta para cada ponto de usinagem e utilizar apenas um de cada vez (HOSSEINKHANI; AKBARI; VAFAEESSEFAT, 2007; LASEMI; XUE; GU, 2010).

A grande variedade de métodos citados até agora está fortemente baseada no fresamento frontal por ferramenta de topo, porém existe um crescente número de pesquisas avaliando as estratégias de posicionamento, bem como a criação de um trajetória da ferramenta, levando em consideração as características do fresamento periférico em Centros de Usinagem em 5 eixos. Este tipo de fresamento, quando comparado ao fresamento frontal, possui uma alta produtividade, pois remove uma maior quantidade de material em uma única passada, possui uma melhor qualidade superficial com o emprego de forças de corte reduzidas, possui um desgaste da ferramenta de corte reduzido e pode eliminar a necessidade da etapa de finalização, o que conseqüentemente reduz o tempo de usinagem e o custo de produção (GONG; WANG, 2011; LI, C.; BEDI; MANN, 2008). A baixa utilização deste método de



fresamento em Centros de Usinagem em 5 eixos está na complexidade de calcular a trajetória da ferramenta, no controle em prevenir as interferências na usinagem, na complexidade matemática de seus algoritmos bem como nas limitações das superfícies que estas estratégias podem trabalhar, pois a extensa área de contato entre a lateral da ferramenta e a superfície impede a usinagem de pequenas curvas côncavas. Embora seja amplamente difundido na literatura atual que a utilização de fresamento periférico com Centros de Usinagem em 5 eixos deva ocorrer apenas para superfícies regradadas (*ruled surfaces*), existe um crescente interesse nas técnicas de fresamento periférico para superfícies de forma livre (GONG; WANG, 2009; HARIK; GONG; BERNARD, 2013; LI, C.; MANN; BEDI, 2007; MEKID; PRUSCHEK; HERNANDEZ, 2009).

Superfícies regradadas podem ser definidas como as superfícies formadas por sucessivas linhas retas (linhas de regra) conectadas por duas linhas guias, a Figura 20 demonstra basicamente uma estrutura regradada.

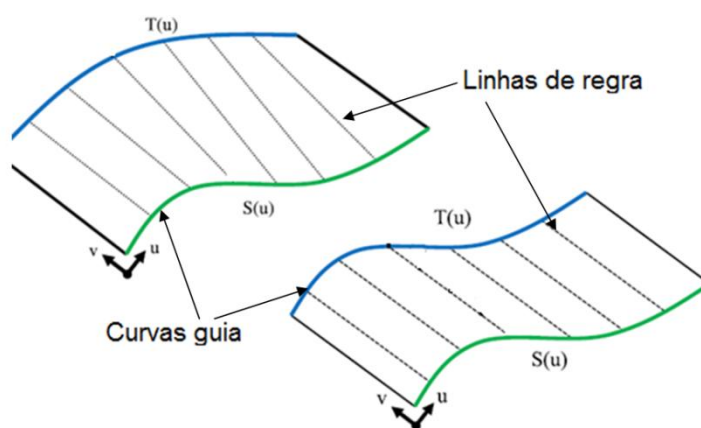


Figura 20: Superfícies regradadas (Adaptado de HARIK; GONG; BERNARD, 2013)

#### 2.3.4. Definição da ferramenta de corte

Neste estágio são definidas quais as ferramentas de corte serão utilizadas em cada processo do fresamento (desbaste, pré-acabamento e acabamento). Conforme descrito por Lasemi, Xue e Gu (2010) o principal objetivo da escolha da ferramenta é reduzir o tempo e o custo de usinagem. Para fresamento de superfícies de forma livre, embora possa ser utilizado qualquer tipo de ferramenta de corte, normalmente se utiliza a ferramenta de topo, pois sua capacidade de corte tanto frontal quanto periférico permite que mais operações sejam executadas sem a necessidade de substituição da ferramenta (LI, C.; BEDI; MANN, 2008; RADZEVICH, 2002; TANDON; GUPTA; DHANDE, 2005).

Outro fator importante na escolha da ferramenta de corte é a operação que ela irá realizar, pois as ferramentas para desbaste normalmente necessitam ser mais resistentes e possuem um menor número de dentes do que as ferramentas utilizadas para acabamento, que, por sua vez possuem um corte com maior suavidade. Para que os custos de usinagem sejam minimizados, a escolha da ferramenta de corte, por padrão, deve priorizar uma grande faixa de retirada de cavaco, diminuir a quantidade de sobrematerial e evitar a retirada excessiva de material da superfície (RUFENG *et al.*, 2010).

Conforme descrito na Figura 21, a classificação mais comum das ferramentas de topo diz respeito à geometria do topo da ferramenta: ponta esférica, reta ou toroidal (WARKENTIN, 1998). Embora existam outras informações relevantes à escolha da ferramenta de corte e inerente a todos os tipos de ferramenta de topo: diâmetro da fresa, profundidade de corte, largura do corte, imersão radial, número de arestas efetivas, número total de arestas e passo (HOFFMAN *et al.*, 2012).

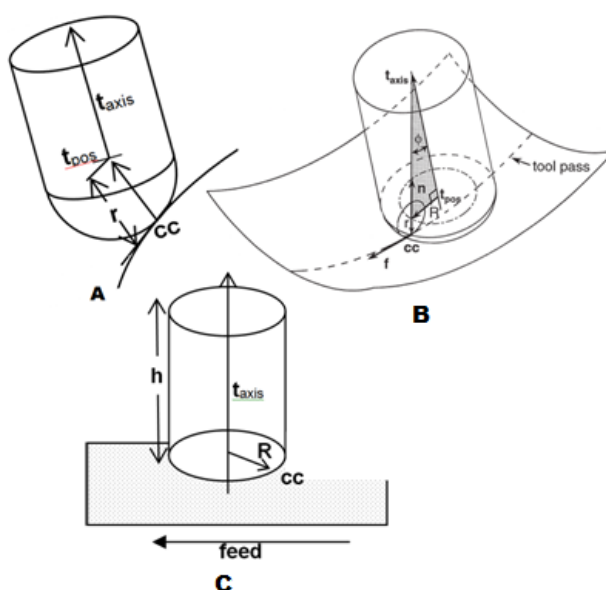


Figura 21: Tipos básicos de ferramenta de topo (WARKENTIN, 1998)

A ferramenta de corte também se inclui no conjunto de fontes de erros relativos à Centro de Usinagem, porém para permitir uma melhor separação das fontes de erros foi necessário avaliar as ferramentas de corte como uma nova etapa.

#### a. Desgaste

A vida útil da ferramenta de corte é definida pelo período de tempo, expresso em minutos, que a ferramenta mantém a capacidade de exercer a sua função de corte satisfatoriamente. À

medida que a ferramenta de corte é utilizada, suas arestas passam se desgastar gradativamente até que deixam de cumprir sua funcionalidade podendo até quebrar (TSCHÄTSCH, 2009).

Com a inevitabilidade do desgaste da ferramenta de corte e a imprevisibilidade de sua quebra, a troca antes de seu completo desgaste permite diminuir o risco de produção de peças com desvios geométricos provenientes desta fonte de erro, porém, o correto monitoramento da vida útil da ferramenta de corte consiste em buscar utilizar o máximo de seu poder de corte sem permitir a sua quebra, pois o desgaste das arestas de corte geram erros geométricos na superfície usinada, a quebra inutiliza a peça e pode danificar o centro de usinagem e a troca prematura das ferramentas de corte aumenta o custo e representa um desperdício de material (POLLI, 2005).

O monitoramento de processos de usinagem está, em grande parte, relacionado com a previsão de desgaste e quebra da ferramenta de corte. O monitoramento pode ocorrer sob dois aspectos: Direto e Indireto (CONTE, 2008). O primeiro representa aqueles que os dados avaliados são obtidos a partir de medições diretas na ferramenta de corte, compreendem uma análise sistemática da ferramenta através de inspeção visual ou sensores de visão, normalmente efetuados no preset. Os métodos indiretos ocorrem quando as informações referentes ao desgaste da ferramenta são estimadas a partir de outros meios de medição, como vibração do eixo do motor, emissão acústica do processo de fresamento, monitoramento da compensação da força de corte, dentre outros (POLLI, 2005).

Bombonato, Lustosa e Silva (2008) propuseram uma análise do desgaste da ferramenta de corte, e conseqüentemente seu monitoramento, via a análise por meio de uma rede neural, da emissão acústica do momento do fresamento. Ferraz Jr e Coelho (2004) propuseram um algoritmo de monitoramento de ferramenta de corte para ser utilizado em sua proposta de aquisição de dados de CNC de arquitetura aberta. O mesmo algoritmo foi utilizado por Conte (2008) ao desenvolver sua proposta de um sistema de monitoramento de dados em sistemas de usinagem em altas velocidades.

Quanto à localização, o desgaste da ferramenta pode ocorrer tanto na face da aresta (desgaste de cratera) quanto na sua periferia (desgaste de flanco), como mostra a Figura 22 (GROOVER, 2010).

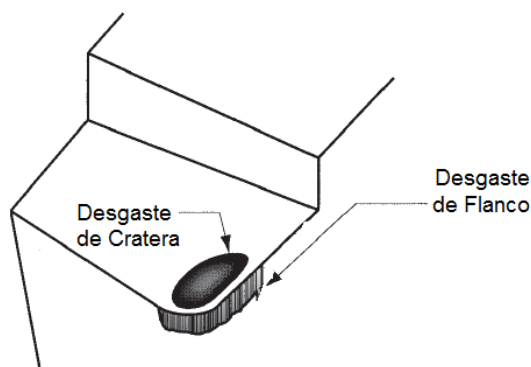


Figura 22: Desgaste de flanco e desgaste de cratera (Adaptado de GROOVER, 2010)

O processo de desgaste da ferramenta de corte é conhecidamente inevitável, o que se busca pelo monitoramento, além de se evitar a quebra e a troca prematura, é atenuar ou eliminar os vários fatores que podem acentuar esse desgaste, como por exemplo, o atrito, as vibrações, os efeitos térmicos e os efeitos químicos.

O processo de fresamento gera, inevitavelmente, vibrações e atritos que podem se apresentar sob dois aspectos básicos e naturais: Atrito entre o cavaco e a ferramenta de corte ou entre a ferramenta e a peça de trabalho. Outros fatores também podem causar vibrações, porém não podem ser considerados naturais por serem passíveis de se evitar, como as vibrações causadas por má fixação da ferramenta, por baixa rigidez do dispositivo de fixação, baixa rigidez axial da ferramenta, fixação irregular da mesa de trabalho e baixa estabilidade da *cadeia cinemática* do centro de usinagem (BOMBONATO; LUSTOSA; SILVA, 2008).

Todo o processo de atrito gera calor, e em fresamento o calor pode deformar tanto a geometria da ferramenta de corte, quanto a geometria da peça que está sendo usinada, gerando erros geométricos. Outra influência dos efeitos térmicos é criação dos fatores químicos associados ao desgaste de ferramenta, como adesão molecular, difusão e oxidação.

A adesão molecular se caracteriza pela criação de um extrato metálico entre a aresta e a superfície, quando esta trabalha a baixas velocidades e temperaturas. A difusão está associada a altas temperaturas da área de corte (em torno de 850°C a 1200°C) e se caracteriza pela transferência de átomos de um metal para outro e pode ser causada pela utilização de altas velocidades de corte, o que gera superaquecimento e faz com que a ferramenta de corte perca suas características de dureza e tenacidade. A oxidação é a modificação química da aresta de corte através de sua interação com o oxigênio do meio ambiente. Todos estes fatores podem gerar um fenômeno chamado aresta postiça, o que diminui a continuidade do contato da aresta de corte e da superfície (ALBANO, 2007; POLLI, 2005; SOUZA, 2006). Para diminuir a ocorrência destas fontes de erros é comum se utilizar fluidos do corte com ação lubrificante,

juntamente com o revestimento da superfície de corte com metais de baixo coeficiente de atrito (BOMBONATO; LUSTOSA; SILVA, 2008; SOUZA, 2004).

Quando um desgaste acentuado da ferramenta de corte é detectado várias ações podem ser adotadas para diminuir seus efeitos indesejáveis. Os controladores CNC mais modernos são capazes de alterar a velocidade de avanço de forma dinâmica a fim de se obter um avanço constante. Além de reduzir o tempo de usinagem em até 50% esta ação reduz o desgaste da ferramenta e do centro de usinagem devido à redução das forças de corte e pela redução automática do avanço na entrada e na saída da ferramenta de corte na área de trabalho (OLIVEIRA, A. C.; AHRENS; SCHROETER, 2003).

De acordo com Hoffman e outros (2012) os controladores CNC atuais também possuem espaços para inserir dados de desgaste de ferramenta bem como erros provenientes de deformações térmicas após o início de um processo de usinagem satisfatório denominado *Tool Wear Offset*, que permite estabelecer ajuste incremental de desgaste da ferramenta ao se alterar a relação entre a geometria da ferramenta a sua trajetória. O *preset* é um dispositivo de medição responsável por alimentar o sistema gerenciador de ferramentas presente nos centros de usinagem com informações relevantes das ferramentas de corte. Desta forma, o *preset* também é uma fonte de erros da etapa CNC, necessitando muitas vezes de um módulo de gerenciamento de ferramentas de corte (MATOSO; VALLE; JUNIOR, 2003; SILVA *et al.*, 2011). Os erros de *preset* são comuns e podem ter origem manual, quando o operador fornece informações ao sistema que são incompatíveis com a ferramenta de corte em questão, ou automática, quando a medição de uma determinada ferramenta de corte ocorre de forma insatisfatória e o sistema passa a operar com valores inconsistentes. Vale ressaltar que os erros de *preset* automático são mais raros que a inserções de valores de forma manual.

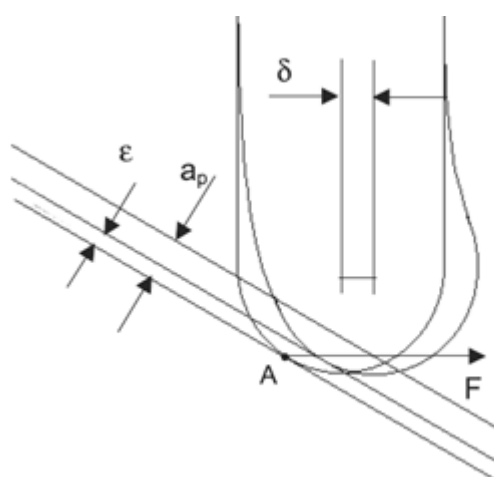
#### **b. Flexão da ferramenta de corte**

Este efeito é consequência das forças resultantes do processo de usinagem sobre a ferramenta de corte. Para cada componente de força de contato existente entre a ferramenta de corte e a superfície a ser usinada, existe um efeito em sentido contrário, que atuará sobre a ferramenta de corte, capaz de alterar a sua retilidade e o seu paralelismo em relação ao seu eixo principal. De acordo com Lopez de lacalle e outros (2004), a flexão da ferramenta tem papel direto na presença de erros dimensionais na peça de trabalho. O valor da flexão da ferramenta pode ser estimado a partir do conhecimento da resistência de materiais, da força exercida sobre a ferramenta de corte, do comprimento de balanço e do momento de inércia. O

comprimento de balanço é a distância medida entre a parte fixa da ferramenta e sua ponta, o momento de inércia é demonstrado na equação 12, a equação de flexão de ferramenta está na equação 13 e sua simplificação está na equação 14 conforme foi adaptado de (SOUZA, 2004).

Como o fator comprimento de balanço tem influência na flexão da ferramenta, em usinagens realizadas por ferramenta de topo, o fresamento frontal é mais propício a esses efeitos que o fresamento periférico. O módulo de elasticidade do material depende tanto do material da ferramenta de corte, quanto de efeitos como o calor proveniente do atrito no momento da usinagem e do desgaste de arestas.

O erro de flexão da ferramenta é responsável por contribuir com o surgimento de rugosidade na forma de sobremetal na direção de avanço da ferramenta, e este sobrematerial estará presente dentro da trajetória da ferramenta (Figura 23) (DORNFELD; LEE, 2008). O efeito da flexão de ferramenta na contribuição do desvio de forma, embora represente uma fonte de erro significativa, está associado a outras fontes de erros como, algoritmos de comando CNC, estrutura do centro de usinagem, escolha incorreta do comprimento da ferramenta de corte, escolha da velocidade de avanço, características do processo de usinagem etc., bem como pode influenciar outras fontes de erros como aumento de vibração, aumento de excentricidade, deformação e desgaste da ferramenta de corte (LOPEZ DE LACALLE *et al.*, 2004; SOUZA, 2004).



$$I = \frac{\pi \times D_c^4}{64} \quad (12)$$

$$\delta = \frac{F \times L^3}{3 \times E \times I}; \quad (13)$$

$$\delta = \frac{64 F L^3}{3\pi E D^4} \quad (14)$$

Figura 23: Relação do erro e flexão da ferramenta (LOPEZ DE LACALLE *et al.*, 2004)

### c. O gerenciamento da ferramenta de corte

As máquinas CNC modernas contam com uma função secundária de gerenciamento de ferramenta de corte. Trata-se de um módulo composto por *software* e *hardware* que tem como

função gerenciar as ferramentas de corte de acordo com: armazenamento, substituição, componentes de montagem, recondicionamento e condições de medição, monitoramento do tempo de vida e detecção de quebra.

A parte *software* está presente também na IHM com o módulo de entrada de informações, onde o operador pode informar ao sistema CNC características da ferramenta de corte, como dados da ferramenta, tempo médio de vida útil, início de utilização etc., bem como módulo de saída, onde o operador será informado sobre as condições atuais de cada ferramenta de corte presente no Centro de Usinagem. A parte *hardware* tem como função coordenar os componentes da máquina que irão executar as ações de medição, armazenamento e troca (SHIVANAND, 2006).

#### **d. Preset da ferramenta e a prevenção de falhas da ferramenta de corte**

O *preset* é o ato de medir sistematicamente a ferramenta de corte a fim de coletar informações como comprimento e diâmetro e auxiliar a compensação de trajetória de ferramenta, bem como prever o seu desgaste e tempo médio de vida. Alguns equipamentos CNC são equipados com aparelhos de *preset*, outros necessitam que suas ferramentas de corte sejam retiradas e medidas em equipamento específico para depois o operador entrar com os dados no sistema. A existência de um *preset* interno no equipamento CNC tem como vantagem a redução do tempo de *setup* quando existe a necessidade de medição da ferramenta antes de se iniciar o processo de usinagem, ou seja, o tempo que o sistema leva para carregar todas as informações necessárias para se iniciar um processo de usinagem quando a ferramenta tem que ser frequentemente calibrada, como em usinagens de precisão. Embora o que ocorre em condições normais de operação é apenas a entrada de dados da ferramenta de corte, por parte do operador, por meio do carregamento automático das informações das ferramentas de corte em uma operação específica no CNC.

A principal função do gerenciamento da ferramenta de corte é a prevenção a falhas oriundas desta peça. De uma forma geral a falha da ferramenta de corte está relacionada à sua vida útil, de forma que quanto mais se aproxima do limite máximo do tempo de vida, o que tem uma relação direta com o desgaste da ferramenta, o número de falhas tende a aumentar até o limite máximo de uso da ferramenta. As falhas da ferramenta de corte podem ser: Perda da exatidão dimensional (Comprimento ou diâmetro), perda de capacidade de corte devido a desgaste e ruptura de aresta (SHIVANAND, 2006).

Os erros de ferramenta de corte podem ser compensáveis de forma automática pelo próprio controle de CNC ou por modificação das trajetórias de ferramenta, porém, como descrito anteriormente, deve-se sempre evitar a ruptura da ferramenta de corte sob o risco de inutilizar da peça de trabalho.

### 2.3.5. Simulação da Usinagem

Os sistemas CAM atuais são capazes de simular a usinagem para que possa ocorrer uma antecipação dos possíveis erros na execução da trajetória da ferramenta. A simulação da usinagem, de acordo com Kwon; Tseng e Ertekin (2006), tem como função básica a prevenção de erros pelo ajuste das taxas de avanço e velocidade de corte, e tais ajustes são capazes de minimizar erros dinâmicos como vibração e erros térmicos. De fato, além desses fatores, a simulação da usinagem é um processo que pode agregar uma maior morosidade à etapa CAM, mas com a função prevenir colisões e interferências e prover uma trajetória de ferramenta mais otimizada, principalmente para estratégias de inclinação de eixo de ferramenta de corte que não implementam esses tipos de prevenção (SOUZA, 2011; WARKENTIN; ISMAIL; BEDI, 1998).

### 2.3.6. O Arquivo CL-Data

O principal objetivo do sistema CAM é fornecer informações de trajetória de ferramenta suficientes para a etapa CNC gerar os comandos necessários para o centro de usinagem executar o fresamento, estas informações são organizadas em um arquivo denominado CL-Data (*Cutter Location Data* – dados de localização da ferramenta de corte) que é basicamente um arquivo texto contendo as coordenadas dos pontos a serem visitados pela ferramenta. Ele ainda não representa um programa NC, pois, dentre outras características ainda não possui as informações inerentes à Centro de Usinagem nem ao sistema de controle, nem está um formato inteligível pelos equipamentos CNC (GROOVER, 2010; HANGOUËT, 1995).

O conteúdo do arquivo CL-Data é uma sequência de passos da ferramenta de corte em relação aos eixos de um sistema de coordenadas padrão. Cada passo  $CL(i)$  é composto por um vetor de posições  $p(i) = [x_i, y_i, z_i]^T$  e um vetor de direção normal  $n(i) = [v_x(i), v_y(i), v_z(i)]^T$  (NAGATA; KUSUMOTO; WATANABE, 2009).

O arquivo CL-Data, sob uma visão simplista, pode ser considerado um arquivo genérico, que ainda pode ser processado por qualquer Centro de Usinagem e gerar a mesma superfície



sob a mesma estratégia definida no CAM, embora na prática, no momento da criação de tais estratégias as características do centro de usinagem e da ferramenta de corte compreendem a base de informações levada em consideração pelo operador CAM.

O a trajetória da ferramenta definida no arquivo CL-Data é uma sequência de pontos que devem ser percorridos pela ferramenta de corte através de um método de interpolação. Existe uma relação direta entre o método de interpolação escolhido, a tolerância definida pelo operador do CAM, o tempo de usinagem e os desvios existentes entre a trajetória da ferramenta e a geometria ideal definida no modelo nominal. Sob este ponto de vista a escolha do método de interpolação pode ser considerada uma decisão de projeto que tem impacto direto nos custos de produção, e que deve levar em consideração o equipamento CNC a ser utilizado já que altera o tamanho do arquivo CL-Data gerado, e conseqüentemente com o tempo de processamento do bloco NC. Uma vez que a trajetória da ferramenta contida no arquivo CL-Data esteja dentro das tolerâncias estabelecidas pelo operador do CAM, a escolha do método de interpolação não pode, por padrão, inserir fontes de erros presentes na cadeia CAM/CNC, porém modificações na trajetória da ferramenta são utilizadas para gerar métodos de compensação de erros de etapas subsequentes cujos comportamentos podem ser previstos.

## 2.4. O Controle CNC

A etapa CNC tem como contribuição de erros para a geração de superfícies de forma livre três partes básicas. Porém, o orçamento desta etapa possui forte ligação com a etapa CAM, pois além de transformar o conteúdo do CL-Data em dados CN-Data, a partir do pós-processamento, se utiliza dos controles por *Hardware* e *Software* para gerar os comandos que farão o servomotores conduzirem a ferramenta de corte pela trajetória da ferramenta estabelecido na etapa CAM (CHENG; TSAI; KUO, 2002; LEI; HSU, 2003). A Figura 24 demonstra a relação das principais fontes de erros avaliadas para o presente trabalho que podem ser associadas ao controle CNC. Observa-se que a forma de se exercer o controle em relação ao posicionamento dos sensores, a linguagem que será utilizada para ser interpretada pelo CNC e os erros de aceleração e desaceleração representam o conjunto de fontes de erros nesta etapa. Acrescenta-se nesta etapa o pós-processamento que pode ser, de forma simplista, explicado como a junção das informações de estratégia de fresamento com as informações do centro de usinagem que se deseja utilizar. Tais fatores serão mais bem explorados nos próximos parágrafos.

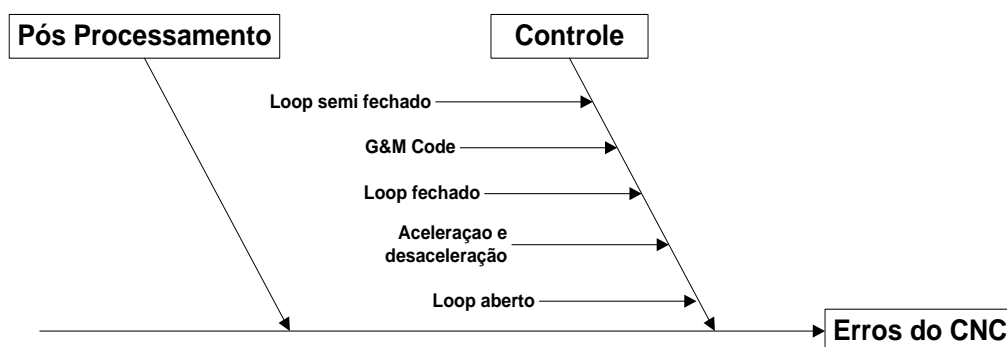


Figura 24: Relação das fontes de erros do controle CNC

No fresamento de superfícies de forma livre controle se torna parte importante para garantir a exatidão geométrica das superfícies geradas. O controle é executado diretamente sobre eixos do centro de usinagem, alterando constantemente sua velocidade e posicionamento de forma que a diferença entre o que está sendo comandado e o que está sendo realmente executado seja minimizada. Conforme descrito em Groover (2010); Overby (2010) e Suh *e outros* (2008), a primeira classificação do sistema de controle se dá pela presença e localização de sensores na coleta de informações que irão ou não realimentar o sistema.

- **Controle de loop aberto:** Quando não existe a presença de sensores dedicados à coleta de informações. Normalmente são utilizados em sistemas que possuem motores de passo e empregam baixo torque e pequeno movimento (normalmente ponto a ponto) para garantir que as condições no ambiente de usinagem não sejam capazes de proporcionar um desvio acentuado na operação dos eixos, o que gera uma limitação de carga ao se utilizar deste tipo de arquitetura.
- **Controle de Loop Semifechado:** Caracteriza-se pela presença do sensor de posicionamento acoplado diretamente no eixo do motor. Este tipo de sensoriamento tem dependência da exatidão alcançada pela própria exatidão do eixo. Erros de folga ou de *pitch* (exatidão do passo do fuso) podem ser compensados pelo sistema NC. De fato, a ineficácia deste tipo de compensação está relacionada ao aumento gradativo do erro de folga e de *pitch* em presença de cargas e calor respectivamente (Figura 25 A).
- **Controle de Loop Fechado:** Caracteriza-se pela presença do sensor de posicionamento diretamente na mesa de trabalho. Este sistema foi desenvolvido para evitar a compensação dos erros de folga e de *pitch*. A modificação de

posicionamento do sensor de posição elimina o erro de folga do fuso, porém, o corpo da máquina passa a ser utilizado como parte integrante do sistema de medição, desta forma, erros como frequência de ressonância do corpo da máquina, deslize da mesa de trabalho e perda do movimento são características que passam a influenciar o sensor e precisam ser tratadas (KOREN; LO, 1992). Ao contrário do erro de exatidão do fuso, onde o sensor pode dar uma informação de posicionamento que não condiz com a realidade, o erro no *loop* fechado ocorre na forma de *following error*, que significa que o sensor informa uma posição real que não foi a estabelecida pelo comando CNC. Isto ocorre devido ao atraso entre o envio do sinal de posicionamento alcançado e a parada do motor pelo controle devido a atrasos de detecção processamento do sinal. Este tipo de erro é diretamente proporcional à razão entre a velocidade do fuso e ao processamento do sinal do sensor (Figura 25 B).

- **Controle de *Loop* Híbrido:** Este tipo de controle se caracteriza pela presença de sensores tanto no eixo do servo motor, que minimiza a probabilidade de *following error*, quanto na mesa de trabalho, que minimiza a probabilidade de erro de inexatidão de eixo (Figura 25 C).

De acordo com Overby (2010) e Conte (2013) o controle de um Centro de Usinagem é executado por um sistema mecatrônico que pode ser subdividido em dois tipos básicos: *hardware*, que é a união dos componentes mecânicos e eletroeletrônicos, e *software*, que representa o conjunto de programas computacionais empregados para gerar códigos eletrônicos, que serão interpretados pelo controle por *hardware* a fim de movimentar as diversas partes da máquina, bem como permitir a comunicação entre o ambiente interno da máquina e o operador. A partir de uma análise funcional, um CNC pode ser subdividido em uma Interface Homem Máquina (IHM), o Núcleo de Controle Numérico (NCN) e um Controlador Lógico Programável (CLP).

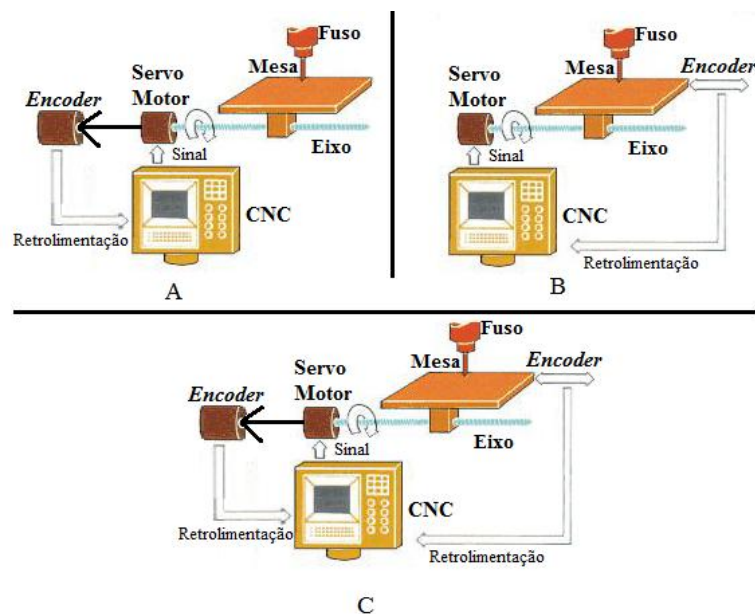


Figura 25: Tipos de controle CNC (Adaptado SOUSA, 2000)

Conforme descrito na Figura 26, a IHM é responsável pela interação entre o operador e o equipamento, é composto por uma parte programa e por parâmetros de máquina que são responsáveis por alimentar o NCN com informações inseridas pelo operador. A IHM também é responsável por fornecer informações de diagnóstico e dos diversos serviços executados no CNC (SUH, S.-H. *et al.*, 2008).

A Figura 26 também demonstra o controle por hardware que compreende os componentes físicos necessários na conversão de comandos de softwares em sinais elétricos que irão posicionar os diversos mecanismos de movimentação da máquina, como os processadores das IHM e NCN, equipamentos de controle de velocidade, *encoders*, amplificadores, dispositivos de entrada da IHM como mostradores, teclados dentre outros (SUH, S.-H. *et al.*, 2008). A Tabela 3 mostra, de forma resumida, a transição entre a parte programa e a parte mecânica até a os servomotores. A parte programa termina no controle homem máquina (CHM), todas as outras etapas subsequentes são relacionadas à parte de controle por hardware, embora possam ter sua origem também na parte do programa.

O NCN é composto pelo compilador, interpretador e o interpolador, enquanto os dois primeiros trabalham em conjunto para validar e traduzir os comandos fornecidos pela IHM para o código interpretável pela máquina, o interpolador é responsável por interpolar os pontos presentes na parte programa, bem como seus parâmetros, e gerar comandos que serão utilizados para acionar os motores de forma a direcionar a ferramenta de corte de acordo com o que foi estabelecido pelo programa NC (SOUSA, 2000). É também uma responsabilidade

do NCN se coordenar os diversos tipos de controle (*Hardware e Software*), prover as compensações automáticas e repassar informações internas do sistema CNC para a IHM.

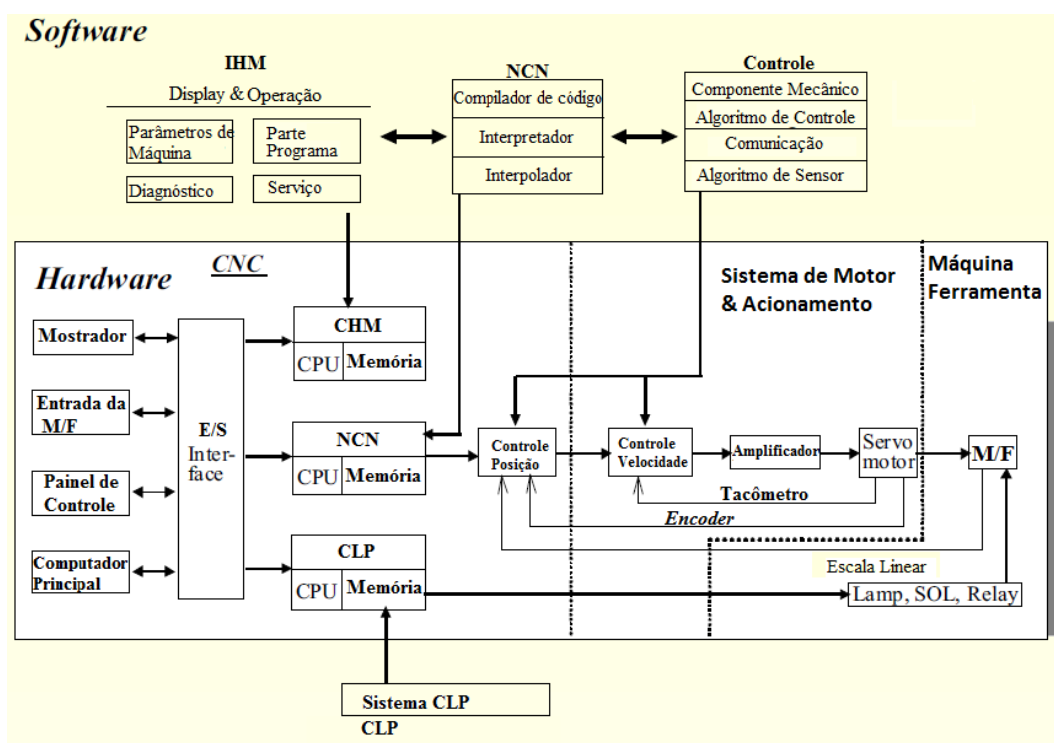


Figura 26: Descrição do controle a partir da descrição de *Software* e *hardware* (Adaptado de SUH, S.-H. *et al.*, 2008)

O CLP é um controlador baseado em microcomputador que utiliza instruções armazenadas em memória de forma a auxiliar o NCN. O CLP normalmente é utilizado para executar o controle de troca de ferramenta de corte, velocidade do fuso, troca da peça que está sendo usinada, os sinais de entrada e saída da interface do Centro de Usinagem, painel de controle e IHM, bem como assume o controle do comportamento do centro de usinagem em caso de uma exceção do controle exercido pelo NCN, ou seja, em caso de uma pane do sistema principal do centro de usinagem o CLP deve entrar em ação para evitar um comportamento que a danifique (GROOVER, 2010; SUH, S.-H. *et al.*, 2008).

Outro conceito importante é a definição de que existem duas principais formas de se melhorar a exatidão de Centros de Usinagem, uma é denominada tecnologia de prevenção de erros e se caracteriza pelo melhoramento de componentes mecânicos, como controladores por hardware com melhor desempenho, maior a rigidez da mesa de trabalho, dispositivos de comunicação mais rápidos etc. outra é denominada tecnologia de compensação de erros que significa modelar os possíveis erros presentes no processo de usinagem e tentar, via software, gerar estratégias capazes de diminuir ou anular estes fenômenos. De acordo com Shen e

outros (2012) efetuar o controle de erros através de métodos de compensação, geralmente representa um baixo custo de investimento em novos componentes eletrônicos com resultados satisfatórios na geração de superfícies de forma livre, desta forma, estes métodos têm se tornado foco de pesquisas em tecnologia de usinagem em alta precisão.

Tabela 3: Sequência CNC (SUH, S.-H. *et al.*, 2008)

|                                   |                                                           |                                                                                                                                                                  |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CHM (Controle Homem Máquina)      | Gerar o programa NC<br>Carregar o programa                | <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">           Programa NC<br/>G00 X150 Z300<br/>G54 D0 M3 M8         </div> |
| NCN (Núcleo de Controle Numérico) | Interpretador de código<br>Compensação de ferramenta      | ↓<br>Interpretador                                                                                                                                               |
|                                   | Geração de dados de movimentação                          | ↓<br>Interpolação                                                                                                                                                |
|                                   | Aceleração e desaceleração                                | ↓<br>Controle Acc/Decc                                                                                                                                           |
|                                   | Compensação de erros de folgas/inclinação<br>Controle PID | ↓<br>Controle de Posicionamento                                                                                                                                  |
| DRV                               | Controle de Servo motores e drivers                       | ↓<br>Controle de Velocidade                                                                                                                                      |

#### 2.4.1. Pós Processamento

De forma semelhante à etapa CAM, a última saída da etapa CNC é a geração do arquivo de dados do controlador numérico (NC-Data, *Numerically Controlled Data*). Isto significa que todas as informações descritas no arquivo CL-Data serão convertidas em comandos interpretáveis pelo equipamento CNC e serão processadas de acordo com as características específicas do centro de usinagem e da ferramenta de corte que será utilizada. Desta forma, cada tipo de Centro de Usinagem juntamente com cada conjunto de ferramentas de corte escolhida deverá ser atendido por um tipo específico de pós-processamento de forma a respeitar as características de sua cadeia cinemática (NAGATA; KUSUMOTO;

WATANABE, 2009; SHE; CHANG, 2007). Isto significa que nesta fase serão inseridas as informações inerentes ao centro de usinagem, bem como à ferramenta de corte e será avaliado se as decisões e estratégias selecionadas pelo operador poderão ser de fato aplicadas (HOFFMAN *et al.*, 2012; WARKENTIN, 1998). Neste momento é comum se observar e tratar os erros referentes à malha de controle e de posicionamento de eixo. De uma forma geral, uma superfície gerada nas etapas CAD – CAM pode ser usinada em qualquer Centro de Usinagem apenas se alterando o cálculo do pós-processamento. Os sistemas de pós-processamento atuais contam também com algoritmos de verificação e correção de erros, como compensação por desgaste de ferramenta ou erros de máquina, desde que esses sejam devidamente alimentados no sistema na forma de um ensaio geométrico (SOUSA, 2000). Warkentin (1998) descreve a etapa de pós-processamento como a etapa em que os diversos sistemas de coordenadas são definidos de forma a permitir a transformação de dados presentes em um determinado sistema de coordenadas em outro sistema de coordenadas sem que os pontos de referência sejam perdidos. Esta transformação de sistemas de coordenadas ocorre de forma sequencial, partindo da peça, em seguida passando para o centro de usinagem e terminando na definição do sistema de coordenadas da ferramenta de corte.

Na programação de um Centro de Usinagem o movimento de cada eixo necessita ser orientado a se posicionar em um ponto específico de um sistema de coordenadas pré-estabelecido. Posicionamento e orientação são efetuados pelo trabalho em conjunto dos dois tipos de controle citados anteriormente, o controle por software e o controle por hardware.

O controle por software necessita de um espaço de referência para indicar ao controle por hardware como e quanto movimentar os eixos do centro de usinagem a fim de alcançar um ponto desejado. Para isso o volume total de movimentação de todos os eixos é explorado e modelado matematicamente tanto por eixo individualmente quanto em conjunto. O modelo cinemático mais comum de um Centro de Usinagem é baseado na notação de Denavit-Hartenberg, a qual descreve a posição e orientação relativa entre dois ligamentos consecutivos, baseado na utilização das matrizes de transformadas homogêneas (HTM, *Homogeneous Transformation Matrix*). Esta notação permite a orientação relativa entre a ferramenta de corte e a peça de trabalho como uma função de coordenadas conjuntas (ABBASZADEH-MIR; MAYER; FORTIN, 2003).

Para que as interações entre o centro de usinagem e a peça de trabalho sejam corretamente analisadas, dois sistemas de coordenadas distintos são estabelecidos. O sistema de coordenadas da máquina descreve as orientações da ferramenta de corte entre os eixos  $X_m$ ,  $Y_m$  e  $Z_m$  enquanto o sistema de coordenadas para a peça de trabalho é definido pelos eixos  $X_w$ ,

$Y_w$  e  $Z_w$  que são conectados entre si pela *cadeia cinemática*. Os eixos de rotação A (ao redor de X), B (ao redor de Y) ou C (ao redor de Z) possuem suas definições dependentes do tipo do centro de usinagem modeladas. Por exemplo, nas máquinas RRFTTT os eixos de rotação são sobre a mesa de apoio da peça de trabalho e, por isso, alteram a orientação do sistema de coordenadas da mesa. Para as máquinas FTTTRR os eixos de rotação estão dispostos no eixo Z e não alteram a orientação circular do sistema de coordenadas da peça. O entendimento destes sistemas de coordenadas é muito importante no momento de passagem entre as informações das estratégias de medição e criação das trajetórias de ferramenta para os controladores de software e de hardware do centro de usinagem para que códigos de máquina sejam gerados.

O arquivo NC gerado pela etapa de pós-processamento normalmente segue ao padrão descrito na ISO 6983, mais conhecido como G-code, é um arquivo que contém todas as funções que serão interpretadas pela parte programa do controlador NC (controle por *software*) e permitirá a criação dos códigos de máquina que controlará os eixos (controle por *hardware*).

#### 2.4.2. O arquivo G-code

O G-code é uma linguagem alfa numérica baseada em código de texto simples interpretável pelo controle do CNC. É considerada a linguagem padrão na indústria de Centro de Usinagem estando presente na maioria dos equipamentos CNC atuais. Por ser extensível, pode ser adaptada de acordo com as preferências de cada fabricante de equipamento, com a implementação de novas funções ou modificação das funções já existentes de forma a melhorar a integração com o interpretador como controlador NC, no entanto, em seu núcleo padrão já existe um conjunto de funções que permitem realizar as operações mais comuns de um Centro de Usinagem (OVERBY, 2010; SUH, S.-H. *et al.*, 2008).

Apesar de ser possível escrever um arquivo G-code de forma manual, isto não é uma tarefa usual, normalmente o pós-processamento gera automaticamente estes códigos. Em casos em que é necessário efetuar alteração, algumas IHM contam com um editor. As funções mais comuns dos arquivos G-code são (SUH, S.; LEE; JUNG, 1998; ZHAO; XU; XIE, 2008):

- **Interpolação:** A função que informa ao controle CNC qual o tipo de interpolação deve ser utilizada. As interpolações mais comuns são: linear, circular, helicoidal e spline. Alguns fabricantes já desenvolveram as interpolações NURBS.



- **Função de avanço (F-code):** informa ao controlador qual será a velocidade de avanço, podendo ser avanço por minuto (mm/min) ou avanço por revolução (mm/rev). Uma vez declarada, a informação de avanço fica fixa até que outra informação de F-code seja declarada.
- **Função de ferramenta (T-code):** informa as características da ferramenta de corte no magazine de ferramentas. Esta função é normalmente utilizada para executar a compensação de ferramenta de corte por *software*, como por exemplo, a associação de parâmetros para a compensação de raio.
- **Função de comportamento (M-code):** são funções que definem o comportamento da máquina que não estão relacionados diretamente com o comportamento dos servomotores, como controle do fluido de corte, pausa temporária do programa, final de programa, repetição de programa etc.
- **Funções de fuso (S-code):** quando selecionada, informa ao controlado a maior velocidade que o fuso pode alcançar. Semelhante à função de avanço, esta função só é substituída quando uma nova função S-code é escolhida.

Os equipamentos CNCs processam os blocos de comandos de forma sequencial, o que pode criar uma aceleração e desaceleração, por parte do controle, para cada bloco processado. Estas constantes acelerações e desacelerações prejudicam todo desempenho do processo de usinagem, desta forma, uma função especial denominada *look ahead* foi desenvolvida para manter a taxa de avanço constante. O controle passa a analisar um conjunto grande de blocos a fim de calcular a taxa de avanço máxima para todo o conjunto e criar condições para que o avanço permaneça constante (HELLENO, 2008).

O G-code ainda é um conjunto de códigos CNC bem aceito em processos de usinagem por permitir, além de descrições completas de todos os movimentos possíveis do centro de usinagem, as informações sobre taxa de avanço e velocidade de rotação do eixo principal, e até mesmo as possíveis trocas de ferramenta de corte no meio do processo, bem como informações de inspeção de máquinas e dos caminhos gerados (ZHAO; XU; XIE, 2008). Porém, de acordo com Suh e outros (2008), o padrão G-code tem se tornado um gargalo para sistemas de manufatura baseados em informação, como, por exemplo, um sistema colaborativo de manufatura distribuída. Nestes casos eles citam que os maiores problemas do G-code são:

- **Perda de informação:** como descrito anteriormente, as funções G-code são definidas por letras simples (G, T, M, F, S) que apenas sinalizam ao controle por *Software* como se movimentar e, conseqüentemente, sem qualquer conhecimento sobre a operação que está sendo executada. Esta característica pode ocasionar perda de informação sem a capacidade de recuperação de erros ou um controle maior de movimentação no momento do processamento.
- **Dificuldade de rastreabilidade:** o G-Code representa uma dificuldade de entendimento por parte do operador do CNC por ser, de forma semelhante ao problema anterior, um conjunto de códigos de especificação de movimento de ferramenta de corte, eixos etc. Esta baixa legibilidade dificulta a identificação de erros no código bem como a correção manual caso um erro seja identificado. Este problema seria superado caso o G-Code fosse um código que fosse interpretável em alto nível pelos CNCs.

Para diminuir possibilidade de erro, os interpretadores CNC contam com um módulo de compensação automática de erro da parte programa, isto é, o interpretador possui um módulo denominado *handler* de erro, que tenta compensar um erro identificado no G-Code refazendo uma interpolação ou adicionando pontos na trajetória da ferramenta com o intuito de melhorá-lo, por exemplo, a partir da suavização de uma curva, para compensar uma diferença de diâmetro de ferramenta (VAHEBI NOJEDEH; HABIBI; AREZOO, 2011).

Todavia o G-code é uma linguagem que já possui cinquenta anos de criação, e com o intuito de atender aos avanços das tecnologias de *hardware* e *software*, foi desenvolvida uma extensão do padrão STEP para ser utilizada em máquinas NC como alternativa ao padrão G-code (DERELI; FILIZ, 2002; DESHMUKH *et al.*, 2008; ZHANG *et al.*, 2011). A ideia básica é permitir que a mesma integração entre os sistemas CAD/CAM promovida pelo padrão STEP seja expandida para as necessidades das máquinas NC, para que as informações de entradas do centro de usinagem possam ser inseridas no modelo conceitual do produto. A intenção final é permitir a criação de um único arquivo contendo as informações geométricas, as estratégias de manufatura, como por exemplo, o tipo de contorno ou o método de interpolação, e as estratégias de fabricação, como seleção de ferramenta e fixação da mesa de trabalho. Outra importante característica é a possibilidade de alterações e inspeções em uma etapa subsequente à criação das estratégias CAM. Em outras palavras, o modelo nominal criado no CAD pode ser completamente importado pelo CAM, tratado e enviado diretamente para o CNC onde poderá ser avaliado quanto ao comportamento dinâmico do centro de

usinagem e das fontes de erros presentes em todo o processo, como, por exemplo, MMCs equipadas com CNC (ZHAO; XU; XIE, 2008). A Figura 27 representa uma comparação entre um bloco G-code com um bloco com o padrão STEP-NC, onde é possível perceber as diferenças entre as linguagens G-code e o novo padrão STEP-NC.

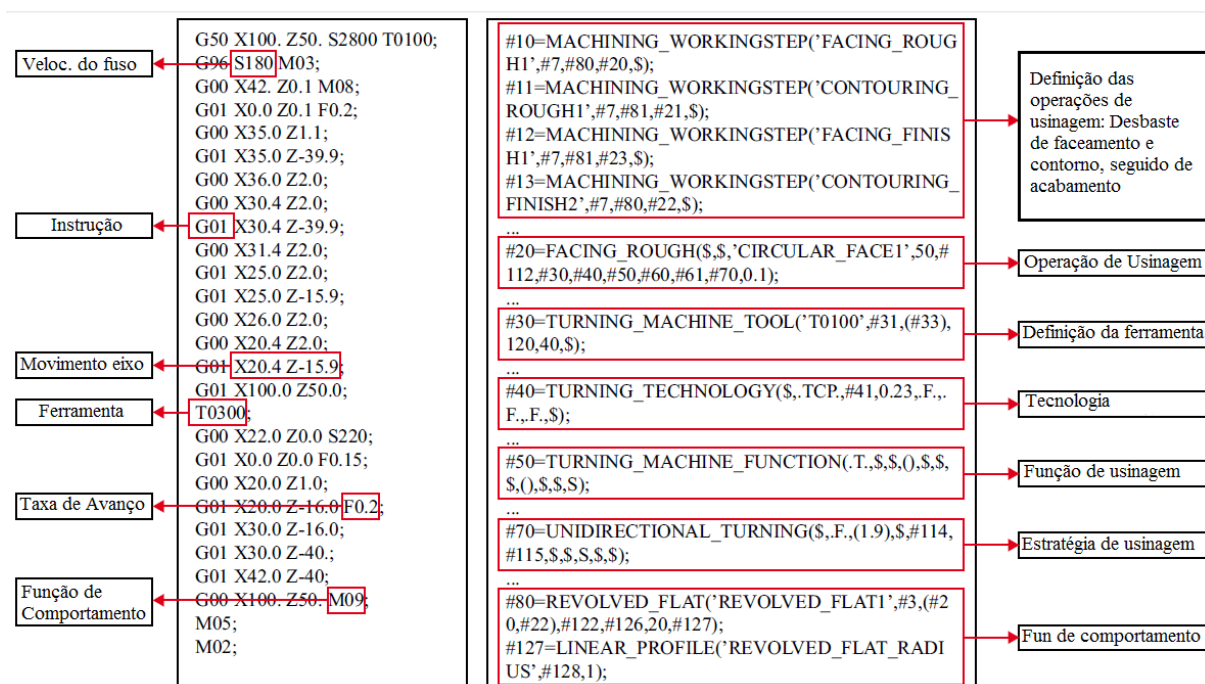


Figura 27: Comparação entre um programa G-code e um Step NC (SUH, S.-H. *et al.*, 2008)

## 2.5. Usinagem com Centros de Usinagem

O orçamento de erros presentes na etapa CNC-Centro de Usinagem serve para calcular o grau de influência de uma determinada parte ou comportamento indesejado da máquina sobre a produção de superfícies de forma livre. De acordo com a Figura 28 a forma mais comum de se avaliar a influência dos erros que pertencem à transição CNC-Centro de Usinagem, é prover a separação de seus erros em três grandes classes.

- A primeira classe está relacionada à dinâmica de corte e formação de cavaco. Esta classe tem ligação direta com processos de vibração, alteração da trajetória da ferramenta, parâmetros de usinagem e podem influenciar negativamente todos os outros aspectos da operação do centro de usinagem (BUDAK, 2006b; FERRARESI, 1977; POLLI, 2005).

- A segunda classe reúne todas as fontes de erros presentes no CNC ou no centro de usinagem que são estáticos ou variam lentamente ao longo do tempo, denominados erros quase estáticos (KOREN; LO, 1992).
- A terceira classe reúne todos os erros que são dependentes de uma condição de operação específica, surgem rapidamente e são denominados aqui como erros dinâmicos (DORNFELD; LEE, 2008; HARRIS, 2004; SARTORI; ZHANG, 1995).

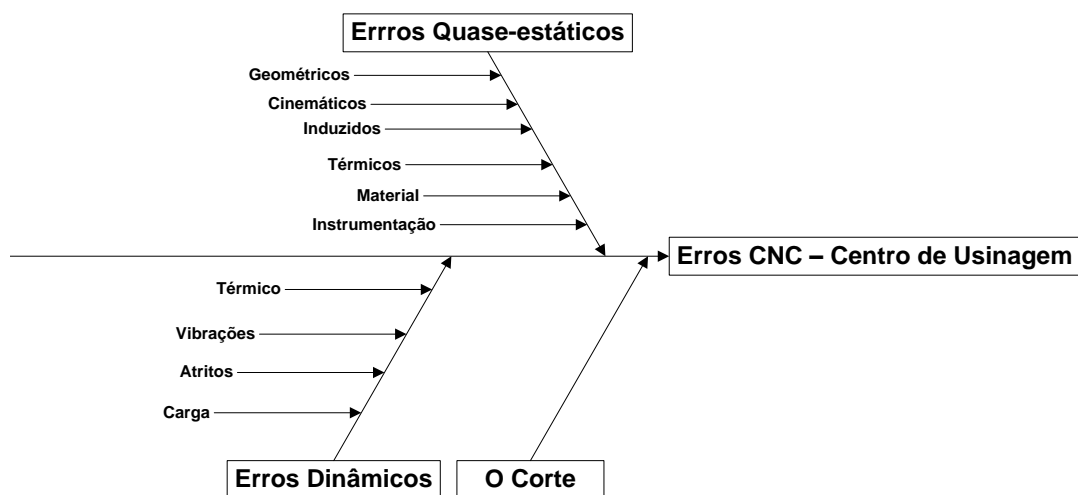


Figura 28: Orçamento de erros da transição CNC-Centro de Usinagem

### 2.5.1. O Corte

A análise do corte no fresamento é uma importante ferramenta no levantamento de erros, pois embora um erro possa decorrer de vários fatores em diversas etapas do processo de usinagem, este só aparecerá se o corte efetuado na superfície da peça ocorrer de forma a gerar desvios geométricos desta em relação ao seu modelo nominal. Outra característica importante do estudo do corte é que o próprio ato de cortar uma superfície constitui fontes de erros básicas e inerentes ao processo, como geração de calor, flexão da ferramenta e da cadeia cinemática da máquina devido às forças de usinagem, vibrações, desgaste de ferramentas dentre outros.

Desta forma, a dedução de tais características permite que as fontes de erros sejam tratadas no sentido de serem diminuídas ou compensadas até que alcancem valores tão mínimos quanto o permitido pela faixa de tolerância (RAMESH; MANNAN; POO, 2000).

### a. Força de corte e formação de cavaco

A análise das forças de corte é um requisito fundamental na previsão do comportamento dinâmico dos centros de usinagem, bem como, na avaliação dos sistemas de fixação e no planejamento dos processos de usinagem. De fato este estudo é de fundamental importância para a pesquisa e desenvolvimento de modelos de otimização, monitoramento e controle de processos de fresamento, sendo também frequentemente um elemento chave para o entendimento da cinemática e da dinâmica dos processos de usinagem (POLLI, 2005). Entretanto, a criação de um modelo realístico das forças de corte é uma tarefa complexa devido à grande quantidade de interações e resultantes existente no processo (BOZ; ERDIM; LAZOGLU, 2011; OVERBY, 2010).

Nos processos específicos de fresamento, as forças de corte podem causar deflexões tanto na peça como na ferramenta, de forma a induzir a trajetória da ferramenta a violar as tolerâncias estabelecidas. A grande dificuldade neste aspecto é que o fresamento é, por definição, um processo de corte interrompido onde a aresta de corte se choca repetidamente contra a superfície usinada para a retirada do cavaco. Desta forma, mesmo sob um ambiente de condições de corte estável, os dentes da ferramenta estão sempre em processo de produzir vibrações, calor e, conseqüentemente, deformações na *cadeia cinemática* e no sistema de controle da máquina. Estes três aspectos são as principais fontes de erros provenientes do processo de corte (TSCHÄTSCH, 2009).

De acordo com Helleno (2008) uma manufatura eficiente, com padrões de qualidade e de tempo satisfatórios, deve avaliar as ações das forças de corte a fim prever o comportamento dinâmico de partes atuantes no processo de fresamento, como a potência do eixo-árvore do centro de usinagem, o efeito das flexões na ferramenta de corte, os desvios geométricos e dimensionais da superfície usinada.

Devido à dificuldade de garantia dessas deduções, alguns autores utilizam três principais abordagens a fim de se alcançar as forças de corte resultante em processos de usinagem: empírica, analítica ou mecânica e mecanicista (LIMA; ARAUJO; SILVEIRA, 2012). Porém alguns autores como Kwon, Tseng e Ertekin (2006) e Newby (2005) entendem que a análise empírica sempre deve ser utilizada em alguma etapa na modelagem das forças resultantes de corte devido à inexistência de modelos matemáticos universais capazes de avaliar o controle de processos em usinagem de metal.

A análise empírica se baseia em um determinado número de execuções, de experimentos e medições com o intuito de adquirir e prever o comportamento do processo de usinagem, como

força de corte, vida útil e desgaste da ferramenta de corte, limite das cargas suportadas no eixo árvore sem o comprometimento da trajetória da ferramenta etc. Tais resultados são correlacionados com as condições de usinagens que foram executadas de forma a prever, dentro de uma margem de incerteza conhecida e aceitável, qual o comportamento do centro de usinagem quando tais condições se repetirem ou se combinarem (NEWBY, 2005).

A avaliação das forças de corte sob o ponto de vista mecânico, também conhecido como analítico, visa modelar o comportamento físico do contato entre a aresta de corte da ferramenta e a superfície que da peça a ser usinada. A análise mecanicista é a mais comum entre as avaliações dos processos de usinagem, o seu foco principal é determinar os modelos de avaliação de forças de corte a partir das consequências de suas ações, como avaliação do cavaco gerado a partir de certas condições de usinagem. A grande vantagem dessa abordagem é a não exigência de conhecimentos específicos sobre as origens das forças envolvidas no processo, pois a modelagem ocorre a partir da avaliação de seus efeitos. O que ocorre na prática é que toda avaliação corre sob as três abordagens sendo uma em foco principal e as outras duas sendo utilizadas como suporte aos resultados encontrados (BOZ; ERDIM; LAZOGLU, 2011; NEWBY, 2005).

De acordo com Budak (2006) o mesmo modelo de forças de usinagem pode ser utilizado sob os aspectos de avaliação analítico ou mecanicista. Ambos serão analisados a partir da visão de uma secção transversal do processo de fresamento, onde as forças resultantes serão decompostas, principalmente, no sentido do eixo da ferramenta de corte, da tangente do contato entre a aresta de corte e a peça e no sentido do raio da ferramenta de corte. A diferença está justamente no fato do modelo analítico tentar modelar matematicamente a decomposição da força de usinagem total em todas as suas principais direções e associá-la a área do plano de cisalhamento, enquanto um modelo mecanicista tentará associar estas decomposições à espessura do cavaco gerado e, por este motivo, depende da calibração dos coeficientes de força para cada conjunto composto pela ferramenta de corte e material da peça.

A vantagem da criação de um modelo mecanicista é capacitar o operador a gerenciar o processo de manufatura a partir do ponto de vista da eficiência e controle de qualidade, sem alocar recursos insuficientes ou aumentar demasiadamente os custos de produção através da alocação de recursos excessivos (ROTH; ISMAIL; BEDI, 2003).

A equação 15 é a básica da modelagem da força de corte sob o aspecto mecanicista é:

$$F = K_c b h + K_e b \quad (15)$$

Onde  $K$  é uma constante de proporcionalidade determinada experimentalmente, isto é, a pressão específica da aresta de corte efetivo sobre a superfície usinada,  $b$  é o comprimento da aresta de corte efetivo e  $h$  é a espessura do cavaco instantâneo. Também é possível estimar a força de corte a partir da relação entre a aresta efetiva e a espessura do cavaco como a equação 16 (BUDAK, 2006b):

$$F = K_c \frac{Q}{v} + K_e b \quad (16)$$

Onde a fração  $Q / v$  representa a razão entre a taxa de remoção de material instantânea  $Q$  e  $v$  a velocidade de corte tangencial da ferramenta (ROTH; ISMAIL; BEDI, 2004).

De forma geral, os modelos de mecânica de corte são divididos em ortogonal e oblíquo e possuem como característica comum o fato de se basearem no corte de metais a partir de ferramenta de corte de metal duro ou aço rápido, bem como promoverem o processo de formação de cavaco nos seguintes passos (FERRARESI, 1977):

- A cunha da ferramenta é forçada a provocar uma penetração na peça, onde uma pequena porção de material da peça é recalcada contra a superfície de saída da ferramenta. Vale salientar que a cunha de corte é caracterizada pelo seu ângulo de gume  $\beta$ , cujo ângulo é diretamente proporcional à sua resistência e inversamente proporcional à facilidade de penetração no material da peça.
- O aumento da tensão entre a cunha e o material recalcado cria neste uma deformação plástica, que forçará um deslizamento entre a porção de material recalcado e a peça sem que haja uma perda de coesão. De uma forma padrão, e com o intuito de facilitar o tratamento matemático dado à formação do cavado, a área de deslizamento é entendida como similar a um plano, denominado como plano de cisalhamento, e seu tempo de formação é tido como instantâneo. De forma semelhante, o material deslizado também se assemelhará a um plano e dependerá de características específicas do material que compõe a peça e será denominado como plano de cisalhamento dos cristais. E ainda de acordo com Ferraresi (1977) o processo de formação do cavaco, nestas condições, é um fenômeno periódico ainda que se formem cavacos contínuos. O ângulo entre estes dois planos é definido como ângulo de cisalhamento  $\phi$  como demonstrado na Figura 29.
- O movimento relativo entre a ferramenta de corte e a peça criará uma ruptura parcial ou total da área de cisalhamento que dependerá da ductibilidade do material e dos

parâmetros da usinagem, e por fim, a porção rompida irá deslizar sobre a superfície de saída da ferramenta de corte enquanto outro plano de cisalhamento instantâneo se inicia. Este processo é contínuo enquanto houver um contato entre a aresta da ferramenta de corte e a peça usinada (POLLI, 2005).

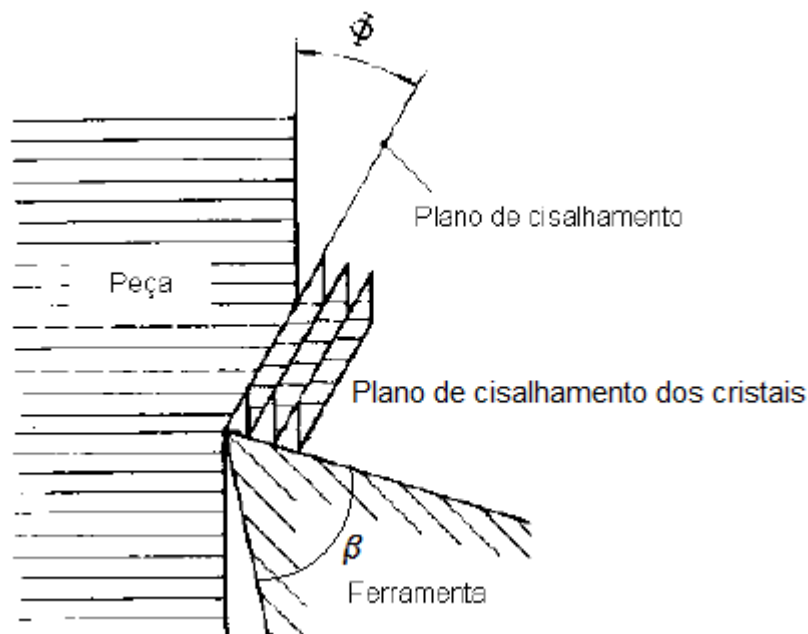


Figura 29: Representação do plano de cisalhamento adaptado de (FERRARESI, 1977)

A diferença entre o modelo ortogonal e oblíquo está no ângulo de contato entre o gume e a peça conforme demonstrado na Figura 30. Esta alteração de ângulo tem interferência direta na formação do cavaco, na decomposição das forças de usinagem e, por fim, na dificuldade de modelagem de tais forças como auxílio ao mapeamento dos erros de usinagem decorrentes do fenômeno de formação do cavaco (CARDOSO, 2012).

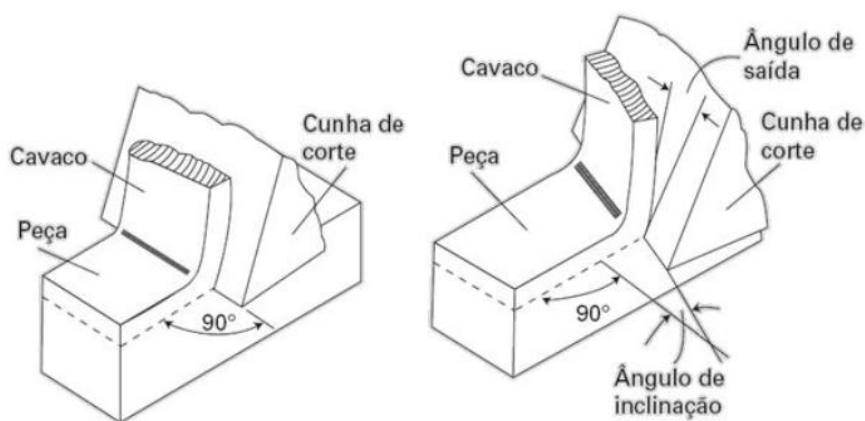


Figura 30: Diferença entre corte ortogonal e oblíquo (CARDOSO, 2012 apud FERRARESI, 1977)



Pressupondo um grau de deformação máximo no plano de cisalhamento, os cavacos podem ser produzidos com quatro diferentes características (contínuos, lamelar, cisalhados e arrancados) que se diferenciam tanto pelo formato do cavaco quanto pela qualidade superficial do produto usinado aos quais eles estão associados (POLLI, 2005).

Os cavacos contínuos ocorrem quando o material usinado possui uma elevada ductilidade, com avanço e profundidade de cortes pequenos, a usinagem não é influenciada por vibrações e a produção de efeitos térmicos é menor que nas outras três situações, que serão tratadas logo a seguir. A qualidade superficial final normalmente é boa. É tido como o processo ideal na formação do cavaco, e, conforme explica Souza (2011), o grau de deformação da área de cisalhamento é menor que o grau de deformação plástica e, conseqüentemente, menor que o grau de deformação no plano de escoamento da ferramenta de corte. Neste conjunto se enquadram as usinagens com altíssima velocidade em material como liga de alumínio e metais com baixo carbono (POLLI, 2005; SOUZA, 2004).

Os cavacos lamelares ocorrem com materiais maleáveis, significa que o grau de deformação no plano de cisalhamento da peça usinada, é maior que o grau de deformação plástica, porém ainda permanecendo menor que o grau de deformação no campo de escoamento. Isso causa uma descontinuidade em seu cavaco devido a fatores como vibrações, material irregular, baixo ângulo efetivo de corte, alta profundidade e baixa profundidade de corte. Este tipo de cavaco aumenta o atrito entre o cavaco e a aresta de corte da ferramenta no processo de escoamento, o que tende a diminuir a vida útil da ferramenta e gerar mais calor (POLLI, 2005; SOUZA, 2004).

Os cavacos cisalhados ou arrancados são formados normalmente quando o grau de deformação no plano de cisalhamento é maior que o grau de deformação no plano de escoamento, a diferença entre ambos é que, para cavacos arrancados, não existe as etapas de deformação plástica e escoamento, ou seja, após a deformação elástica o cavaco simplesmente se desprende da superfície usinada. Processo que está relacionado com erros nas definições dos parâmetros de usinagem como a correta definição da ferramenta ou quando o material usinado possui baixa ductilidade, é frágil ou tem superfície irregular, por exemplo, alguns ferros fundidos ou rochas (POLLI, 2005; SOUZA, 2011).

### **2.5.2. Caracterização de Centros de Usinagem**

De acordo com Schwenke e outros (2008) e Abbaszadeh-Mir e outros (2002) a cadeia cinemática representa a disposição mecânica dos componentes da máquina que participam do

processo de fresamento. No tocante a centros de usinagem, a cadeia cinemática representa a disposição dos componentes estruturais que mantêm a orientação entre a ferramenta de corte e a superfície a ser trabalhada, ou seja, a cadeia cinemática de um centro de usinagem se inicia na peça ( $w$ , *Workpiece*) que deve estar fixa na mesa de trabalho ( $F$ , *Frame*), passa pelos eixos de translação X e Y, e, par centros de usinagem de 5 eixos, passa por dois dos três possíveis eixos rotativos A, B e C, e termina na ferramenta de corte ( $t$ , *tool*), que por convenção é está acoplado no eixo Z. Os eixos rotativos A, B e C têm a função de girar a mesa de trabalho, inclinar a mesa de trabalho e inclinar a ferramenta de corte respectivamente (MORIWAKI, 2008).

Cada eixo de translação recebe a letra T enquanto cada eixo rotativo recebe a letra R. As relações entre  $F$ ,  $w$  e  $t$  são então modeladas com a utilização das Matrizes de Transformadas Homogêneas (HTM),  ${}^F T_t$  e  ${}^F T_w$  respectivamente. Esta representação denota o posicionamento e orientação de uma matriz HTM 4X4, onde  ${}^i T_j$  denota a relação de  $j$  em função de  $i$ . Desta forma o posicionamento de  $t$  em relação a  $w$  pode ser dado pela equação  ${}^w T_t = [{}^F T_w]^{-1} \cdot {}^F T_t$  (ABBASZADEH-MIR; MAYER; FORTIN, 2003).

Seguindo estritamente esta notação é possível modelar a cinemática de qualquer máquina com qualquer número de eixos rotativos ou lineares. Embora seja muito útil em sistemas com modelagens complexas, ele é muito difícil de ser visualizado e conseqüentemente muito abstrato (WARKENTIN, 1998).

Os estudos de Tsutsumi e Saito (2004) se referem a um total de 288 configurações de Centros de Usinagem em 5 eixos realizáveis, porém, em teoria, um Centro de Usinagem pode ser configurada em um número maior de possibilidades. Este número, como descrito em Bohez (2002), pode ser alcançado pela relação de que, para cada eixo que carregue a ferramenta de corte, existem outros quatro eixos que podem se organizar independentemente e gerar novas combinações, sendo  $5 \times 4! = 120$  o número de combinações que cada eixo que carregue a ferramenta de corte permite, e sendo 6 eixos possíveis (X,Y,Z,A,B,C), pelo menos em teoria, alcança-se  $6 \times 120 = 720$  possíveis combinações para um Centro de Usinagem de 5 eixos, porém, neste trabalho são tratadas os centros de usinagem mais comuns no mercado mundial (BOHEZ, 2002b; DASSANAYAKE; TSUTSUMI; SAITO, 2006).

Centros de usinagem podem ser classificados, de acordo com a orientação de seus fusos, em verticais e horizontais. De acordo com Shivanand (2006) a disposição dos fusos e da mesa de trabalho sobre o eixo árvore agregam características específicas aos centros de usinagem, como por exemplo, a maior estabilidade na fixação de peças em centros de usinagem verticais com mesa de trabalho disposta sobre a base do eixo árvore. Ou a maior facilidade de

escoamento de cavaco quando se utilizam máquinas horizontais com mesa de trabalho perpendicular à base do eixo árvore. As Figura 31 A e B são exemplos de Centro de Usinagem verticais, enquanto a Figura 31 C é um exemplo de Centro de Usinagem horizontal (BOHEZ, 2002b; HOFFMAN *et al.*, 2012; SHIVANAND, 2006). O modelo RRFTTT representado nas Figura 31 A e C possuem ambos os eixos de rotação dispostos sobre mesa de trabalho do centro de usinagem. É o modelo mais conhecido no mercado, pois permite que um Centro de Usinagem de 3 eixos seja alterada para este tipo de configuração com adaptação dos eixos rotativos em sua mesa de trabalho. Por não possuírem qualquer eixo rotativo orientando a ferramenta de corte, este modelo impõe uma carga menor sobre o eixo da ferramenta de corte, sendo assim o mais rígido dos três modelos. A rigidez deste tipo de equipamento se converte em uma maior exatidão de fresamento de contorno de formas circulares. Por esse motivo, peças grandes ou pesadas não são aconselháveis para este tipo de equipamento, por pela exigência de um grande torque sobre os eixos rotacionais implicando em uma queda do desempenho da usinagem (MIRALLES, 2009; WARKENTIN, 1998).

Os Centros de Usinagem em 5 eixos também são comumente classificadas de acordo com a disposição de seus eixos rotativos (R) em relação aos eixos lineares (T) e em conjunto com sua disposição na parte fixa da máquina (F). Cada combinação tem vantagens e desvantagens, as quais podem ser medidas em rigidez, dificuldade de programação e capacidade de acomodação da peça para ser trabalhada.

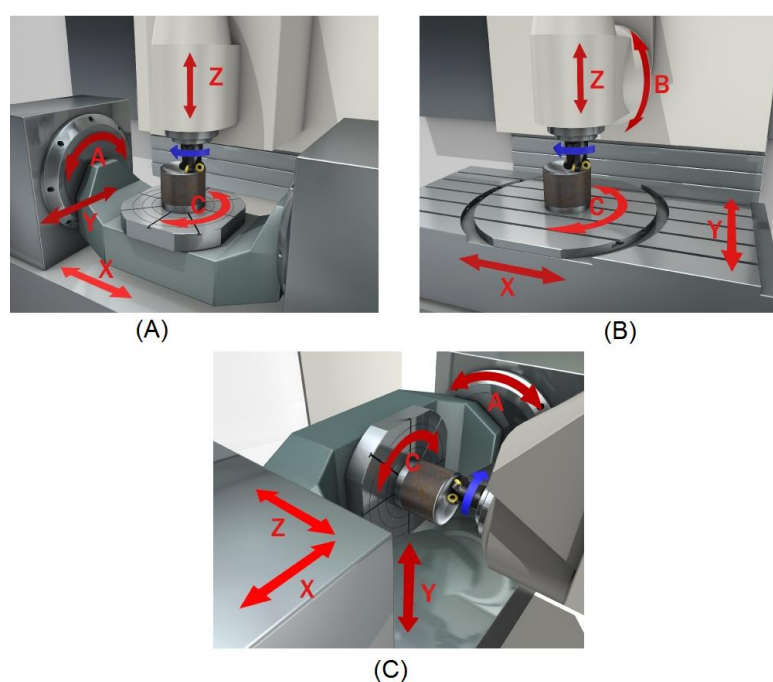


Figura 31: Disposição dos eixos nas máquinas (SOLIDWORKS, 2008)

O modelo FTTTRR, também conhecido como modelo portal, onde o eixo  $X$  está acomodado sobre a máquina e os demais eixos estão encadeados sobre este como descrito na Figura 32 é o mais comum e de mais fácil implementação, possui grande área de trabalho e a mesa de acomodação da peça fixa implica em uma maior rigidez para a sua *cadeia cinemática* (WARKENTIN, 1998). Normalmente denominada máquina de 5 eixos do tipo *Euler* ou máquina tipo pórtico, é caracterizada por possuir os eixos lineares fixos à máquina e os eixos de rotação orientando a ferramenta de corte, por este motivo o cabeçote é menos rígido que em outras configurações (MIRALLES, 2009).



Figura 32: Exemplo de máquina corrigir a referência e trocas as figurastipo portal (MIRALLES, 2009)

As Figura 33 A e B representam o modelo RFTTTR o qual possui um eixo rotativo sobre a parte fixa da máquina (F) enquanto o outro está conectado à ferramenta de corte. Este modelo é o mais raro de se encontrar na indústria tendo uma aplicação um pouco limitada pela sua baixa rigidez (eixo rotativo no cabeçote) e baixa capacidade de volume de trabalho (eixo rotativo na mesa). Para este tipo de fresamento também existe a possibilidade de máquinas com eixos de rotação A e B.

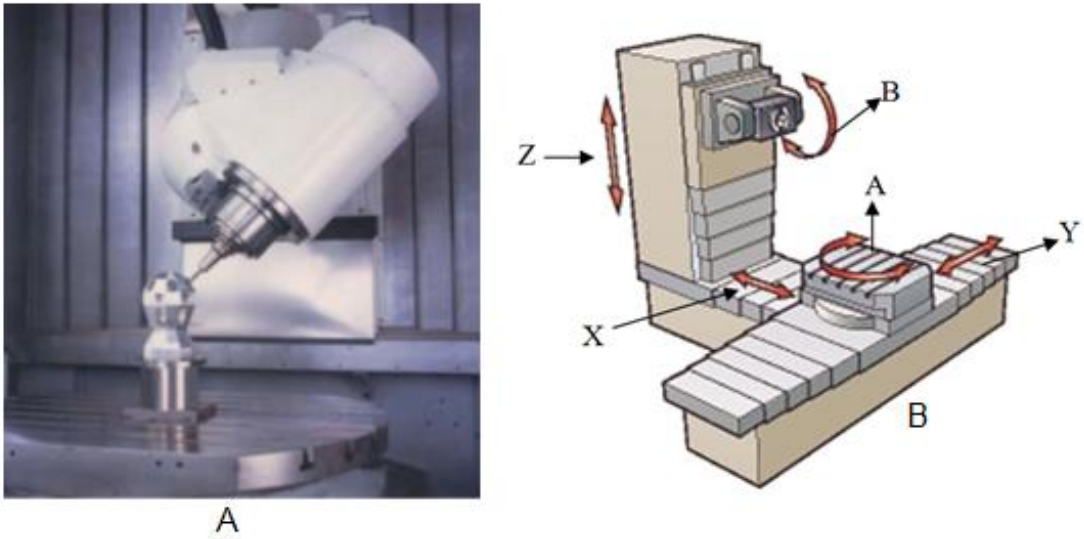


Figura 33: Exemplos de máquinas RFTTTR corrigir as referências (GROOVER, 2010)

### 2.5.3. Erros Quase – Estáticos

As fontes de erros quase estáticas são divididas em 6 classes distintas, como demonstrada na Figura 34. Cada classe reúne um conjunto de requisitos que podem influenciar negativamente a operação do centro de usinagem ou da malha de controle do CNC. Esta influência é composta tanto por fatores sistemáticos quanto por fatores aleatórios e, desta forma devem ser minuciosamente tratados e medidos para que seja possível evitá-los ou, no caso em que isto não é possível, compensá-los de forma a minimizar seus efeitos negativos.

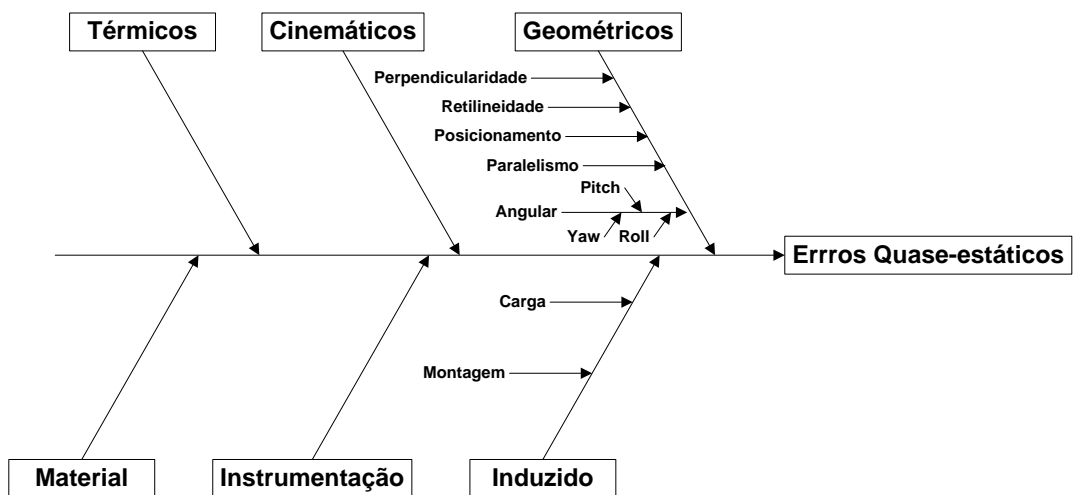


Figura 34: Orçamento de erros quase estáticos

- **Instrumentação:** são erros relativos aos sensores e transdutores que requerem alto grau de exatidão e resolução.

- **Material:** embora um Centro de Usinagem seja projetado para ser estável a própria composição dos materiais pode representar um erro ao longo do tempo. Normalmente os erros de material ocorrem em consequência da presença e atuação de outra fonte de erros, como de carga, por exemplo. Alguns fusos compostos por materiais cuja dureza não seja devidamente calculada podem sofrer alterações ao longo do tempo e causar, desta forma, erros de retilidade por exemplo.
- **Induzidos:** podem ocorrer tanto por problemas na montagem de um determinado componente do centro de usinagem ou induzido por uma carga de um determinado componente sobre outro componente ou ainda por influência da força da gravidade. Neste ponto os erros induzidos por carga, ou por efeito gravitacional possuem forte relação com o erro de material.
- **Erros cinemáticos:** são erros relacionados ao movimento e à trajetória dos eixos e podem ser causados por desalinhamento ou dimensionamento inapropriado de alguns componentes. Esta classe de erros também possui forte ligação e dependência com outras classes de erros como os erros geométricos. De fato os erros cinemáticos representam o efeito causado por outra fonte de erros, como um erro geométrico de ortogonalidade ou paralelismo.
- **Térmicos:** os erros térmicos são presentes tanto no orçamento de erros quase estáticos quanto nos erros dinâmicos. No tocante aos erros quase-estáticos, os efeitos térmicos estão relacionados às distorções que o centro de usinagem pode sofrer com o aquecimento de determinadas partes, causando um movimento indesejado de um ou mais eixos. Uma deformação por aquecimento pode causar, por exemplo, uma distorção ao longo do eixo  $X$  e influenciar três outras fontes de erros sobre o mesmo eixo  $X$  (*roll, pitch e yaw*), bem como perpendicularidade, paralelismo e todos os outros 6 graus de liberdade de outro eixo que estiver disposto sobre este. Os erros térmicos possuem uma grande dificuldade de compensação por possuírem um caráter aleatório superior ao seu caráter sistemático e podem ser responsáveis pela criação de 40% a 70% dos erros geométricos não compensáveis (HARRIS, 2004; RAMESH; MANNAN; POO, 2000).
- **Erros geométricos:** como explicado anteriormente, os 5 graus de liberdade de um Centro de Usinagem são necessários e suficientes para realizar a operação de uma ferramenta de corte nos 6 graus de liberdade de um corpo no espaço tridimensional. Esta relação entre os eixos do centro de usinagem representa um total de 42

combinações diferentes de fontes de erros independentes, sendo 30 referente a 6 graus de liberdade de cada um dos 5 eixos necessários, juntamente com 6 em relação à peça de trabalho e 6 em relação à ferramenta de corte. Conforme descrito na Tabela 4 a relação das 42 fontes de erros mostra redundâncias que só podem ser avaliadas e eliminadas com a consideração de um modelo específico de Centro de Usinagem (ABBASZADEH-MIR *et al.*, 2002).

Tabela 4: Relação dos 42 erros geométricos de um Centro de Usinagem de 5 eixos ( ABBASZADEH-MIR *et al.*, 2002)

| Parte           | Parâmetros de erros posicionais |           |           | Parâmetros de erros angulares |                |                |
|-----------------|---------------------------------|-----------|-----------|-------------------------------|----------------|----------------|
|                 | $e_x$                           | $e_y$     | $e_z$     | $\gamma_x$                    | $\gamma_y$     | $\gamma_z$     |
| X               | $e_{x,X}$                       | $e_{y,X}$ | $e_{z,X}$ | $\gamma_{x,X}$                | $\gamma_{y,X}$ | $\gamma_{z,X}$ |
| Y               | $e_{x,Y}$                       | $e_{y,Y}$ | $e_{z,Y}$ | $\gamma_{x,Y}$                | $\gamma_{y,Y}$ | $\gamma_{z,Y}$ |
| Z               | $e_{x,Z}$                       | $e_{y,Z}$ | $e_{z,Z}$ | $\gamma_{x,Z}$                | $\gamma_{y,Z}$ | $\gamma_{z,Z}$ |
| A               | $e_{x,A}$                       | $e_{y,A}$ | $e_{z,A}$ | $\gamma_{x,A}$                | $\gamma_{y,A}$ | $\gamma_{z,A}$ |
| B               | $e_{x,B}$                       | $e_{y,B}$ | $e_{z,B}$ | $\gamma_{x,B}$                | $\gamma_{y,B}$ | $\gamma_{z,B}$ |
| C               | $e_{x,C}$                       | $e_{y,C}$ | $e_{z,C}$ | $\gamma_{x,C}$                | $\gamma_{y,C}$ | $\gamma_{z,C}$ |
| Peça (W)        | $e_{x,W}$                       | $e_{y,W}$ | $e_{z,W}$ | $\gamma_{x,W}$                | $\gamma_{y,W}$ | $\gamma_{z,W}$ |
| Ferramenta<br>T | $e_{x,T}$                       | $e_{y,T}$ | $e_{z,T}$ | $\gamma_{x,T}$                | $\gamma_{y,T}$ | $\gamma_{z,T}$ |

Nos estudos de Bohez, (2002a) e confirmado por Khim e Keong (2010), os centros de usinagem em 5 eixos mais comuns, TTTRR, RTTTR e RRTTT, possuem um total de 39 fontes de erros, onde 21 são os mesmos presentes nos centros de usinagem em 3 eixos e 18 erros presentes nos eixos A, B e C. Embora um centros de usinagem de 5 possuam apenas dois eixos de rotação, normalmente A e C, a combinação destes cria o terceiro eixo circular B e os erros presentes nos eixos de rotação são independentes dos eixos lineares. A sua classificação ocorre da seguinte forma:

- Posicionais ( $\delta x(X)$ ;  $\delta y(Y)$ ;  $\delta z(Z)$ )
- Retilidade horizontal e vertical ( $\delta y(X)$ ;  $\delta x(Y)$ ;  $\delta z(Y)$ ;  $\delta x(Z)$ ;  $\delta y(Z)$ )
- Angular em relação aos eixos X (*Roll*), Y (*Pitch*) e Z (*Yaw*): ( $E_x(X)$ ;  $E_y(X)$ ;  $E_z(X)$ ;  $E_x(Y)$ ;  $E_y(Y)$ ;  $E_z(Y)$ ;  $E_x(Z)$ ;  $E_y(Z)$ ;  $E_z(Z)$ )
- Perpendicularidade em relação aos planos ortogonais (XZ, YZ e XY). ( $\alpha$ ,  $\beta_1$  e  $\beta_2$ )



- Radiais e axiais dos eixos de rotação (A, B e C): ( $\partial X_A(\theta_x)$ ;  $\partial Y_A(\theta_x)$ ;  $\partial Z_A(\theta_x)$ ;  $\partial X_B(\theta_y)$ ;  $\partial Y_B(\theta_y)$ ;  $\partial Z_B(\theta_y)$ ;  $\partial X_C(\theta_z)$ ;  $\partial Y_C(\theta_z)$ ;  $\partial Z_C(\theta_z)$ )
- Erros de inclinação em A, B e C: ( $\varphi_A$ ;  $\lambda_A$ ;  $\gamma_A$ ;  $\varphi_B$ ;  $\lambda_B$ ;  $\gamma_B$ ;  $\varphi_C$ ;  $\lambda_C$ ;  $\gamma_C$ )

Os seis erros decompostos em oito parâmetros de um eixo podem ser verificados na Figura 35

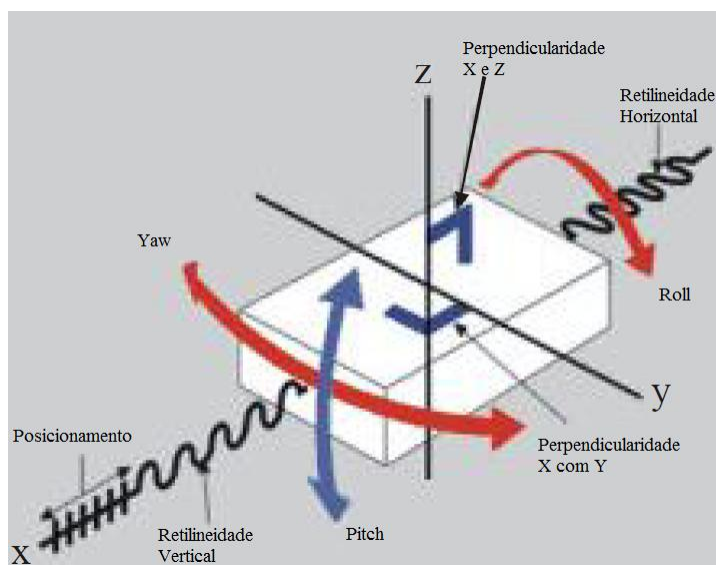


Figura 35: Relação dos erros geométricos ( SOUSA, 2000)

#### 2.5.4. Erros dinâmicos

Os erros dinâmicos como se referem às fontes de erros relacionadas à ação de forças externas nos centros de usinagem, estando presentes em centros de usinagem de 3 ou 5 eixos. Ao contrário dos erros quase estáticos, os erros dinâmicos devem ser originados em fontes alheias às partes do centro de usinagem podendo ser consequência de uma escolha na estratégia da etapa CAM ou um efeito natural ao processo de usinagem devido à interação entre a ferramenta de corte e a peça usinada. A Figura 36 representa um levantamento básico das 4 grandes fontes de erros dinâmicos.



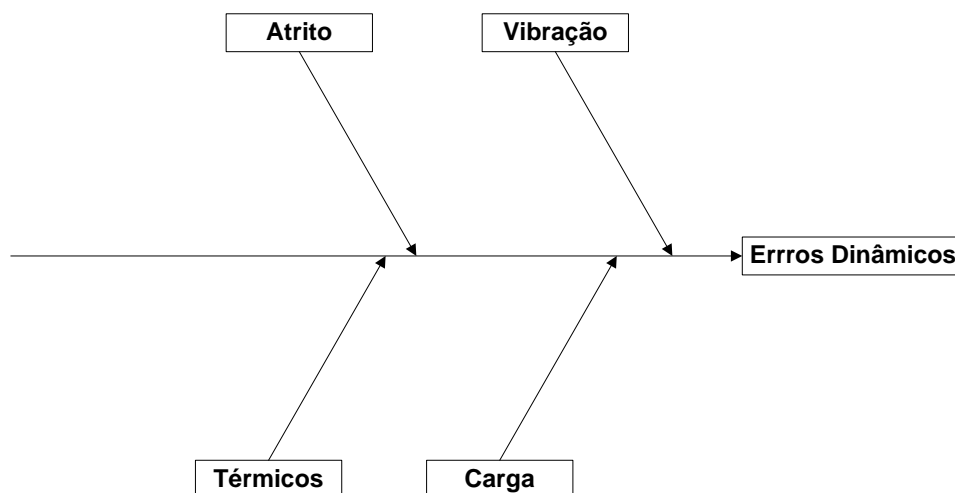


Figura 36: Orçamento de erros dinâmicos

A geração de calor também é uma consequência natural e inevitável do processo de fresamento. Existem três fontes de calor em fresamento (provenientes do cisalhamento, da deformação e do atrito) existentes na interação entre os dentes da ferramenta e peça usinada, porém, outras fontes de calor podem ser responsáveis por desvios geométricos na peça final, como o calor gerado pelos motores de acionamento dos eixos ou do fuso de rotação. Estas fontes podem distorcer a *cadeia cinemática*, o bloco que está sendo usinado ou os eixos dos servomotores e fixadores e, por consequência, permitir que o desvio dos movimentos dos eixos impeça que a trajetória da ferramenta seja percorrida corretamente. Outra característica importante da geração de calor é o efeito sobre os dentes da ferramenta de corte, que podem ter um desgaste acentuado tanto pelo calor quanto pelo efeito que o calor pode exercer sobre a formação do cavaco (SCHMITZ *et al.*, 2008).

De forma análoga, a vibração também é uma consequência inevitável em processos de usinagem, a sua amplitude controlada de acordo com a operação realizada de forma a não influenciar no desgaste prematuro da ferramenta nem criar desvios na trajetória da ferramenta. O controle de vibrações pode ocorrer em várias fases do processo de usinagem como, por exemplo, no controle da velocidade de corte e de avanço ou na seleção do tipo de fresamento na etapa CAM. A operação de desbaste, por exemplo, produz e tolera mais vibrações que a operação de acabamento e o seu grau de aceitabilidade deve garantir que a ferramenta não se desgaste prematuramente e que a superfície gerada esteja apta a ser aproveitada pela etapa posterior (POLLI, 2005).

## 2.6. Medição por coordenadas

Máquinas de medir por coordenadas (MMCs) têm sido utilizadas por décadas como um dispositivo de medição de boa exatidão e de grande versatilidade, por serem capazes de gerar um grande número de medições com apenas um simples sensor (MEARS *et al.*, 2009). Podem ser divididos em equipamentos de medições por contato e sem contato e sua vantagem em medir superfícies de forma livre se dá pela necessidade de se adquirir a maior quantidade de pontos possíveis em função da dificuldade de se estabelecer uma equação matemática capaz de modelar a forma adquirida. De fato, a utilização de MMC para a medição deste tipo de superfície está diretamente associada ao processo de reengenharia, onde uma determinada superfície é adquirida sem uma relação direta com o modelo nominal que o gerou. Dessa forma, este tipo de medição serve para adquirir o maior número possível de pontos da superfície medida para que seja possível estimar o comportamento da superfície contínua, ou seja, a partir da medição, obtém-se uma amostra discreta dos pontos que compõem a superfície real e tenta-se então, estimar o comportamento contínuo da superfície permitindo assim, efetuar comparações com modelos pré-estabelecidos (HAMBURG-PIEKAR, 2006). A medição por MMC serve tanto para avaliar a peça usinada e já retirada do centro de usinagem de 5 eixos quanto para a calibração de Centros de Usinagem, neste caso, é executado um fresamento de um bloco padrão que será comparado com a medição do bloco similar a partir do MMC disposto sobre o centro de usinagem (SCHWENKE; FRANKE; HANNAFORD, 2005; SCHWENKE *et al.*, 2008).

As fontes de erros das MMCs podem ser divididas em dois grandes grupos: as fontes de erros comuns a todos os tipos de Centro de Usinagem, como operador, ambiente de medição, alinhamento e peça, e as fontes de erros relacionadas especificamente ao tipo de MMC utilizada (MMCs com e sem contato que serão melhores explicados posteriormente).

- **Erro do operador:** compreende os erros provenientes da intervenção humana no processo de medição. A experiência do operador de MMC tem influência direta na diminuição dos erros de operador. O conhecimento de metrologia, estatística, desenho técnico, operação da MMC, gerenciamento de qualidade, das normas técnicas, geometria e da tecnologia de fabricação compreende o conjunto de múltiplos conhecimentos exigidos pelo operador como requisitos de operar corretamente um processo de medição via MMC (HAMBURG-PIEKAR, 2006).

- **Ambiente de medição:** são as alterações impostas pelas condições do ambiente de medição, estas variações são relacionadas à temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica etc. Para que uma medição ocorra de forma satisfatória é necessário levar em consideração tanto as condições do ambiente e utilizar seus valores como entrada no cálculo da incerteza de medição bem como procurar manter as condições do ambiente estáveis durante todo o processo de medição (ALBERTAZZI, 2004).
- **Alinhamento:** de uma forma geral a medição de superfícies de forma livre por meio de MMC tem como dificuldade primária estabelecer o alinhamento físico da superfície usinada no equipamento MMC. Se uma superfície de forma livre usinada possui erros de usinagem e, ao mesmo tempo, não pertence mais ao sistema de coordenadas que foi produzido, como garantir que o reposicionamento da peça produzida estará alinhada em relação ao sistema de coordenadas que foi produzida, neste caso, o centro de usinagem? Para solucionar este tipo de questionamento, as MMCs possuem sistemas nativos, ou seja, sistemas próprios desenvolvidos especificamente para um determinado aparelho e que tentam definir pontos de controle na peça usinada que serão utilizados como fontes de alinhamento posteriores entre esta e o sistema de coordenadas do MMC.
- **Peça:** o prévio conhecimento das condições da peça é condição fundamental para a criação da estratégia de medição. Rigidez, condutibilidade térmica e dureza são características influenciam as condições de medição por MMC. Se for utilizada uma medição por contato, por exemplo, o contato entre a superfície de medição e a peça pode ocasionar deformação elástica na peça medida e alterar o valor do mensurando.
- **As máquinas MMC de contato:** possuem como fonte de erros principais a própria estrutura da máquina, o sistema de palpção, o sistema de medição de deslocamento e o software de medição. De forma análoga às máquinas-ferramentas, essas máquinas podem e devem ser calibradas sistematicamente de forma a dirimir as fontes de erros sistemáticos. Porém, apenas os erros de posicionamento de perpendicularidade são sistematicamente calibrados. Todos os erros sistemáticos conhecidos podem ser aceitavelmente compensados pelo próprio software do MMC (OLIVEIRA, 2003). Vale salientar que quando as MMCs por contato estão dispostas em máquinas CNC, semelhantes aos Centros de Usinagem, todos os erros referentes a um Centro de Usinagem e a um CNC comum são repetidos no processo de medição.

- **As máquinas MMCs sem contato:** possuem como fonte de erros o grau de rugosidade do mensurando, o ângulo entre a superfície de medição e o sensor do MMC, bem como a própria forma geométrica do mensurando, pois conforme descrito por Schwenke, Franke e Hannaford (2005) os sensores do tipo interferômetros não são capazes de medir corretamente as superfícies côncavas.

A utilização de MMC para a medição de peças está descrito na norma ISO 15530 que também faz parte do conjunto de normas técnicas ISO-TC 230 e cujo objetivo principal é fornecer procedimentos padrão para a medição de peças e fornecer a avaliação incertezas de medição a partir de equipamentos de medição por coordenadas. De acordo com Hamburg-Piekar (2006) as limitações desta norma são: estabilidade, custo, definição de artefatos de medição capazes de estabelecer uma relação direta entre o medido e o sistema de medição que está sendo avaliado.

De acordo com a sua arquitetura, as MMCs podem ser divididas em MMC de contato e MMC sem contato. Como o próprio nome sugere, a diferenciação está na forma de como os sensores atuam sobre o que está sendo medido. Enquanto o primeiro indica um contato entre o sensor e o mensurando, o segundo se utiliza de outros meios para capturar as informações do mensurando, como por exemplo, a luz, o som, o potencial elétrico etc. (SAVIO; DE CHIFFRE; SCHMITT, 2007; SCHWENKE; FRANKE; HANNAFORD, 2005).

As MMCs de contato são mais utilizadas para inspeção que os equipamentos sem contato em razão de sua maior precisão, porém, esses equipamentos são limitados tanto na quantidade de dados adquiridos quanto nas formas geométricas que eles podem medir. Os equipamentos sem contato, como os MMCs óticos, representam um avanço na indústria de inspeção por MMC, não apenas por permitir a medição em superfícies com formas livres, não prismáticas e não esféricas, como também pela capacidade de captar uma maior quantidade de pontos de medição em uma única ação (RODGER; FLACK; MCCARTHY, 2007).

Uma tentativa de diminuir a limitação dos MMCs de contato é a inserção de braços articulados que se movimentam ao longo da peça medida de forma a varrer uma maior área de medição, todas as articulações que influenciam no processo de medição precisam possuir *encoders* que medem o deslocamento de articulação do braço. Esta capacidade pode ser útil na medição de áreas que não possuem fácil acesso.

A utilização dos MMCs sem contato possui vantagens e desvantagens quando comparados com os MMCs com contato. Voltan (2010) citou como vantagens principais a capacidade de medição de dados de alta densidade, a ausência de deformação do sensor de medição, a

possibilidade de medição de partes deformadas, a possibilidade de medição de área em uma única operação, a facilidade de comparação dos resultados de medição com os modelos CAD. Por outro lado, as desvantagens citadas para este tipo de medição são: alta incerteza de medição, dificuldade de estimação do erro, influência de propriedades óticas do mensurando e o custo elevado destes equipamentos.

Os MMCs do tipo interferômetro são equipamentos que captam informações das superfícies medidas em escala nanométrica. Estes operam bem e rapidamente superfícies lisas e esféricas, porém são insuficientes na medição de superfícies de forma livre, pois aumentam os custos de medições e aumentam as incertezas de medição. Para tentar solucionar a incapacidade de se medir superfícies de forma livre pelo interferômetro que se criou a técnica *Computer Generated Holograms* (CGH) que é a inserção de uma superfície difrativa no sistema de medição por interferômetro que normaliza as ondas esféricas (SAVIO; DE CHIFFRE; SCHMITT, 2007).

## **2.7. Calibração e compensações de Centro de Usinagem, medições diretas e indiretas**

Como descrito anteriormente apenas os erros sistemáticos podem ser compensados e, quanto mais próximo de sua origem um erro for compensado ou corrigido, menor é o risco de interação deste com outras fontes de erros. Porém para centros de Usinagem em 5 eixos, uma análise desde as etapas CAM-CNC até o mapeamento das fontes de erros presentes na próprio centro de usinagem mostra que a quantidade de fontes de erros existente somada à quantidade de interações entre todas as fontes de erros bem como as possibilidades de compensação em diversas etapas diferentes, torna a análise de erros uma tarefa complexa.

Sartori e Zhang (1995) afirmam que um Centro de Usinagem necessita ser preciso, sem necessariamente ser exato, pois erros de exatidão estão relacionados a fontes sistemáticas, cuja compensação pode ocorrer em alguma fase do processo onde a relação custo-benefício pode ser melhor avaliada. Para que seja possível medir o grau de imprecisão de um centro de usinagem medições em sua operação devem ocorrer de forma a calcular tanto o comportamento sistemático de seus erros quanto as possíveis correções que as diversas peças que a compõem podem sofrer. Desta forma, entende-se que não existe uma tradução possível dos erros presentes em um Centro de Usinagem para os erros encontrados uma peça usinada ou o inverso, tudo que é possível avaliar é a quantidade dos erros não compensados previamente e que não foram anulados pela combinação natural dos diversos tipos de erros presentes no processo de usinagem por Centro de Usinagem de 5 eixos (DORNFELD; LEE,

2008). Deve-se lembrar também que nem todos os erros são completamente compensados nem apenas combinados, é possível que existam fontes de erros que foram compensadas parcialmente e que depois podem ter sido combinadas com outras fontes de forma a demonstrar um determinado valor de desvio que está relacionado a mais que duas fontes de erros, sendo pelo menos uma delas com uma influência negativa.

Duas análises distintas são utilizadas para avaliar os centros de usinagem completa ou parcialmente: as medições diretas e indiretas.

Nas medições diretas o resultado da medição é coletado diretamente de sua fonte, ou seja, tem-se o monitoramento direto das variáveis medidas (CONTE, 2008). Este tipo de medição é bastante importante para a avaliação de partes específicas do centro de usinagem, embora seja ineficiente tanto para avaliação de partes cujo acesso ao qual se deseja avaliar esteja indisponível, por exemplo, algumas medições na zona de corte não são possíveis de forma direta devido ao fator agressivo do ambiente que tais zonas estão inseridas (MEKID; PRUSCHEK; HERNANDEZ, 2009) quanto por agregar um grande número de incerteza de medição, impossibilitar a análise quantitativa das fontes de erros combinadas devido a dificuldade de estabelecer um significado físico dos resultados dessa fonte (LIN; SHEN, 2003).

As medições indiretas são aquelas cujos resultados não expressam diretamente um valor de um mensurando, e sim um valor obtido como consequência de alguma interação com este mensurando. Este tipo de medição para centros de usinagem em 5 eixos tem ganhado uma atenção especial nas últimas décadas por permitir a avaliação da relação operação de usinagem e qualidade da peça gerada a partir da análise de um conjunto de dados externos como espessura de cavaco, vibrações, temperatura de corte, emissão acústica da ferramenta de corte etc. (MEKID; PRUSCHEK; HERNANDEZ, 2009).

Após as medições dos centros de usinagem é possível executar o processo de calibração das partes que a compõem para que os erros sistemáticos iniciais possam ser corrigidos ou minimizados, este processo ocorre inicialmente pelo ajuste das peças que foram identificadas como desajustadas pela tarefa de medição identificada como compensação por hardware. Normalmente a etapa de calibração dos centros de usinagem serve como ajuste dos erros geométricos como posicionamento, perpendicularidade, cargas etc. A compensação por software ocorre em etapas posteriores à compensação por hardware e, para essa, é necessário obter um modelo matemático do comportamento ideal do centro de usinagem (SARTORI; ZHANG, 1995).

### 3. ORÇAMENTO GERAL DE ERROS EM PROCESSOS DE USINAGEM

Até aqui o presente trabalho explorou características que envolvem o processo de produção de superfícies de forma livre com o intuito de prover o levantamento dos erros capazes de alterar significativamente a geometria final de uma peça. No presente capítulo será efetuado um orçamento das fontes de erros levantadas no capítulo anterior de forma a quantificar os erros possíveis que podem ser encontrados no produto final, ou seja, após a medição do produto fabricado por uma MMC. Com o intuito de balizar o levantamento das fontes de erros, será feita uma síntese de todos os passos existentes entre a criação do produto e a medição que ocorre após a fabricação. Espera-se, desta forma, restringir a análise das fontes de erros aos passos descritos ao longo do documento.

O produto surge inicialmente como um conceito nominal, apenas no imaginário dos projetistas, sendo um produto de forma perfeita e ideal, porém impossível de ser medido e avaliado matematicamente. Nesta fase também são definidos os requisitos de aceitabilidade, dos custos do projeto e suas possíveis variações, os quais serão utilizados posteriormente como informações de tolerância de produto da etapa CAD. Estas informações serão utilizadas como tolerância máxima que deverão ser respeitadas em todas as fases de produção. Representações matemáticas são então utilizadas para transformar o modelo conceitual em um modelo representado de representação física, onde modelos matemáticos são utilizados para gerar as primeiras representações e interface física. Neste momento as primeiras imperfeições passam a ser inseridas, ainda que imperceptíveis para as demais fases do processo, devido às limitações das modelagens matemáticas, pela discretização de um modelo contínuo e pela inserção de informações de tolerância.

Na etapa CAM são criadas as estratégias de usinagem, ou seja, todos os passos que serão utilizados para transformar um modelo CAD, tido novamente como um modelo ideal por conter imperfeições desprezíveis às demais fases, em caminhos que a ferramenta de corte deverá fazer sobre um *blank* a fim de retirar todo o material excedente e aproximar a sua forma ao conceito nominal. De forma resumida esta fase é composta por etapas que podem ocorrer de forma sequencial ou concorrente e todas devem levar em consideração os aspectos de tolerância e dos custos estabelecidos no projeto. Podendo se destacar as rotinas de definição da ferramenta de corte, da criação das estratégias de posicionamento e corte e o método de interpolação. Todas estas rotinas possuem fontes de incertezas de forma que também se faz necessário estabelecer uma tolerância da própria etapa CAM. A saída final desta etapa é um arquivo de trajetória da ferramenta de corte (CL-Data) o qual deve conter

também as estratégias de usinagem, como velocidade de avanço, velocidade do fuso, estratégia de corte etc.

Na etapa CNC o CL-Data deve ser utilizado para transformar as estratégias da etapa CAM em operações reais de um Centro de Usinagem específica. Por meio de uma rotina denominada pós-processamento as informações de posicionamento de ferramenta de corte são transportadas para os diversos sistemas de coordenadas, como Centro de Usinagem, ferramenta de corte, peça de trabalho a fim de permitir os controles do equipamento CNC gerar comandos para os eixos do centro de usinagem e coordenar os movimentos da ferramenta de corte corretamente. O arquivo de saída desta etapa, denominado CN-Data, pode ser escrito basicamente em duas linguagens, o G-code ou STEP-NC, embora existam outras no mercado, sendo o G-code reconhecido como o padrão na indústria de Centros de Usinagem.

Na etapa de usinagem o arquivo CN-Data é utilizado como entrada de código de máquina para gerar os movimentos dos eixos a fim de fresar o *blank* e transformá-lo em uma peça de trabalho. Nesta etapa os erros inseridos em cada fase anterior, juntamente com erros dinâmicos e estáticos presentes na próprio centro de usinagem poderão ser repassados para o processo de produção como desvios geométricos na peça, de forma a distanciar a sua geometria do modelo CAD inicial. Caso este distanciamento ultrapasse os limites máximos de tolerância, poderá haver um comprometimento de aceitabilidade da peça.

Após o fresamento, a peça de trabalho é encaminhada para a etapa de medição, onde a utilização de uma MMC permite avaliar se os limites de tolerância foram respeitados. Esta etapa tem especial dificuldade quando a peça produzida é uma superfície de forma livre, pois a necessidade de alinhamento entre o medido e o modelo CAD é uma premissa básica para a comparação dos pontos presentes no modelo com os pontos presentes no mensurando. Para isto são empregadas técnicas de ajuste e posicionamento entre ambos onde a comparação ocorre pelo posicionamento médio de um conjunto de pontos em relação ao modelo CAD. A aceitabilidade da peça final depende da garantia de medição entre a peça final e o modelo CAD, juntamente com os limites de tolerância estabelecidos.

### **3.1. Orçamento geral de erros**

Observa-se na bibliografia consultada que não existe um consenso na classificação e quantificação, de forma holística, dos erros presentes em um processo de usinagem por Centros de Usinagem em 5 eixos. Os autores, em sua maioria, se detêm à modelagem de erros



em uma determinada parte do processo de usinagem e, ainda assim, quase sempre ignoram algumas fontes e efeitos de erros, bem como as quantificam de forma diferente. Para ilustrar esta afirmação se observa que Abbaszadeh-Mir e outros (2002) citam 42 fontes de erros independentes para um Centro de Usinagem de 5 eixos do tipo RRFTTT, reconhecendo que este número pode mudar de acordo com o tipo de centro de usinagem escolhido, enquanto Bohez (2002) e Khim & Keong (2010) citam e modelam 39 fontes de erros para o mesmo tipo de centro de usinagem. Bringmann (2007), apesar de subdividir as fontes de erros desse centro de usinagem de forma um pouco diferente, modela 52 fontes de erros.

É fácil observar que os autores pesquisados convergem para um total de 21 componentes de erros geométricos em centros de usinagem de 3 eixos, sendo 18 componentes de erros divididos em 6 graus de liberdade em cada eixo, e outros 3 componentes de erros que representam a perpendicularidade entre os eixos XY, XZ e YZ (ABBASZADEH-MIR *et al.*, 2002; BOHEZ, 2002b; DU; ZHANG; HONG, 2010; RAKSIRI; PARNICHKUN, 2004; RAMESH; MANNAN; POO, 2000, 2005).

Este documento buscou executar uma síntese das principais fontes de erros presentes em um processo de usinagem por centros de usinagem em 5 eixos e agrupou da seguinte forma Tabela 5:

Tabela 5: Resumo do orçamento total de erros

|                     | CAM | CNC | Centros de Usinagem |         | Ferramenta de corte | MMC | Total |
|---------------------|-----|-----|---------------------|---------|---------------------|-----|-------|
|                     |     |     | 3 eixos             | 5 eixos |                     |     |       |
| Quantidade de erros | 13  | 7   | 33                  | 54      | 9                   | 65  | 129   |
|                     |     |     |                     |         |                     |     |       |

Observa-se que os valores de 33 e 54 fontes de erros para os centros de usinagem de 3 e 5 eixos respectivamente se dá de soma dos erros comuns a estes dois tipos de equipamento juntamente com os erros provenientes do número de eixos que cada centro de usinagem possui, ou seja, ambos compartilham 4 fontes de erros dinâmicos, 6 fontes de erros quase estáticos e 2 fontes de erros induzidos, porém os centros de usinagem de 3 eixos possuem 21 fontes de erros enquanto os centros de usinagem de 5 eixos possuem 42 fontes de erros, conforme descrito anteriormente.

Vale salientar que o número de 65 fontes de erros para uma MMC se dá pela possibilidade da mesma ser composta por uma MMC por contato no formato de um conjunto CNC e Centro de Usinagem, desta forma, soma-se ao conjunto de fontes de erros inerentes ao processo de

medição de uma MMC, as fontes de erros do conjunto CNC- Centros de Usinagem, ou seja, aos erros já descritos de CNC-Centro de Usinagem, agregam-se os erros de operador, ambiente de medição, alinhamento e peça.

Como descrito anteriormente existem três abordagens capazes de fornecer métodos de avaliação ao processo de usinagem, a empírica, a mecânica e a mecanicista. As três sempre são utilizadas em conjunto, sendo que uma recebe uma ênfase maior que as outras duas quando se escolhe um determinado caminho de avaliação. Isto significa que não se pode efetuar uma avaliação puramente mecanicista, onde os valores são obtidos a partir de modelagens matemáticas e dos efeitos físicos sem se partir de certo empirismo ou sem que seja necessária uma avaliação de forma reversa, a partir da abordagem mecânica, onde se alcança o modelo por medição dos efeitos que este produz em uma etapa posterior.

No presente trabalho foi realizada uma abordagem mecânica, onde, após se realizar o levantamento das principais fontes de erros de um processo de fresamento de uma superfície de forma livre a partir de Centros de Usinagem, buscou-se avaliar as diversas saídas dos passos de usinagem a fim de correlacionar os erros encontrados em cada etapa com os erros finais da etapa de medição da superfície usinada e, desta forma, estabelecer um estudo sobre a contribuição de erros que cada etapa possui. Vale deixar claro que os valores encontrados nesta avaliação não representam as contribuições de erros das diversas saídas para qualquer processo de usinagem de superfícies de forma livre a partir de Centros de Usinagem em 5 eixos. A quantidade e a possibilidade de combinação das fontes de erros tornam impossível estabelecer um percentual de contribuição de cada etapa de forma universal. O conjunto de escolhas tomadas durante o processo de produção irá influenciar cada etapa para contribuir com maior ou menor proporção para o alcance do conjunto de erros final.

Embora esteja descrito que foi feito um levantamento dos erros independentes e dos erros obtidos a partir da combinação de outras fontes, como por exemplo o erro de adesão molecular, que é consequência do atrito entre a ferramenta de corte e a superfície usinada, juntamente com o calor excessivo deste contato, não se almeja aqui levantar todas as fontes de erros provenientes da combinação de duas ou mais fontes, caso contrário este número deveria ser muito maior que o exposto, e a relação de combinações deveria ser mais complexa.

Com o intuito de alcançar o objetivo principal do presente documento, este capítulo teve como função efetuar o levantamento das diversas fontes de erros e incertezas do processo de produção de superfícies de forma livre a partir de Centros de Usinagem. Espera-se, no próximo capítulo, alcançar os objetivos secundários por meio da medição holística do

processo de usinagem de uma determinada superfície de forma livre se avaliando as diversas saídas de cada etapa da cadeia CAM-MMC.

#### 4. ANÁLISE DE ERROS NA FABRICAÇÃO DE SUPERFÍCIE COMPLEXA

O capítulo 2 do presente documento teve por função explorar o referencial bibliográfico a respeito das etapas de produção de uma superfície de forma livre por meio de um Centro de Usinagem de 5 eixos a partir da etapa CAM até a etapa MMC de forma a subsidiar os elementos desenvolvidos neste trabalho. De forma semelhante, o capítulo 3 teve por função evidenciar as fontes de erros mais relevantes presentes neste processo de produção. Baseado em tais informações e na criação das rotinas de comparação descritas no anexo, o presente capítulo tem como função analisar as informações adquiridas nos capítulos anteriores de forma a prover um levantamento prático dos efeitos dos erros obtidos nas comparações de cada saída de cada fase da cadeia de produção de uma superfície de forma livre por meio de um Centro de Usinagem de 5 eixos com o modelo ideal estabelecido na etapa CAD.

Para avaliar as diversas saídas das etapas de produção de uma superfície de forma livre, a fim de criar uma análise capaz de avaliar de forma indireta, o comportamento do crescimento dos erros de usinagem, desde a etapa CAM até a etapa MMC, uma superfície de forma livre, pertencente à classe 3, conforme descrito no item 2.1.1, foi usinada (Figura 37b) e utilizada no presente trabalho. Informações detalhadas sobre a construção da peça podem ser encontradas em Helleno (2008) e Papa (2012). Todos os passos da cadeia de produção foram medidos para que fosse possível estabelecer uma correlação entre os erros presentes em cada etapa e o modelo nominal da etapa CAD. A peça de trabalho em questão tem as seguintes características:

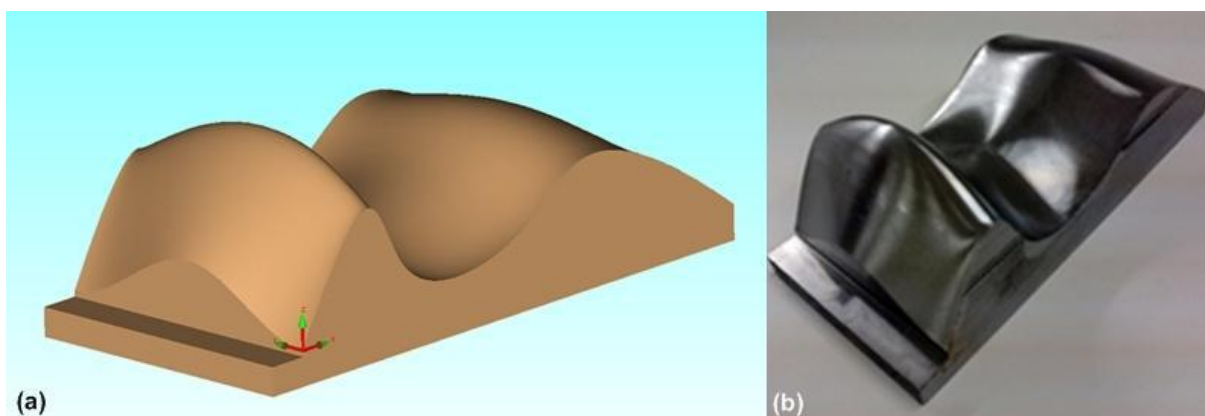


Figura 37: Peça de trabalho utilizada como objeto de estudo (PAPA, 2012)

- **Dimensões:** As dimensões nominais da peça de avaliação são de aproximadamente: 71 mm de largura (eixo y), 153 mm de comprimento (eixo x) e altura variando entre 23 mm e 49 mm (eixo z).

- **Interpolação:** Os arquivos utilizados para análise foram divididos em método de interpolação (linear e NURBS). Os arquivos NURBS também foram subdivididos de acordo com a tolerância do CAM, sendo uma tolerância de 0,05 mm cujo o nome do arquivo foi NURBS 5C e uma tolerância de 0,005 mm para o arquivo com nome NURBS 5M (PAPA, 2012).
- **Características da usinagem:** a usinagem foi executada com a mesma estratégia de passes para as operações de acabamento e de desbaste, alterando-se apenas a programação da interpolação da trajetória. Foi utilizado centro de usinagem vertical Discovery 760, cujo avanço rápido foi de 2500 mm/min e cuja rotação máxima de 10000 RPM. A peça em aço AISI-SAE P20 cujo coeficiente de dilatação térmica é de  $11 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}$ . O avanço programável foi de 5000 mm/min executados sob um comando Siemens 810D que possui capacidade de processamento de funções Nurbs (PAPA, 2012).
- **Aquisição de dados de cada saída:** Todas as saídas são compostas por um arquivo TXT com as seguintes especificações:
- **O modelo nominal CAD:** composto por um conjunto de curvas NURBS de alta resolução composta por coordenadas cartesianas em 2 eixos (X e Z) com 10.000 pontos para cada eixo. Por este motivo, os valores de Y serão ignorados para todas as outras saídas.
- **Os arquivos de saída CAM, CNC, e Centro de usinagem:** são arquivos compostos por coordenadas cartesianas de 300 posições para cada eixo X e Z, com uma tomada de pontos a cada 0,5mm ao longo do eixo X.
- **O arquivo CAM:** significa a aquisição de dados das trajetórias de ferramenta, também conhecido como *set point position* com as mesmas posições descritas no arquivo CL Data, o arquivo CNC representa as informações medidas a partir do controle de desvios do CNC medidos diretamente no centro de usinagem, ou seja, representa o *set point* comandado para a máquina, enquanto o arquivo de Centro de Usinagem representa os dados adquiridos a partir do controle de desvios, ou seja, representa o que a máquina realmente executou. Todos os dados foram normalizados e modificados pela máquina virtual descrita em Uhlmann e outros (2013).
- **O arquivo da MMC:** composto por coordenadas cartesianas de 103 posições, Com o apalpador viajando ao longo do eixo X e tomando pontos a cada 1,35mm neste eixo (PAPA, 2012).

#### 4.1. Avaliação quanto ao método de interpolação

Nesta análise os arquivos foram comparados com o intuito de se avaliar os diferentes métodos de interpolação. Como os arquivos gerados não possuíam nenhuma informação referente à tolerância inferior, todos os pontos dos arquivos foram comparados em dois posicionamentos no eixo Z (0,05 mm e 0,005 mm) contados a partir da origem. Está determinado e descrito no Anexo que todo distanciamento da origem em Z representa um desvio do arquivo medido em relação ao modelo nominal CAD. Desta forma, as medições que obtiveram pontos mais próximos da origem no eixo Z estavam com menor desvio geométrico.

Todos os arquivos TXT descritos anteriormente foram interpolados em função da mesma curva NURBS de alta resolução. Isso normalizou todos os arquivos em 12200 pontos para que fosse possível efetuar as comparações tanto de cada saída quanto com a curva do modelo nominal CAD. Desta forma, foi possível avaliar o número de pontos acima ou abaixo dos pontos 0,05 mm ou 0,005 mm no eixo Z. A primeira comparação é quanto o método de interpolação escolhido e está demonstrada na Figura 38.

O arquivo de interpolação linear, embora não tenha uma tolerância CAM informada, dos 12200 pontos interpolados, apresentou 89 pontos com desvios acima de 0,05 mm, 1571 pontos com desvio acima de 0,005 mm e com o ponto de maior desvio, descrito aqui como erro máximo, em 0,2010 mm conforme demonstram a Figura 38A e a Tabela 6.

O arquivo de interpolação NURBS 5C, como descrito anteriormente foi gerado com uma tolerância CAM de 0,05 mm, dos 12200 pontos obteve 81 pontos com desvio acima 0,05 mm da origem do eixo Z, 3870 pontos com desvio acima 0,005 mm e erro máximo de 0,1934 mm. Isso que mostra que, embora tenha sido criado sob uma tolerância CAM de 0,05 mm, este arquivo demonstrou um desvio geométrico próximo do encontrado na interpolação linear para esta mesma tolerância (Figura 38B).

A interpolação NURBS 5M cuja tolerância de 0,005 mm alcançou 84 pontos com desvios acima de 0,05 mm, demonstrou a melhor média de pontos acima da linha de tolerância de 0,005 mm, 755 pontos e alcançou um erro máximo de 0,1959 mm (Figura 38C). Conclui-se, desta forma, que a escolha do tipo de interpolação tem relação direta com o padrão de tolerância adotado, e, para esta geometria, caso a tolerância CAM seja de 0,005 mm, a interpolação NURBS 5M obteve um melhor resultado, e caso a tolerância CAM seja de 0,05 mm, a interpolação NURBS 5C conseguiu manter um maior número de pontos dentro da tolerância a qual foi submetida, como pode ser observado na primeira coluna da Tabela 6.

## 4.2. Avaliação quanto às diversas saídas da cadeia CAM- Centros de Usinagem

Nesta análise os dados dos arquivos foram ajustados e comparados de acordo com cada saída da cadeia CAM-CNC juntamente com os dados medidos diretamente no centro de usinagem. A coleta de dados foi feita a partir dos três métodos de interpolação (linear, NURBS 5C e NURBS 5M) e com um avanço de 2500 mm/min. O principal objetivo neste processo é identificar o comportamento das diversas fontes de erros presentes em cada etapa de usinagem a partir da medição indireta dos dados de saída dessas etapas. A Tabela 6 demonstra o resumo dos valores adquiridos nesta medição, os quais serão explicados nos próximos subitens, juntamente com os seus respectivos gráficos.

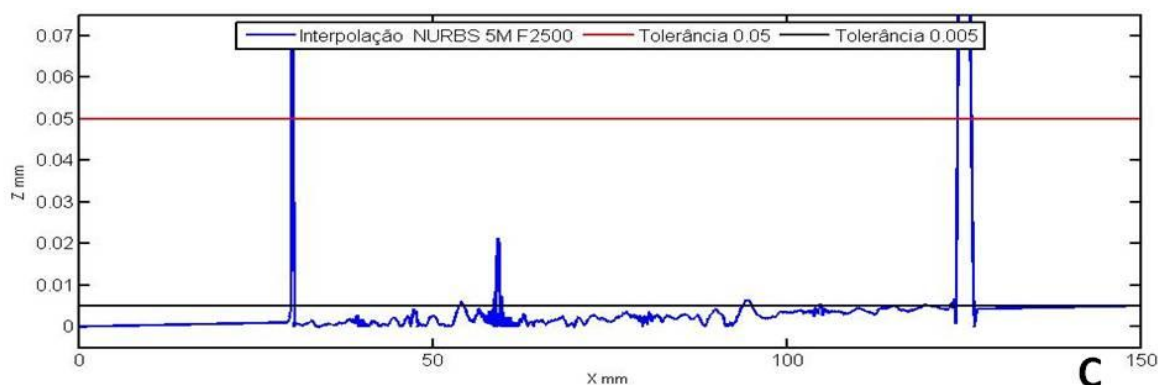
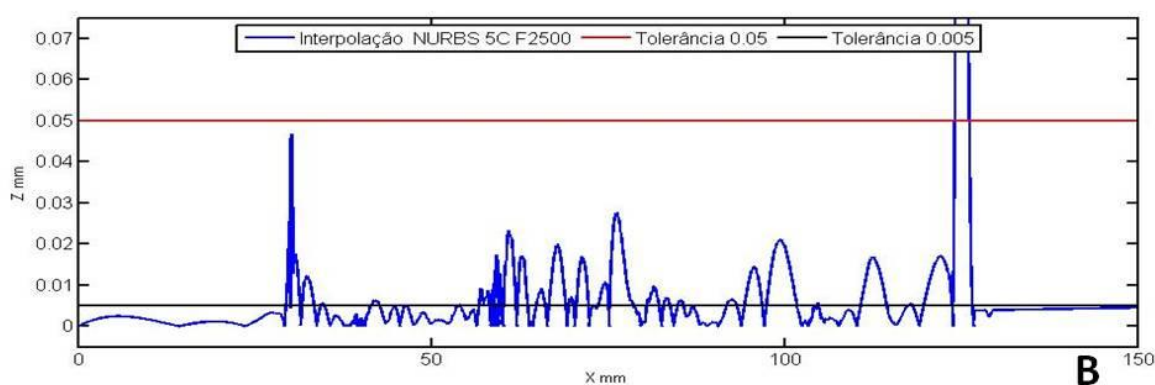
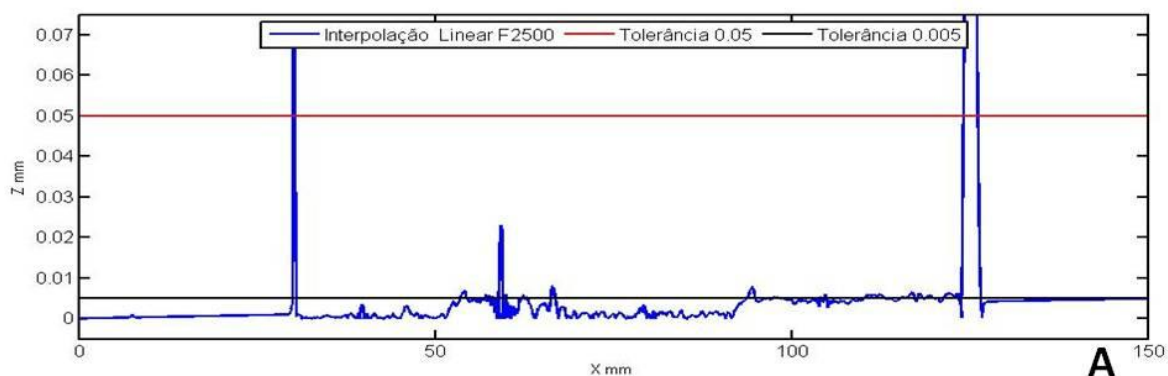


Figura 38: Erro de interpolação do Avanço em 2500 mm/min (A linear, B NURBS 5C e C NURBS 5M)

#### 4.2.1. Erros entre as etapas CAM- Centros de Usinagem a partir da interpolação Linear

É possível observar na Figura 39 (A, B e C) que o conjunto de erros aumenta tanto em amplitude, quanto em quantidade de pontos. Embora exista uma tentativa de compensação automática na etapa CNC (Figura 39 B) que diminui o número de pontos acima do limite superior de 89 para 78 e o erro máximo em 0,005 mm, o número de pontos com erros acima do limite de tolerância inferior aumenta em 246% entre as etapas CAM e Centro de Usinagem, enquanto o valor do erro máximo se reduziu em 0.003 mm (Tabela 6) no mesmo intervalo. Para o limite de tolerância superior o crescimento entre a primeira e a última etapa desta medição foi de 15%. Vale ressaltar que, inicialmente, não existe uma informação específica de tolerâncias de CAM aplicadas neste tipo de interpolação.

Tabela 6: Relação de pontos com erros para a interpolação linear, NURBS 5C e NURBS 5M

| Etapa                                               | CAM     | Erro Max | CNC     | Erro Max | Centros de Usinagem | Erro Max |
|-----------------------------------------------------|---------|----------|---------|----------|---------------------|----------|
| Linear sup/inf                                      | 89/1571 | 0,2010   | 78/3900 | 0,1960   | 102/5434            | 0,1980   |
| NURBS 5C sup/inf                                    | 81/3870 | 0,1934   | 79/4165 | 0,1942   | 178/4568            | 0,1970   |
| NURBS 5M sup/inf                                    | 84/755  | 0,1959   | 80/5490 | 0,1970   | 97/6482             | 0,2047   |
| Sup = tolerância 0,05 mm, Inf = tolerância 0,005 mm |         |          |         |          |                     |          |

#### 4.2.2. Erros entre as etapas CAM- Centros de Usinagem com interpolação NURBS 5C

Na análise do crescimento do erro com a utilização de interpolações NURBS 5C, ou seja, com tolerância de 0,05 mm, observou-se que o número de pontos que ultrapassaram o limite de tolerância inferior cresceu 7% entre as etapas CAM e CNC e 9% entre as etapas CNC e centro de usinagem, mostrando um acumulado de 18% entre as etapas CAM e Centros de



usinagem, enquanto o erro máximo aumentou em 0.004 mm (Figura 40). É possível destacar que o crescimento do número de pontos que ultrapassam a tolerância superior é de 119% (Tabela 6).

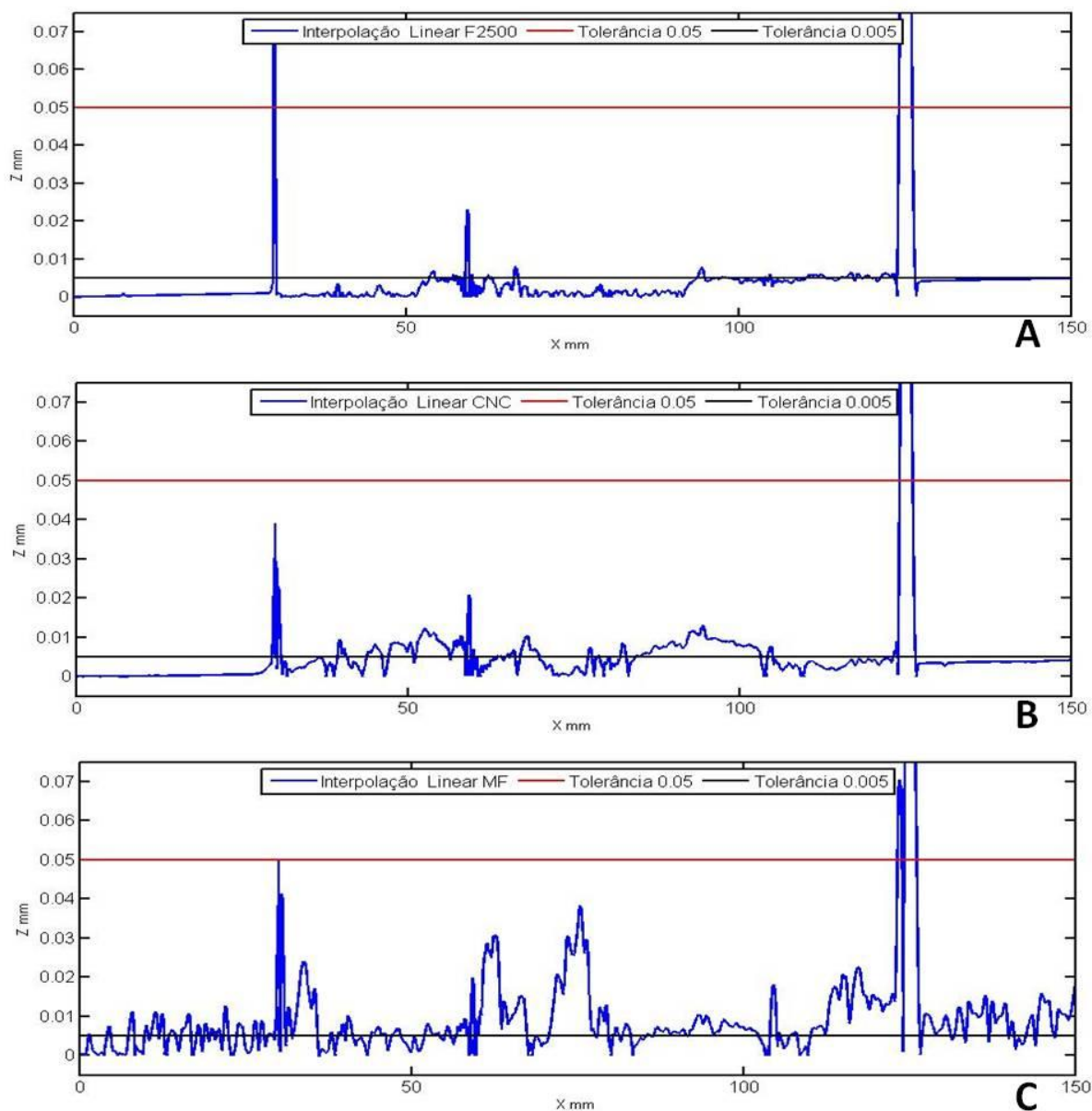


Figura 39: Crescimento do erro CAM – Centros de Usinagem (Interpolação Linear)

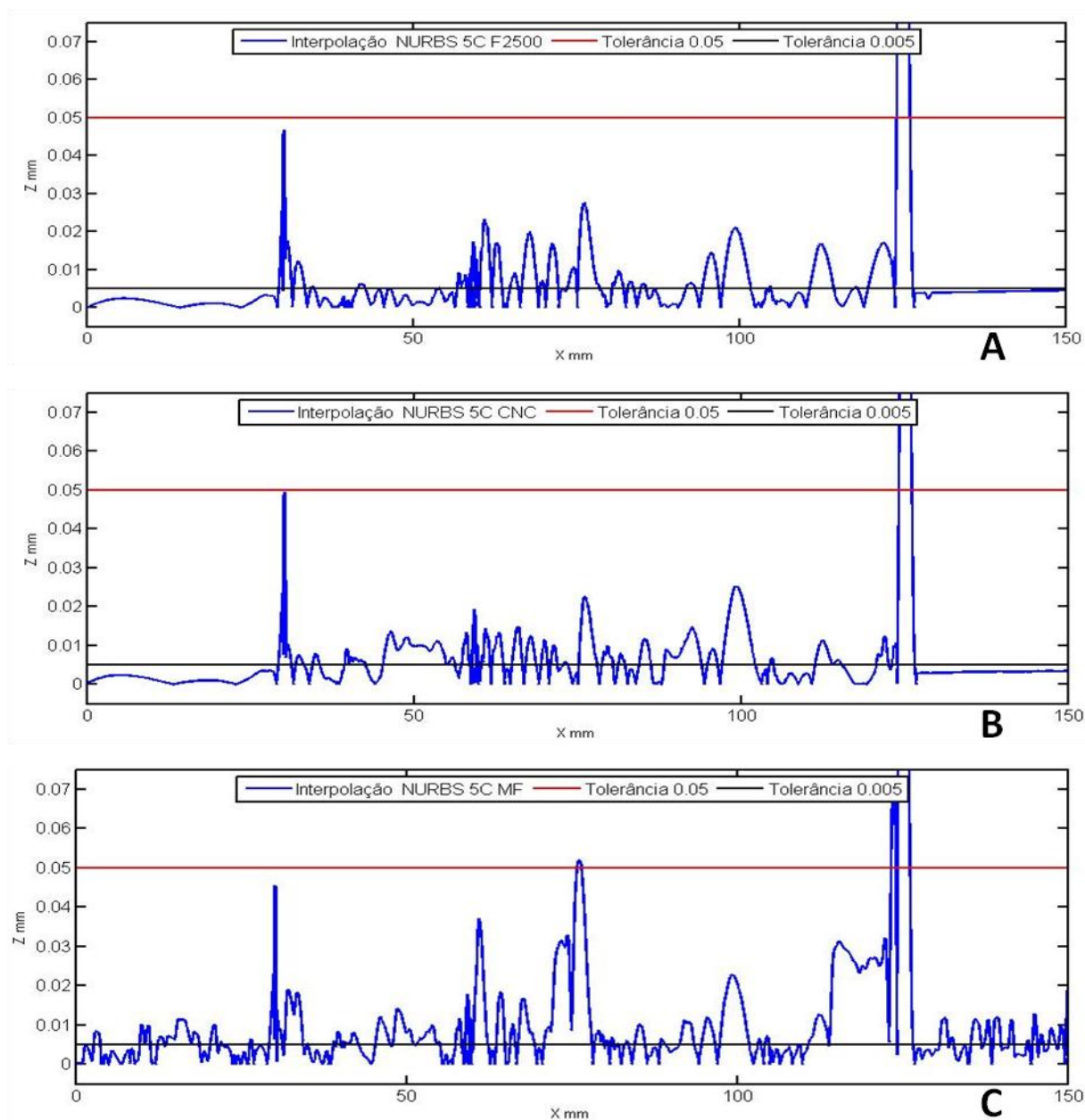


Figura 40: Crescimento do erro CAM – Centros de Usinagem (Interpolação NURBS 5C)

#### 4.2.3. Erros entre as etapas CAM- Centros de Usinagem com interpolação NURBS 5M

A interpolação NURBS 5M, cuja tolerância é de 0,005 mm representou o maior crescimento de erros na medição entre a etapa CAM - Centros de Usinagem para o limite inferior, alcançando um crescimento de 758% (Figura 41 A - C). O crescimento de pontos acima da tolerância superior foi de 15%.

Entre as etapas CAM e CNC o crescimento foi de -4% e 627% para as tolerâncias superior e inferior respectivamente. Entre as etapas CNC - Centros de Usinagem o crescimento foi de

21% e 18% para as tolerâncias superior e inferior respectivamente. Vale lembrar que esta operação deveria manter os valores dentro da tolerância inferior.

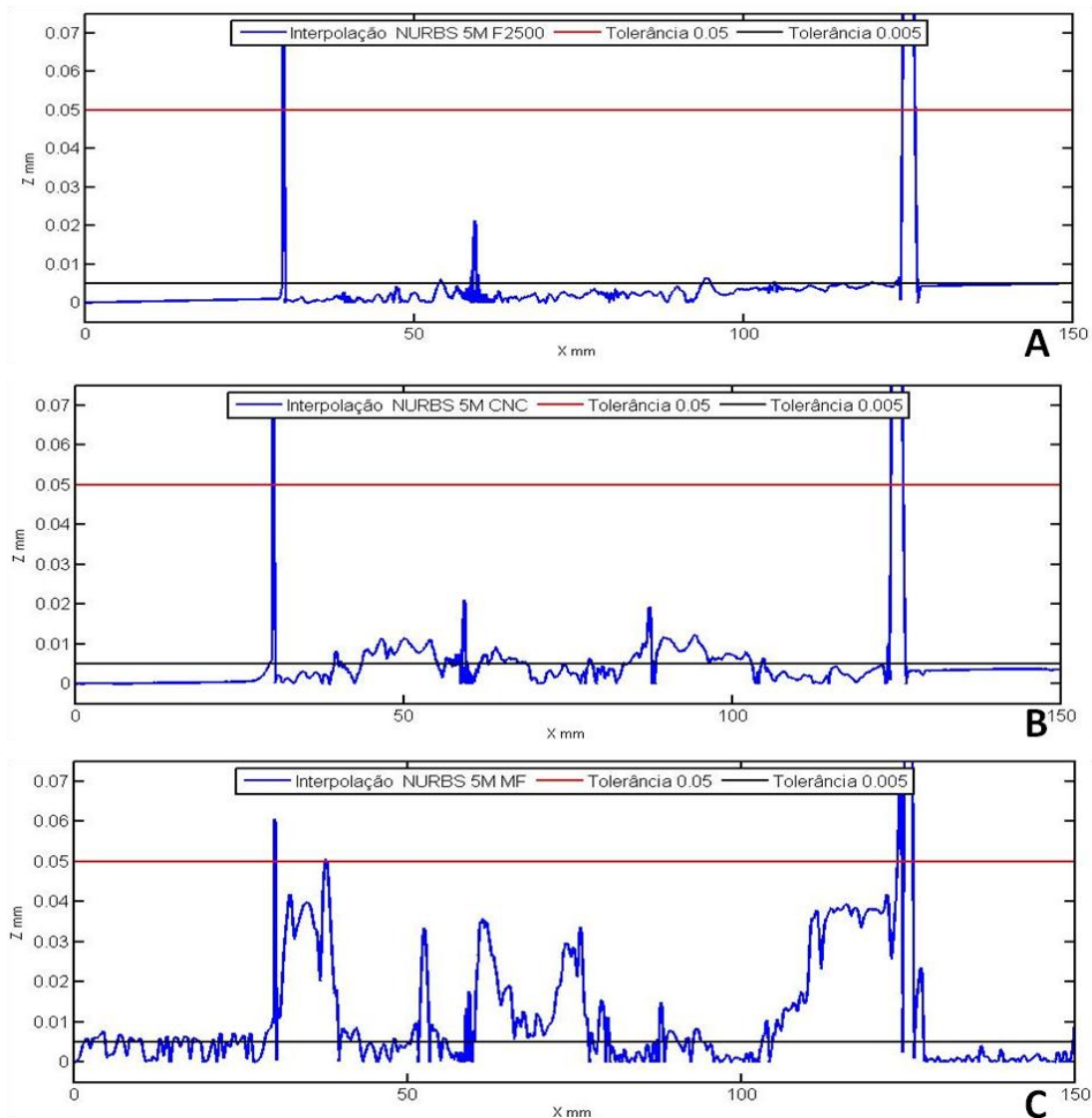


Figura 41: Crescimento do erro CAM – Centros de Usinagem (Interpolação NURBS 5M)

#### 4.2.4. Erros obtidos partir da MMC

É possível observar que o erro cresce à medida que novas informações vão sendo agregadas ao processo de produção, chegando ao seu maior valor quando medidos diretamente na peça usinada (Figura 42). Isto condiz com o exposto neste trabalho, pois a medição da peça revela que, além de todas as ações das fontes de erros presentes em todo o processo de usinagem, ainda agrega as fontes de erros presentes no próprio ato de medir. Os dados de medição, conforme descrito anteriormente, foram obtidos a partir das medições realizadas por Papa (2012) e foram ajustados à curva NURBS de alta resolução. O erro

máximo encontrado nesta medição foi de 0,8 mm, sendo 0,2 mm superior aos resultados obtidos por Papa (2012).

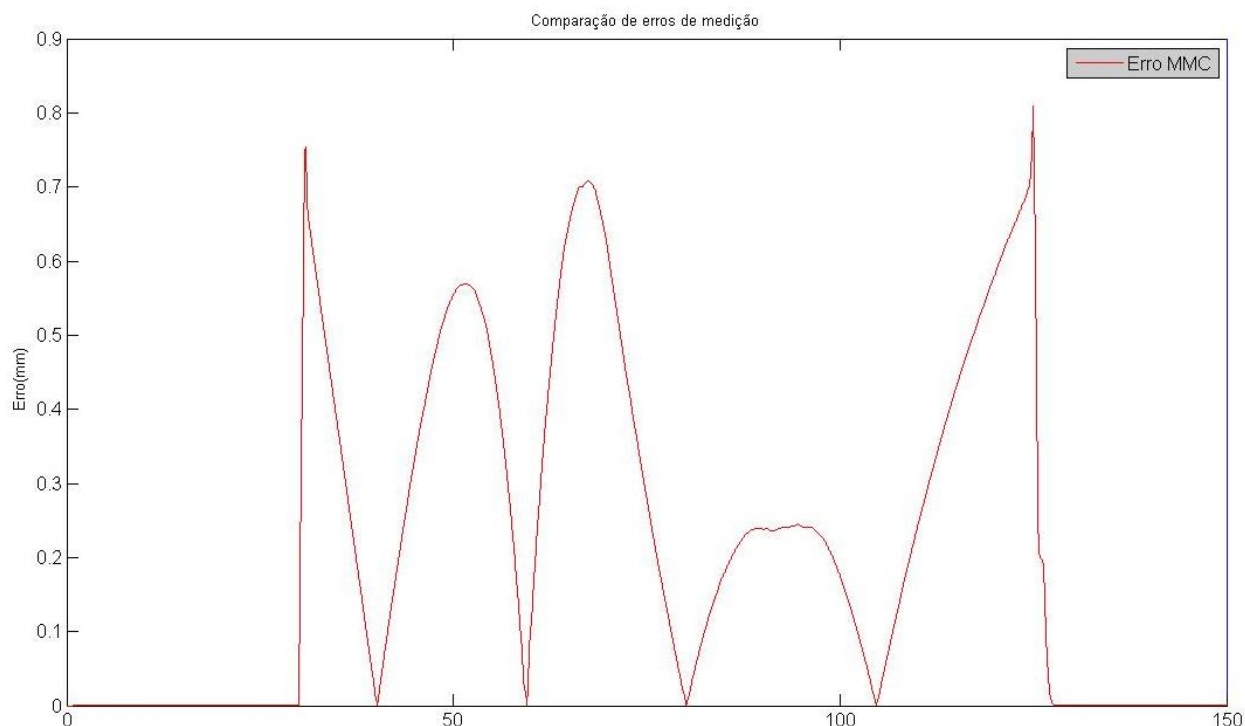


Figura 42: Erros medidos pela MMC

Com isto o presente trabalho alcançou a última etapa descrita nos objetivos secundários, adquirindo dados de medições entre as diversas etapas da cadeia CAM-CMM e comparando-os com um modelo nominal CAD, de forma a demonstrar tanto o crescimento de erros provenientes das escolhas dos métodos de interpolação, bem como das influências das diversas etapas de produção de uma superfície de forma livre, por meio de Centro de Usinagem de 5 eixos, o que configura a avaliação holística, analítica e indireta desse processo de usinagem.

#### 4.2.5. Síntese de resultados

Para as características específicas da peça de trabalho descrita neste documento e se observando apenas a escolha do método de interpolação, é possível concluir que a interpolação NURBS 5C é a melhor opção para ser utilizada com uma tolerância de 0,05 mm, pois alcançou, dos 12200 pontos que compõem a peça, 81 pontos fora da tolerância seguido de 84 e 89 pontos alcançados pelas interpolações NURBS 5M e linear respectivamente. Caso a tolerância CAM da peça de trabalho seja de 0,005 mm a interpolação NURBS 5M passa a

representar uma melhor escolha método de interpolação, alcançando 755 pontos fora do limite de tolerância inferior, um resultado melhor que o alcançado pela interpolação linear e interpolação NURBS 5C, que obtiveram 1571 e 3870 pontos respectivamente.

A escolha do método de interpolação juntamente com os limites de tolerância estabelecidos exerce influência em todas as ações seguintes à etapa CAM. Esta característica foi observada para a execução das etapas CNC e Centro de Usinagem para a criação desta peça de trabalho específica, onde a interpolação NURBS 5M, embora tenha se demonstrado uma melhor opção como método de interpolação da etapa CAM para o limite de tolerância inferior 0,005 mm, para as etapas subsequentes a interpolação NURBS 5C alcançou um menor número de pontos fora dessa zona de tolerância (4568 pontos) juntamente com um menor valor de erro máximo (0,1970 mm). Uma possível explicação para esse efeito é a influência que o próprio controle de máquina pode exercer sobre os resultados obtidos. Em situações em que se utiliza um maior número de atuações do controle, com constantes acelerações e desacelerações, por exemplo, o conjunto de ações pode ser prejudicado. Outra possível explicação para esse comportamento é a criação de um maior número de blocos CNC para a execução de usinagens com tolerâncias menores, o que também pode exigir mais atuação do controle de aceleração/desaceleração do centro de usinagem. De fato, o que se avalia na análise indireta é o resultado final, e este mostra que para a peça específica, com este tipo de Centro de Usinagem, CNC e estratégias CAM, a geração do arquivo com interpolação NURBS 5C foi melhor que os outros métodos de interpolação.

## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado um levantamento das principais fontes de erros presentes em um processo de usinagem de superfícies de forma livre por meio de Centros de Usinagem em 5 eixos, para subsidiar o desenvolvimento de um processo de avaliação holística e indireta das influências dessas fontes sobre a geometria final de uma peça usinada.

Identificou-se desta forma que o conjunto de etapas que não possuem influência direta do centro de usinagem, ou seja, do CAM até o CNC tem uma influência de erros menor que a parte do processo que sofre influência do centro de usinagem, ou seja, os erros diretos do centro de usinagem, da ferramenta de corte e da medição via MMC. Do total de 129 fontes de erros levantadas no processo de produção desta superfície de forma livre por meio de um Centro de Usinagem de 5 eixos, 110 foram identificados após a ação do próprio centro de usinagem. O fato das fontes de erros estarem concentradas a partir das ações do centro de usinagem se justifica pelo caráter teórico e discreto que as etapas CAM e CNC têm quando comparadas com a etapa do centro de usinagem que é real e contínuo, ou seja, enquanto ainda se está trabalhando com modelagens matemáticas, tratamento de informações digitais simulações etc. é mais fácil estabelecer um determinado valor em uma entrada e alcançar um valor estimado em uma determinada saída, que quando se trabalha em um ambiente real, onde os efeitos físicos, os componentes analógicos, as interferências aleatórias e de caráter contínuo, como atrito, deformação por calor, desgastes diversos etc. são envolvidos.

De forma semelhante, a medição indireta das fontes de erros em cada saída demonstrou que os erros mantiveram o mesmo comportamento, onde o erro máximo da peça final medida na etapa MMC foi aproximadamente 300% maior que o erro máximo encontrado na etapa de operação do centro de usinagem. Estas informações devem ser interpretadas com cautela, pois como as medições indiretas ocorreram na transição entre uma etapa e outra, exceto pela medição no início da etapa CAM e na medição da peça via MMC, que representam o projeto ideal e o erro acumulado na peça final respectivamente, o erro máximo encontrado na etapa MMC não representa apenas o erro deste processo de medição, e sim, o erro acumulado em todas as etapas anteriores juntamente com a inserção das incertezas por parte da MMC. Ainda nesta mesma análise, é possível verificar que enquanto o erro máximo herdado da geração da trajetória é de 0,2 mm, a MMC detectou um erro de 0,8 mm.

Os resultados também demonstraram que o tipo de interpolação utilizada para gerar a trajetória da ferramenta também tem influência direta nos erros encontrados no processo de usinagem. Neste caso, a interpolação NURBS 5C obteve um maior número de pontos dentro

da tolerância superior e inferior, quando comparados com a interpolação NURBS 5M e linear. Embora, em um primeiro momento, a interpolação NURBS 5M tenha parecido ser uma melhor escolha para a produção da peça de trabalho com a tolerância de 0,005 mm, as etapas posteriores ao CAM não foram capazes de manter o processo dentro da tolerância estabelecida. Isto ocorre devido ao conjunto de fontes de erros existentes ao longo do processo que influenciam negativamente e com maior intensidade as tolerâncias mais apertadas. Isto também demonstra que, a partir da visão holística do resultado obtido e em uma produção real, devem ser verificadas as fontes de erros da etapa CAM - CNC para este tipo de tolerância, uma vez que nesta etapa os pontos com erros aumentaram em 627% contra 18% entre a etapa CNC - Centros de Usinagem.

Como conclusão final observa-se que o sistema de avaliação holística pode ser usado para compensar erros sistemáticos ao longo de toda a cadeia CAM-Centro de Usinagem, de forma melhorar o desempenho dos processos. Isto ocorre pela facilidade de se identificar o crescimento de um determinado desvio ao longo das etapas do processo de fabricação, de forma que se torna possível antecipar rotinas de compensação logo que um desvio geométrico é identificado. O processo de avaliação holística descrito neste documento pode ser utilizado recursivamente, ou seja, uma vez que é identificado um desvio geométrico, pode se tomar medidas de compensação e efetuar a comparação com o modelo nominal novamente, sempre identificando se a compensação pode realmente reduzir o desvio geométrico causado em uma determinada etapa do processo de fabricação, este desvio geométrico pode ser tratado e o processo de comparação pode ser executado novamente a fim de trabalhar com os resíduos de incerteza e classificação das fontes sistemáticas e aleatórias. Uma vez tratadas as causas fundamentais de incerteza, os resíduos tendem a diminuir e todo o processo tende a melhorar.

Como sugestões para trabalhos futuros podem ser enumerados os seguintes pontos:

- **Alterar as rotinas criadas para que seja possível avaliar superfícies de três dimensões, bem como avaliar outros pontos das saídas das etapas CAM - Centros de Usinagem, como, por exemplo, ação do pós-processamento, o desgaste da ferramenta de e vibrações do centro de usinagem.**
- **Efetuar o mapeamento controlado de determinadas fontes de erros entre a definição de estratégias do CAM e a medição na peça final, de forma a diminuir as diferenças entre as medições diretas e indiretas.**
- **Expandir a aplicação de medições indiretas para avaliar fatores como rugosidade da peça.**



## 6. REFERÊNCIAS

- ABBASZADEH-MIR, Y. *et al.* Theory and simulation for the identification of the link geometric errors for a five-axis machine tool using a telescoping magnetic ball-bar. *International Journal of Production Research*, v. 40, n. 18, p. 4781–4797, jan. 2002. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207540210164459>>. Acesso em: 2 out. 2012.
- ABBASZADEH-MIR, Y.; MAYER, J. R. R.; FORTIN, C. Methodology and simulation of the calibration of a five-axis machine tool link geometry and motion errors using polynomial modelling and a telescoping magnetic ball-bar. 2003, University of Huddersfield: [s.n.], 2003. p. 527–543.
- ABNT. *Associação Brasileira de Normas Técnicas - Tolerâncias geométricas - NBR 6904 - Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento - Generalidades, símbolos, definições e indicações em desenho.* . [S.l: s.n.]. , 1997
- ALBANO, A. *Estudo comparativo de processos de usinagens de superfícies complexas na fabricação de moldes de injeção de peças plásticas automotivas.* 2007. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007. Disponível em: <<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Estudo+comparativo+de+processos+de+usinagens+de+superf?cies+complexas+na+fabrica??o+de+moldes+de+inje??o+de+pe?as+pl?sticas+automotivas#0>>. Acesso em: 6 jul. 2013.
- ALBERTAZZI, A. Metrologia Parte I. p. 130, 2004.
- ALLEGRE, R.; BARBIER, A. A hybrid shape representation for free-form modeling. *Proc. Shape Modeling International*, p. 7–18, 2004. Disponível em: <[http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=1314489](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1314489)>. Acesso em: 27 jun. 2013.
- ALMACINHA, J. Introdução à nova linguagem ISO de especificação geométrica de produtos-Parte I: A classificação dos elementos geométricos de superfície e suas aplicações. *Tecnometal*, v. 161, p. 7–14, 2005. Disponível em: <<http://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/9201>>. Acesso em: 27 jun. 2013.
- ALMACINHA, J. Introdução à nova linguagem ISO de especificação geométrica de produtos-Parte II: Modelo para a especificação e verificação geométricas. *Tecnometal*, v. 162, p. 9–16, 2006. Disponível em: <<http://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/9199>>. Acesso em: 27 jun. 2013.
- ANOTAIPAIBOON, W.; MAKHANOV, S. S. Minimization of the kinematics error for five-axis machining. *Computer-Aided Design*, v. 43, n. 12, p. 1740–1757, dez. 2011. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010448511002314>>. Acesso em: 20 jul. 2012.
- BEARD, T. Machining From STL Files. *Modern Machine Shop*, p. 1–4, 1997.
- BIPM. JCGM 100:2008 - Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. *International Organization for Standardization (ISO)*, n. September, p. 134, 2008.
- BOHEZ, E. L. J. Compensating for systematic errors in 5-axis NC machining. *Computer-Aided Design*, v. 34, n. 5, p. 391–403, abr. 2002a. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448501001117>>. Acesso em: 10 mar. 2013.



BOHEZ, E. L. J. Five-axis milling machine tool kinematic chain design and analysis. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 42, n. 4, p. 505–520, mar. 2002b. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695501001341>>.

BOMBONATO, S. G.; LUSTOSA, A. A.; SILVA, M. B. DA. Análise do desgaste de ferramentas via emissão acústica com aplicações de redes neurais. *HORIZONTE CIENTÍFICO*, v. 61, p. 3024–3028, 2008.

BOZ, Y.; ERDIM, H.; LAZOGLU, L. *Modeling Cutting Forces for 5-Axis Machining of Sculptured Surfaces*. , n° TR2011-043. Massachusetts, Cambridge: [s.n.], 2011.

BRINGMANN, B. *Improving Geometric Calibration Methods for Multi-Axis Machining Centers by Examining Error Interdependencies Effects*. 2007. Zürich, 2007. Disponível em: <<http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:29779/eth-29779-02.pdf>>.

BUDAK, E. Analytical models for high performance milling. Part I: Cutting forces, structural deformations and tolerance integrity. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 46, n. 12-13, p. 1478–1488, out. 2006a. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695505002622>>. Acesso em: 28 fev. 2013.

BUDAK, E. Analytical models for high performance milling. Part II: Process dynamics and stability. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 46, n. 12-13, p. 1489–1499, out. 2006b. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695505002634>>. Acesso em: 28 fev. 2013.

CAMPBELL, R. J.; FLYNN, P. J. A Survey Of Free-Form Object Representation and Recognition Techniques. *Computer Vision and Image Understanding*, v. 81, n. 2, p. 166–210, fev. 2001. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1077314200908890>>. Acesso em: 5 out. 2012.

CAO, Y. *et al.* Study on tolerance modeling of complex surface. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 53, n. 9-12, p. 1183–1188, 26 ago. 2010. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/index/10.1007/s00170-010-2892-z>>. Acesso em: 25 out. 2012.

CARDOSO, F. G. *Análise de forças de fresamento de oscas API*. 2012. Centro Federal de Educação Tecnológica CEFET - RJ, 2012.

CHENG, M.-Y.; TSAI, M.-C.; KUO, J.-C. Real-time NURBS command generators for CNC servo controllers. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 42, n. 7, p. 801–813, maio 2002. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695502000159>>.

CHEUNG, C. F. *et al.* Measuring ultra-precision freeform surfaces using a hybrid fitting and matching method. *Measurement Science and Technology*, v. 20, n. 10, p. 105103, 1 out. 2009. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/0957-0233/20/i=10/a=105103?key=crossref.51bde72bb7affab91fc425054254ae2e>>. Acesso em: 25 out. 2012.

CHEUNG, C. F. *et al.* Measuring ultra-precision freeform surfaces using a robust form characterization method. *Measurement Science and Technology*, v. 17, n. 3, p. 488–494, 1 mar. 2006. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/0957-0233/17/i=3/a=S05?key=crossref.bf47c65c10e8de2984e68aad6a6b557d>>. Acesso em: 25 out. 2012.

CHILDS, T. *et al.* *Metal machining—theory and applications*, 2000. [S.l.]: Arnold, 2000. p. 408 Disponível em:

<<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Metal+Machining+Theory+and+Applications#4>>. Acesso em: 27 nov. 2012.

CHOI, Y. K. *Tool Path Generation and 3d Tolerance Analysis for Free-Form Surfaces*. 2004. Texas A&M University, 2004.

CONTE, E. G. DEL. *Desenvolvimento de um Sistema para Monitorar e Simular a Manufatura CNC*. 2013. Universidade Metodista de Piracicaba, 2013.

CONTE, E. G. DEL. *Desenvolvimento de um Sistema para o Monitoramento Dados em HSM (High Speed Machining)*. 2008. Universidade metodista de piracicaba, 2008.

DASSANAYAKE, K. M. M.; TSUTSUMI, M.; SAITO, A. A strategy for identifying static deviations in universal spindle head type multi-axis machining centers. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 46, n. 10, p. 1097–1106, ago. 2006. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695505002233>>. Acesso em: 2 out. 2012.

DERELI, T.; FILIZ, H. A note on the use of STEP for interfacing design to process planning. *Computer-Aided Design*, v. 34, n. 14, p. 1075–1085, dez. 2002. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010448501001877>>.

DESHMUKH, A. S. *et al.* Content-based assembly search: A step towards assembly reuse. *Computer-Aided Design*, v. 40, n. 2, p. 244–261, fev. 2008. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010448507002424>>. Acesso em: 25 out. 2012.

DORNFELD, D.; LEE, D.-E. *Precision Manufacturing*. Boston, MA: Springer US, 2008. Disponível em: <<http://www.lavoisier.fr/livre/notice.asp?id=O2SWL2A3KXLOWO>>. Acesso em: 6 jul. 2013.

DU, Z.; ZHANG, S.; HONG, M. Development of a multi-step measuring method for motion accuracy of NC machine tools based on cross grid encoder. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 50, n. 3, p. 270–280, mar. 2010. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695509002387>>. Acesso em: 9 out. 2012.

FENG, S. C.; YANG, Y. A dimension and tolerance data model for concurrent design and systems integration. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 14, n. 6, p. 406–426, jan. 1995. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/027861259599914Y>>.

FENG, Y. *A CAD based computer-aided tolerancing model for the machining process*. 2004. Indiana University South Bend, 2004. Disponível em: <[http://psumdesign.com/Newbook/metr/YFeng\\_thesis.pdf](http://psumdesign.com/Newbook/metr/YFeng_thesis.pdf)>. Acesso em: 13 nov. 2012.

FERRARESI, D. Fundamentos da usinagem dos metais. *Editora Edgard Blücher*, 1977. Disponível em: <<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Fundamentos+da+Uninagem+dos+metais#0>>. Acesso em: 8 abr. 2014.

FERRAZ JR, F.; COELHO, R. T. Data acquisition and monitoring in machine tools with CNC of open architecture using internet. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 26, n. 1-2, p. 90–97, 20 fev. 2004. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00170-003-1977-3>>. Acesso em: 7 jul. 2014.

GASPARIN, S. *Verification of Tolerance Chains in Micro Manufacturing Stefania Gasparin*. 2012. Technical University of Denmark, 2012.

GERMANI, M. *et al.* CAD-based environment to bridge the gap between product design and tolerance control. *Precision Engineering*, v. 34, n. 1, p. 7–15, jan. 2010. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141635908001207>>. Acesso em: 9 set. 2012.

GONG, H.; WANG, N. 5-axis flank milling free-form surfaces considering constraints. *Computer-Aided Design*, v. 43, n. 6, p. 563–572, jun. 2011. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010448511000376>>. Acesso em: 13 nov. 2012.

GONG, H.; WANG, N. Optimize tool paths of flank milling with generic cutters based on approximation using the tool envelope surface. *Computer-Aided Design*, v. 41, n. 12, p. 981–989, dez. 2009. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010448509001936>>. Acesso em: 25 out. 2012.

GRAY, P. J. *et al.* Comparison of 5-Axis and 3-Axis Finish Machining of Hydroforming Die Inserts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 17, n. 8, p. 562–569, 20 abr. 2001. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/openurl.asp?genre=article&id=doi:10.1007/s001700170139>>.

GRAY, P. J.; BEDI, S.; ISMAIL, F. Rolling ball method for 5-axis surface machining. *Computer-Aided Design*, v. 35, n. 4, p. 347–357, abr. 2003. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010448502000568>>.

GRAY, P. J.; ISMAIL, F.; BEDI, S. Graphics-assisted Rolling Ball Method for 5-axis surface machining. *Computer-Aided Design*, v. 36, n. 7, p. 653–663, jun. 2004. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010448503001416>>. Acesso em: 28 fev. 2013.

GROOVER, M. *Fundamentals Of Modern Manufacturing: Materials Processes, And Systems*. 4th. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2010. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cbdv.200490137/abstract>>. Acesso em: 17 out. 2012.

HAMBURG-PIEKAR, D. *Calibração de peças padrão em máquinas de medir por coordenadas*. 2006. Universidade Federal de Santa Catarina, 2006. Disponível em: <<http://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/14494>>. Acesso em: 31 out. 2012.

HANGOUËT, J. Computation of the Hausdorff distance between plane vector polylines. *AUTOCARTO-CONFERENCE-*, 1995. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cbdv.200490137/abstract>>. Acesso em: 6 jul. 2013.

HARIK, R. F.; GONG, H.; BERNARD, A. 5-axis flank milling: A state-of-the-art review. *Computer-Aided Design*, v. 45, n. 3, p. 796–808, mar. 2013. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010448512001728>>. Acesso em: 1 mar. 2013.

HARRIS, J. *Geometric and quasi-static thermal error compensation of a laser digitizer on a coordinate measuring machine*. 2004. Mc Master University, 2004. Disponível em: <<http://digitalcommons.mcmaster.ca/opensdissertations/1592>>. Acesso em: 27 nov. 2012.

HELLENO, A. L. *Contribuição para a manufatura de superfícies complexas com altas velocidades baseada em novos métodos de interpolação da trajetória da ferramenta ms*. 2008. Universidade Metodista de Piracicaba, 2008.

HELLENO, A. L.; SCHÜTZER, K. A IMPORTANCIA DO RECURSO DE ASSOCIATIVIDADE ENTRE OS SISTEMAS CAD/CAM NO NA GERAÇÃO DO PROGRAMA NC. *O Mundo da Usinagem*, v. 3, n. 23, p. 26–32, 2005.

HELLENO, A. L.; SCHÜTZER, K. Fatores que influenciam a usinagem de moldes e matrizes com altas velocidades. *Revista de Ciência & Tecnologia*, v. 12, n. 23, p. 7–14, 2004.

HENRIQUES, J. R. *Contribuição para a otimização da troca de dados geométricos entre sistemas CAD utilizando processadores STEP AP214*. 2004. Universidade Metodista de Piracicaba, 2004.

HOFFMAN, P. *et al.* *Precision Machining Technology*. [S.l.: s.n.], 2012. Disponível em: <[http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=kuqnZQpp724C&oi=fnd&pg=PR3&dq=Precision+Machining+Technology&ots=lShu7\\_N9Eg&sig=zBB8E-olgVjYDaT61JjSubHlfMg](http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=kuqnZQpp724C&oi=fnd&pg=PR3&dq=Precision+Machining+Technology&ots=lShu7_N9Eg&sig=zBB8E-olgVjYDaT61JjSubHlfMg)>. Acesso em: 25 fev. 2013.

HORMANN, K. Fitting free form surfaces. *Principles of 3d image analysis and synthesis*, p. 1–15, 2000. Disponível em: <<http://www.inf.usi.ch/hormann/papers/Hormann.2000.FFF.pdf>>. Acesso em: 28 nov. 2012.

HORNUS, S.; ANGELIDIS, A.; CANI, M. Implicit modeling using subdivision curves. *The Visual Computer*, 2003. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/index/JXHAEewaQCD4TD4C.pdf>>. Acesso em: 3 nov. 2012.

HOSSEINKHANI, Y.; AKBARI, J.; VAFAEESSEFAT, A. Penetration–elimination method for five-axis CNC machining of sculptured surfaces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 47, n. 10, p. 1625–1635, ago. 2007. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695506002872>>. Acesso em: 5 set. 2012.

ISO/TS 14253-1: Geometrical Product Specifications (GPS) — Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment Part 1: Decision rules for proving conformance or nonconformance with specifications. *International Organization for Standardization (ISO)*, v. 1998, 1998.

JANEIRO, R. DE. NBR 6158 Sistema de tolerâncias e ajustes. 1995.

JUNG, J.-H.; CHOI, J.-P.; LEE, S.-J. Machining accuracy enhancement by compensating for volumetric errors of a machine tool and on-machine measurement. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 174, n. 1-3, p. 56–66, maio 2006. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013605003249>>. Acesso em: 25 jul. 2012.

KHIM, T. S.; KEONG, L. C. Modeling the volumetric errors in calibration of five-axis cnc machine. *Proceedings of the international multiconference of ...*, v. III, 2010. Disponível em: <<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Modeling+the+Volumetric+Errors+in+Calibration+of+Five-axis+CNC+Machine#6>>. Acesso em: 23 jul. 2013.

KOREN, Y.; LO, C. C. Advanced Controllers for Feed Drives. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 41, n. 2, p. 689–698, jan. 1992. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607632557>>.

KWON, Y.; TSENG, T.-L.; ERTEKIN, Y. Characterization of closed-loop measurement accuracy in precision CNC milling. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 22, n. 4, p. 288–296, ago. 2006. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0736584505000451>>. Acesso em: 25 jul. 2012.

LASEMI, A.; XUE, D.; GU, P. A freeform surface manufacturing approach by integration of inspection and tool path generation. *International Journal of Production ...*, n. November, p. 37–41, 2012. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207543.2011.618148>>. Acesso em: 8 jul. 2013.

LASEMI, A.; XUE, D.; GU, P. Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review. *Computer-Aided Design*, v. 42, n. 7, p. 641–654, jul. 2010. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010448510000631>>. Acesso em: 2 out. 2012.

LEI, W. .; HSU, Y. . Accuracy enhancement of five-axis CNC machines through real-time error compensation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 43, n. 9, p.



871–877, jul. 2003. Disponível em:

<<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695503000890>>. Acesso em: 28 set. 2012.

LI, C.; BEDI, S.; MANN, S. Flank Millable Surface Design with Conical and Barrel Tools. *Computer-Aided Design and Applications*, v. 5, p. 461–470, 2008. Disponível em:

<[http://www.cadanda.com/CADanda\\_5\\_1-4\\_461-470.html](http://www.cadanda.com/CADanda_5_1-4_461-470.html)>. Acesso em: 28 fev. 2013.

LI, C.; MANN, S.; BEDI, S. Flank Millable Surfaces Generated via Polynomial Composition. *Computer-Aided Design and Applications*, v. 4, p. 41–48, 2007.

LI, Y.; GU, P. Free-form surface inspection techniques state of the art review. *Computer-Aided Design*, v. 36, n. 13, p. 1395–1417, nov. 2004. Disponível em:

<<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010448504000430>>. Acesso em: 25 ago. 2012.

LI, Z.; CHEN, W. The analysis of correlative error in principal axis method for five-axis machining of sculptured surfaces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 45, n. 9, p. 1031–1036, jul. 2005. Disponível em:

<<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695504003116>>. Acesso em: 25 out. 2012.

LIMA, D. O. DE; ARAUJO, A. C.; SILVEIRA, J. L. L. DA. INFLUÊNCIA DA PROFUNDIDADE DE CORTE E DO AVANÇO NA. 2012, São Luis - Maranhão: [s.n.], 2012. p. 0–9.

LIN, Y.; SHEN, Y. Modelling of Five-Axis Machine Tool Metrology Models Using the Matrix Summation Approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 21, n. 4, p. 243–248, 1 fev. 2003. Disponível em:

<<http://www.springerlink.com/Index/10.1007/s001700300028>>.

LOPEZ DE LACALLE, L. N. *et al.* Effects of tool deflection in the high-speed milling of inclined surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 24, n. 9-10, p. 621–631, 5 maio 2004. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00170-003-1723-x>>. Acesso em: 27 set. 2013.

LUCENA, H. N. DE. *Geração de Estratégia de Medição de Superfícies Complexas em Sistema CAD para Máquinas de Medir por Coordenadas*. 2009. Universidade Metodista de Piracicaba, 2009.

LUIS, J. *et al.* Benefits of advanced manufacturing technologies. *AFRICAN JOURNAL OF BUSINESS MANAGEMENT*, v. 6, n. 16, p. 5524–5532, 25 abr. 2012. Disponível em:

<[http://www.academicjournals.org/AJBM/abstracts/abstracts/abstracts2012/25Apr/Alcaraz et al.htm](http://www.academicjournals.org/AJBM/abstracts/abstracts/abstracts2012/25Apr/Alcaraz%20et%20al.htm)>. Acesso em: 10 jul. 2013.

MARTINS, M. A. F. *et al.* Comparação Entre os métodos Linear e Não Linear para a Avaliação da Incerteza de Medição. *Controle e Automação*, v. 21, n. 6, p. 557 – 576, 2010.

MATHEWS, J.; FINK, K. *Numerical methods using MATLAB*. [S.l.: s.n.], 1999. p. 336 Disponível em:

<[http://oldwww.just.edu.jo/~tawalbeh/cpe312/cpe312\\_syllabus\\_fall05.doc](http://oldwww.just.edu.jo/~tawalbeh/cpe312/cpe312_syllabus_fall05.doc)>. Acesso em: 21 ago. 2013.

MATOSO, N. P.; VALLE, P. D.; JUNIOR, O. C. Metodologia para gerenciamento de ferramentas de corte baseada no Sistema Toyota de Produção. 2003, Ouro Preto, MG, Brasil: [s.n.], 2003. p. 1–8.

MEARS, L. *et al.* Quality and Inspection of Machining Operations: CMM Integration to the Machine Tool. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v. 131, n. 5, p. 051006, 2009. Disponível em:

<<http://link.aip.org/link/JMSEFK/v131/i5/p051006/s1&Agg=doi>>. Acesso em: 2 out. 2012.

MEHRAD, V.; XUE, D.; GU, P. Prediction of Surface Reconstruction Uncertainties for Freeform Surface Inspection. *Measurement*, n. April, abr. 2013. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S026322411300136X>>. Acesso em: 27 maio 2013.

MEKID, S.; PRUSCHEK, P.; HERNANDEZ, J. Beyond intelligent manufacturing: A new generation of flexible intelligent NC machines. *Mechanism and Machine Theory*, v. 44, n. 2, p. 466–476, fev. 2009. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0094114X08000530>>. Acesso em: 25 jul. 2012.

MINETTO, C. DE F. *Um estudo sobre curvas Nurbs*. 2003. Universidade Federal do Rio Grande do Sul UFRGS, 2003.

MIRALLES, C. E. *Análise de Estratégias de Corte no Fresamento com 5 eixos*. 2009. Universidade Metodista de Piracicaba, 2009.

MORIWAKI, T. Multi-functional machine tool. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 57, n. 2, p. 736–749, jan. 2008. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850608001893>>. Acesso em: 7 maio 2014.

MOURA, A. Á. D. A. *Contribuições para o Desenvolvimento de um Modelador Baseado em Form Features com Interface STEP - ISO 10303*. 2003. UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA, 2003.

NAGATA, F.; KUSUMOTO, Y.; WATANABE, K. Intelligent machining system for the artistic design of wooden paint rollers. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 25, n. 3, p. 680–688, jun. 2009. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0736584508000677>>. Acesso em: 2 out. 2012.

NEJAD, M. K. *Propositions de résolution numérique des problèmes d'analyse de tolérance en fabrication: approche 3D*. 2009. UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER, 2009. Disponível em: <<http://www.theses.fr/2009GRE10188>>. Acesso em: 21 maio 2014.

NEWBY, G. *EMPIRICAL ANALYSIS OF CUTTING FORCE CONSTANTS IN MICRO END MILLING OPERATIONS* Glynn Newby *EMPIRICAL ANALYSIS OF CUTTING FORCE*. 2005. Georgia Institute of Technology, 2005.

NUNES, J. M. *Análise do efeito das interpolações sobre a qualidade do fresamento de superfícies complexas*. 2007. ITA - Instituto de Tecnologia da Aeronáutica, 2007.

NYIRENDA, P. J.; MULBAGAL, M.; BRONSVOORT, W. F. Definition of freeform surface feature classes. *Computer-Aided Design and Applications*, v. 3, n. 5, p. 665–674, 2006. Disponível em: <[http://www.cadanda.com/CAD\\_A\\_3\\_5\\_14.PDF](http://www.cadanda.com/CAD_A_3_5_14.PDF)>. Acesso em: 5 out. 2012.

OLIVEIRA, A. C.; AHRENS, C. H.; SCHROETER, R. Sistemas CAM para o fresamento em altas velocidades de moldes e matrizes. *O Mundo da Usinagem*, v. 2, p. 12 – 17, 2003.

OLIVEIRA, A. L. DE. *Validação de processos de medição por coordenadas em operações de controle de qualidade*. 2003. Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

OVERBY, A. *CNC Machining Handbook: Building, Programming, and Implementation*. [S.l.]: McGraw-Hill, 2010. Disponível em: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1594831>>. Acesso em: 17 out. 2012.

PAPA, M. C. DE O. *Modelo Decisório para Avaliar a Qualidade Geométrica e Dimensional de Superfície de Forma Livre*. 2012. Universidade Metodista de Piracicaba, 2012.

PERNOT, J.-P. *Fully Free Form Deformation Features for Aesthetic and Engineering Designs*. 2004. UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA, 2004.

PHIL, D. *Um Estudo sobre Curvas NURBS*. 2003. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

POLINI, W. To Carry Out Tolerance Analysis of an Aeronautic Assembly Involving Free Form Surfaces in Composite Material. *cdn.intechopen.com*, 2011. Disponível em: <[http://cdn.intechopen.com/pdfs/14298/InTech-To\\_carry\\_out\\_tolerance\\_analysis\\_of\\_an\\_aeronautic\\_assembly\\_involving\\_free\\_form\\_surfaces\\_in\\_composite\\_material.pdf](http://cdn.intechopen.com/pdfs/14298/InTech-To_carry_out_tolerance_analysis_of_an_aeronautic_assembly_involving_free_form_surfaces_in_composite_material.pdf)>. Acesso em: 4 mar. 2013.

POLLI, M. L. *Análise da Estabilidade Dinâmica do Processo de Fresamento a Altas Velocidades de Corte*. 2005. Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

PRATA; RUDRA. *Getting Started with MATLAB R 7*. [S.l.]: MathWorks, Inc., 2002. p. 4800

RADHAKRISHNAN, P.; SUBRAMANYAN, S.; RAJU, V. *CAD/CAM/CIM*. 3 Rd ed. [S.l.]: New Age International Pvt. Ltd., 2008.

RADZEVICH, S. P. *CAD/CAM of Sculptured Surfaces on Multi-Axis NC Machine: The DG/K-Based Approach*. [S.l.: s.n.], 2008. v. 3. p. 1–114 Disponível em: <<http://www.morganclaypool.com/doi/abs/10.2200/S00141ED1V01Y200806ENG008>>. Acesso em: 2 out. 2012.

RADZEVICH, S. P. Conditions of proper sculptured surface machining. *Computer-Aided Design*, v. 34, n. 10, p. 727–740, set. 2002. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010448501002020>>.

RAJA, J.; MURALIKRISHNAN, B.; FU, S. Recent advances in separation of roughness, waviness and form. *Precision Engineering*, v. 26, n. 2, p. 222–235, abr. 2002. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141635902001034>>.

RAKSIRI, C.; PARNICHKUN, M. Geometric and force errors compensation in a 3-axis CNC milling machine. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 44, n. 12-13, p. 1283–1291, out. 2004. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695504001129>>. Acesso em: 11 ago. 2012.

RAMESH, R.; MANNAN, M. .; POO, A. . Error compensation in machine tools — a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 40, n. 9, p. 1235–1256, jul. 2000. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695500000092>>. Acesso em: 13 nov. 2012.

RAMESH, R.; MANNAN, M. A.; POO, A. N. Tracking and contour error control in CNC servo systems. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 45, n. 3, p. 301–326, mar. 2005. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695504001919>>. Acesso em: 12 nov. 2012.

RAO, N.; ISMAIL, F.; BEDI, S. Tool path planning for five-axis machining using the principal axis method. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 37, n. 7, p. 1025–1040, jul. 1997. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695596000466>>. Acesso em: 27 nov. 2012.

RODGER, G.; FLACK, D.; MCCARTHY, M. *A review of industrial capabilities to measure free-form surfaces*. . United Kingdom: [s.n.], 2007. Disponível em: <<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:A+review+of+industrial+capabilities+to+measure+free-form+surfaces#0>>. Acesso em: 8 jul. 2013.

ROTH, D.; ISMAIL, F.; BEDI, S. Mechanistic modelling of the milling process using an adaptive depth buffer. *Computer-Aided Design*, v. 35, n. 14, p. 1287–1303, dez. 2003. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010448503000447>>. Acesso em: 2 ago. 2013.

ROTH, D.; ISMAIL, F.; BEDI, S. Mechanistic modelling of the milling process using complex tool geometry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 25, n. 1-2, p. 140–144, 28 jul. 2004. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00170-003-1853-1>>. Acesso em: 2 ago. 2013.

RUFENG, X. *et al.* Dual Drive Curve Tool Path Planning Method for 5-axis NC Machining of Sculptured Surfaces. *Chinese Journal of Aeronautics*, v. 23, n. 4, p. 486–494, ago. 2010. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1000936109602454>>. Acesso em: 1 mar. 2013.

SADÍLEK, M. *et al.* Aspects of Using Tool Axis Inclination Angle. *Strojníški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, v. 57, n. 09, p. 681–688, 15 set. 2011. Disponível em: <[http://en.sv-jme.eu/data/upload/2011/09/06\\_2010\\_205\\_Sadilek\\_04.pdf](http://en.sv-jme.eu/data/upload/2011/09/06_2010_205_Sadilek_04.pdf)>. Acesso em: 27 fev. 2013.

SARTORI, S.; ZHANG, G. G. X. Geometric error measurement and compensation of machines. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, v. 44, n. 2, p. 599–609, jan. 1995. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607605071>>. Acesso em: 27 nov. 2012.

SAVIO, E.; DE CHIFFRE, L.; SCHMITT, R. Metrology of freeform shaped parts. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 56, n. 2, p. 810–835, jan. 2007. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607001588>>. Acesso em: 25 jul. 2012.

SCHMITZ, T. L. *et al.* Case study: A comparison of error sources in high-speed milling. *Precision Engineering*, v. 32, n. 2, p. 126–133, abr. 2008. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141635907000748>>. Acesso em: 2 out. 2012.

SCHWENKE, H. *et al.* Geometric error measurement and compensation of machines—An update. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 57, n. 2, p. 660–675, jan. 2008. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850608001960>>. Acesso em: 13 ago. 2012.

SCHWENKE, H.; FRANKE, M.; HANNAFORD, J. Error mapping of CMMs and machine tools by a single tracking interferometer. *CIRP Annals- ...*, n. 2, p. 2–5, 2005.

SHE, C.-H.; CHANG, C.-C. Design of a generic five-axis postprocessor based on generalized kinematics model of machine tool. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 47, n. 3-4, p. 537–545, mar. 2007. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695506001428>>. Acesso em: 4 ago. 2013.

SHEN, H. *et al.* On-line Asynchronous Compensation Methods for static/quasi-static error implemented on CNC machine tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 60, p. 14–26, set. 2012. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695512000612>>. Acesso em: 25 jul. 2012.

SHIVANAND, H. K. *Flexible Manufacturing System*. [S.l.]: New Age International, 2006. p. 164 Disponível em: <<http://www.google.com/patents?hl=en&lr=&vid=USPAT4472783&id=lg4xAAAAEBAJ&oi=fnd&dq=Flexible+Manufacturing+System&printsec=abstract>>. Acesso em: 2 out. 2012.



SILVA, W. L. *et al.* ANÁLISE DE TEMPO NO PRESET E LEAN PRODUCTION NO SETOR DE MONTADORA DE AUTOMÓVEIS. 2011, Belo Horizonte, MG, Brasil: [s.n.], 2011. p. 14.

SMITH, E.; EL-SHAARAWI, A. H.; PIEGORSCH, W. W. Uncertainty analysis. v. 4, p. 2283–2297, 2002.

SOARES JUNIOR, L. *Sistemática para a garantia da qualidade na medição de peças com geometria complexa e superfície de forma livre utilizando máquina de medir por coordenadas*. 2010. Universidade Federal da Paraíba, 2010.

SOLIDWORKS. *HSM WORKS The CAM solution for solidworks Finishing*. Disponível em: <<http://www.hsmworks.com/docs/hsmworks/2012/en/#StrategyParallel>>. Acesso em: 7 maio 2012.

SOURLIER, D. *Three dimensional feature independent bestfit in coordinate metrology*. 1995. ETH, Zurich, Switzerland, 1995. Disponível em: <[http://3d-sw.com/Diss\\_Sourlier\\_1995.pdf](http://3d-sw.com/Diss_Sourlier_1995.pdf)>. Acesso em: 8 jul. 2013.

SOUSA, A. R.; WANDECK, M.; SILVA, D. O USO DO GD & T ALIADO AO CÁLCULO COMPUTACIONAL DE TOLERÂNCIAS. *Revista Máquinas e Metais*, v. 463, p. 56–75, 2004.

SOUSA, A. R. DE. *PADRÕES CORPORIFICADOS E A TECNOLOGIA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS INOVANDO A QUALIFICAÇÃO GEOMÉTRICA DE CENTROS DE USINAGEM*. 2000. Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.

SOUZA, A. F. DE. *Análise das Interpolações de Trajetórias de Ferramenta na Usinagem HSC (High Speed Cutting) em Superfícies Complexas*. 2001. Universidade Metodista de Piracicaba, 2001.

SOUZA, A. F. DE. *Contribuição ao fresamento de geometrias complexas aplicando a tecnologia de usinagem com altas velocidades*. 2004. Universidade de São Paulo, 2004.

SOUZA, A. F. DE; BODZIAK, S. Advanced Free Form Manufacturing by Computer Aided Systems–Cax. *cdn.intechopen.com*, 2012. Disponível em: <[http://cdn.intechopen.com/pdfs/35278/InTech-Advanced\\_free\\_form\\_manufacturing\\_by\\_computer\\_aided\\_systems\\_cax.pdf](http://cdn.intechopen.com/pdfs/35278/InTech-Advanced_free_form_manufacturing_by_computer_aided_systems_cax.pdf)>. Acesso em: 26 jun. 2013.

SOUZA, G. O. DE. *AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DO FRESAMENTO EM 5 EIXOS A CONJUNTOS DE SUPERFÍCIES COMPLEXAS*. 2011. Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, 2011.

SOUZA, G. O. DE. *FRESAMENTO EM 5-EIXOS SIMULTÂNEOS DE PÁS DE COMPRESSORES DE TURBINAS A GÁS EM TiAl6V4*. 2006. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2006.

SRINIVASAN, V. An integrated view of geometrical product specification and verification. *7th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing*, p. 1–10, 2001. Disponível em: <<http://isotc213.ds.dk/article/srini.pdf>>. Acesso em: 31 out. 2012.

SUH, S.; LEE, E.; JUNG, S. Error modelling and measurement for the rotary table of five-axis machine tools. *The International Journal of Advanced ...*, p. 656–663, 1998. Disponível em: <[http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=8Bw1kYTczX0C&oi=fnd&pg=PA55&dq=Advanced+Manufacturing+Technology&ots=9OHWhWKpn\\_&sig=sUY530lqR3KZuCL3SOJJxVmkDQM](http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=8Bw1kYTczX0C&oi=fnd&pg=PA55&dq=Advanced+Manufacturing+Technology&ots=9OHWhWKpn_&sig=sUY530lqR3KZuCL3SOJJxVmkDQM)>. Acesso em: 31 out. 2012.

SUH, S.-H. *et al. Theory and Design of CNC Systems - (Springer series in advanced manufacturing)*. London: Springer London, 2008. p. 466 Disponível em: <<http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-1-84800-336-1>>. Acesso em: 16 ago. 2013. (Springer Series in Advanced Manufacturing).

TANDON, P.; GUPTA, P.; DHANDE, S. Geometric modeling of end mills. ... *Aided Design and ...*, v. 2, p. 57–65, 2005. Disponível em: <[http://cadanda.homestead.com/V2Nos1to4\\_07.pdf](http://cadanda.homestead.com/V2Nos1to4_07.pdf)>. Acesso em: 25 fev. 2013.

TSCHÄTSCH, H. *Applied Machining Technology*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. Disponível em: <[http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=McjecjerC\\_sC&oi=fnd&pg=PA2&dq=Applied+Machining+Technology&ots=Xp7Wf-sRT9&sig=QOVSBpuxTr9sK1uDAGI7QNI1Jzc](http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=McjecjerC_sC&oi=fnd&pg=PA2&dq=Applied+Machining+Technology&ots=Xp7Wf-sRT9&sig=QOVSBpuxTr9sK1uDAGI7QNI1Jzc)>. Acesso em: 17 out. 2012.

TSUTSUMI, M.; SAITO, A. Identification of angular and positional deviations inherent to 5-axis machining centers with a tilting-rotary table by simultaneous four-axis control movements. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 44, n. 12-13, p. 1333–1342, out. 2004. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S089069550400104X>>. Acesso em: 2 out. 2012.

TUTUNEA-FATAN, O. R.; BHUIYA, M. S. H. Comparing the kinematic efficiency of five-axis machine tool configurations through nonlinearity errors. *Computer-Aided Design*, v. 43, n. 9, p. 1163–1172, set. 2011. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010448511001138>>. Acesso em: 26 jul. 2013.

UHLMANN, E. *et al.* Simulation and analysis of error impact on freeform surface milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 21 set. 2013. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00170-013-5280-7>>. Acesso em: 3 out. 2013.

VAHEBI NOJEDEH, M.; HABIBI, M.; AREZOO, B. Tool path accuracy enhancement through geometrical error compensation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 51, n. 6, p. 471–482, jun. 2011. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695511000368>>. Acesso em: 20 jul. 2012.

VOLTAN, A. *Metrological performance verification of optical Coordinate Measuring Systems*. 2010. Università degli Studi di Padova, 2010. Disponível em: <[http://paduaresearch.cab.unipd.it/2797/1/PhD\\_Alessandro\\_Voltan.pdf](http://paduaresearch.cab.unipd.it/2797/1/PhD_Alessandro_Voltan.pdf)>. Acesso em: 6 jul. 2013.

WALSH, R. A. *Handbook of machining and metalworking calculations*. [S.l.]: McGraw-Hill, 2001. p. 400

WARKENTIN, A. *Multi-point machining of sculptured surfaces*. 1998. University of Waterloo, 1998. Disponível em: <<https://uwspace.uwaterloo.ca/handle/10012/203>>. Acesso em: 18 jan. 2013.

WARKENTIN, A.; ISMAIL, F.; BEDI, S. Comparison between multi-point and other 5-axis tool positioning strategies. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 40, n. 2, p. 185–208, jan. 2000. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695599000589>>.

WARKENTIN, A.; ISMAIL, F.; BEDI, S. Intersection approach to multi-point machining of sculptured surfaces. *Computer Aided Geometric Design*, v. 8396, n. 97, 1998. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167839697000393>>. Acesso em: 8 jul. 2013.

YU, D. *et al.* Local discretization without tolerance in the CAD/CAM and NC programming of a sculptured surface. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 57, n. 1-2, p. 195–200, fev. 1996. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0924013695020470>>.

ZHANG, X. *et al.* A STEP-compliant process planning system for CNC turning operations. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 27, n. 2, p. 349–356, abr. 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2010.07.018>>. Acesso em: 20 jul. 2012.

ZHAO, F.; XU, X.; XIE, S. STEP-NC enabled on-line inspection in support of closed-loop machining. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 24, n. 2, p. 200–216, abr. 2008. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0736584506001141>>. Acesso em: 2 out. 2012.

ZHU, S. *et al.* Integrated geometric error modeling, identification and compensation of CNC machine tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 52, n. 1, p. 24–29, jan. 2012. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695511001490>>. Acesso em: 20 jul. 2012.

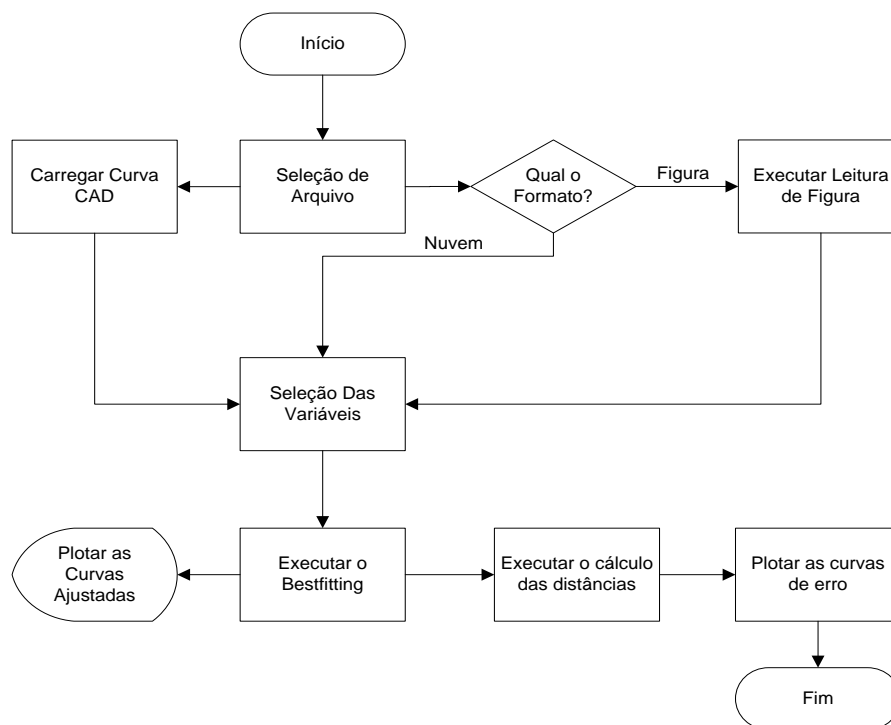
## ANEXO

### I. ANEXO A - MÉTODO DE AJUSTE E AVALIAÇÃO DAS CURVAS MEDIDAS

Para que seja possível alcançar os objetivos secundários descritos no capítulo 1, rotinas de alinhamentos, reconstrução e comparação de curvas livres foram desenvolvidas, de forma que fosse possível avaliar cada saída das diversas etapas da cadeia CAM-MMC, com o mesmo conjunto de ações, possibilitando assim, se estabelecer um comportamento holístico de cada saída, ao mesmo tempo em que se torna possível computar, pela mesma forma de avaliação, as diversas fontes de erros diferentes, que se combinam entre si a fim de criar um conjunto final de erros combinados.

A figura A 1 demonstra o fluxograma das rotinas desenvolvidas no Matlab<sup>®</sup> (Mathworks<sup>™</sup>, EUA) desde a seleção do arquivo até a exibição do gráfico de erros das curvas ajustadas.

A etapa de seleção do arquivo permite como entrada dois tipos básicos de arquivos no Matlab<sup>®</sup>: arquivos cujos pontos das retas estão dispostos como nuvem de pontos e arquivos no formato figuras nativas do Matlab<sup>®</sup>. Foi criada a possibilidade de se carregar arquivos no formato figura do Matlab<sup>®</sup> para aumentar a flexibilidade da rotina e permitir comparações diretamente com gráficos criados anteriormente.



A 1 Fluxograma das rotinas Matlab<sup>®</sup> para avaliação de curvas

As rotinas de ajuste são responsáveis por garantir o alinhamento (localização e posicionamento) das curvas sob o mesmo sistema de coordenadas. Isto significa que antes que os pontos que compõem cada curva possam ser analisados, é necessário garantir que tanto os pontos que compõem a curva ideal, e estão no sistema de coordenadas ideal (como o definido no CAD), e os pontos presentes nas curvas medidas, e por isso em um sistema de coordenadas diferente, estejam sob um mesmo sistema de coordenadas.

A seleção das variáveis também é uma tarefa manual, pois tanto os arquivos carregados via nuvem de pontos quanto os arquivos carregados via arquivo de figura estão organizados em matrizes que representam os eixos de um plano cartesiano bi ou tridimensional e as linhas representam os pontos presentes em cada um destes eixos.

## I. Rotinas de ajustes (*Best fitting*)

A rotina de ajuste é executada em dois passos básicos que são repetidos até que o ajuste alcance um valor aceitável, ou seja, até que a média de pontos medidos esteja tão próxima quanto possível da média dos pontos nominais, após ambos estarem dispostos sob o mesmo sistema de coordenadas.

O primeiro passo é identificar os dados do eixo X da curva nominal, este deverá ser o passo do eixo X que será seguido por ambas as curvas no novo sistema de coordenadas, ele também permitirá a primeira translação de ambas as curvas para que elas se iniciem no mesmo ponto (equação 24 e 25).

$$X_{med} = X_{med} - (X_{med}(1) - X_{nom}(1)) \tag{A1}$$

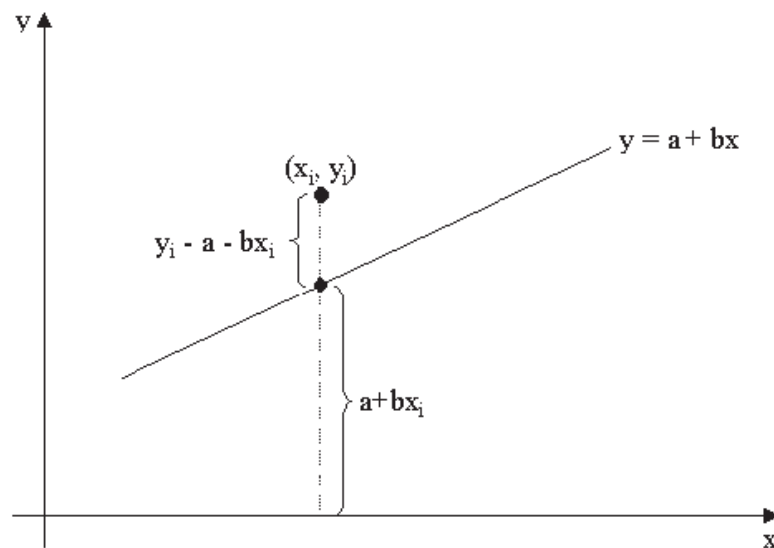
$$Z_{med} = Z_{med} - (Z_{med}(1) - Z_{nom}(1)) \tag{A2}$$

$X_{med}$  e  $Z_{med}$ ,  $X_{nom}$  e  $Z_{nom}$  representam os vetores das coordenadas X e Z das curvas avaliadas e nominais respectivamente.

O método dos mínimos quadrados é então utilizado para definir uma reta que possui a menor distância de todos os pontos de uma curva bidimensional. Após os movimentos de translação esta linha é usada para calcular o desvio angular de ambas as curvas dentro de seus respectivos sistemas de coordenadas. Desta forma é possível encontrar os parâmetros da linha que representam os parâmetros globais da curva em relação ao seu sistema de coordenadas.

O problema inicial é encontrar uma forma de ajustar um conjunto de pontos (pontos da curva) a uma reta cuja equação geral é descrita na equação 24, onde  $a$  e  $b$  são os parâmetros a serem determinados. O interesse é minimizar de cada ponto  $(x_i, y_i)$  dos pontos da curva a cada ponto  $(x_i, b + x_i)$  da reta conforme mostra a figura A 2.

$$y = a + bx \tag{A3}$$



A 2: Distância de um ponto à reta

A distância entre esse ponto é  $|y_i - a - bx_i|$  e a soma dos quadrados da distância é:

$$q = \sum_{i=1}^n (y - a - bx_i)^2 \quad (\text{A4})$$

Os candidatos a pontos mínimos desta função são aqueles para os quais as derivadas parciais de  $q$  para cada uma de seus parâmetros são nulas.

$$\frac{\partial q}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n (y - a - bx_i) = 0 \quad (\text{A5})$$

$$\frac{\partial q}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n x_i (y - a - bx_i) = 0 \quad (\text{A6})$$

A partir destas equações é possível montar um sistema de equações capaz de permitir a dedução dos coeficientes linear e angular que aproximam os pontos da curva a uma reta.

$$\begin{cases} na + \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) b = \sum_{i=1}^n y_i \\ \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) a + \left( \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) b = \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{cases} \quad (\text{A7})$$

A tradução de tais equações em rotinas Matlab<sup>®</sup> é uma tarefa relativamente simples, uma vez que todas as equações já possuem comandos internos implementados. Basta, para tanto, salvar em cada variável diferente as seguintes tarefas: obter o tamanho do vetor referente à entrada  $x$ , calcular os somatórios dos valores de  $x$  e de  $y$ , elevar o somatório de  $x$  ao quadrado e multiplicar o somatório de  $x$  pelo somatório de  $y$ . Ao organizar cada variável em uma matriz 2x3 é possível utilizar o comando “rref” para solucionar o sistema pela forma escalonada reduzida. Os valores da 5ª e 6ª posições da matriz escalonada representam respectivamente o coeficiente angular  $a$  e linear  $b$  da reta que aproxima a curva, e que o arco-tangente do coeficiente angular representa o valor, em graus que a reta tem em relação ao seu eixo  $X$  (MATHEWS; FINK, 1999; PRATA; RUDRA, 2002).

Após as definições das retas que aproximam as respectivas curvas, nominal e medida, vale lembrar que cada reta ainda está em relação ao seu respectivo sistema de coordenadas. Assim, é necessário estabelecer o comportamento destas no sistema de coordenadas que será

compartilhado por ambas. Para tanto, é necessário que as retas sejam interpoladas em razão do vetor  $x$  do sistema de coordenadas compartilhado bem como dos coeficientes angulares de ambas, o valor de  $b$ . Como se trata de linhas retas a interpolação linear é a mais apropriada por representar um menor consumo computacional que interpolações paramétricas.

Para encontrar o ângulo entre as retas no sistema de coordenadas compartilhado, basta aplicar a mesma rotação para as respectivas curvas já interpoladas em função de  $X$  utilizando-se as rotações de Euler (equação 31).

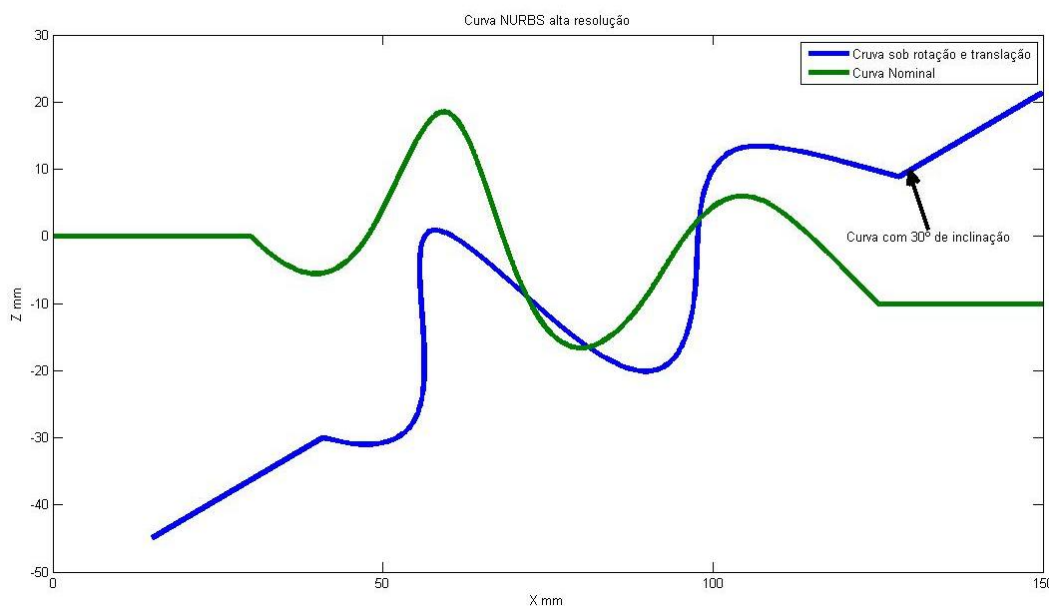
$$\begin{cases} X_f = X_i * \cos(\alpha) - Z_i * \text{sen}(\alpha) \\ Z_f = X_i * \text{sen}(\alpha) + Z_i * \cos(\alpha) \end{cases} \quad (\text{A8})$$

$X_f$  e  $Z_f$  são os valores das coordenadas  $X$  e  $Z$  após a rotação e translação, enquanto  $X_i$  e  $Z_i$  são os valores das coordenadas da curva NURBS de alta resolução antes da alteração e  $\alpha$  é o valor do ângulo de inclinação da curva.

Como forma de ilustração e comprovação da eficácia do método, a curva NURBS de alta resolução foi inclinada em  $30^\circ$  através equação de rotação de Euler, para depois sofrer uma translação ao longo do eixo  $X$  em 15 mm e ao longo do eixo  $Z$  em -45 mm, conforme descrito na equação 32 que é uma junção das equações 24, 25 e 31, com  $\alpha = 30$ . O resultado, juntamente com a curva nominal foram plotados na figura A 3.

$$\begin{cases} X_f = (X_i * \cos(30) - Z_i * \text{sen}(30)) + 15 \\ Z_f = (X_i * \text{sen}(30) + Z_i * \cos(30)) - 45 \end{cases} \quad (\text{A9})$$

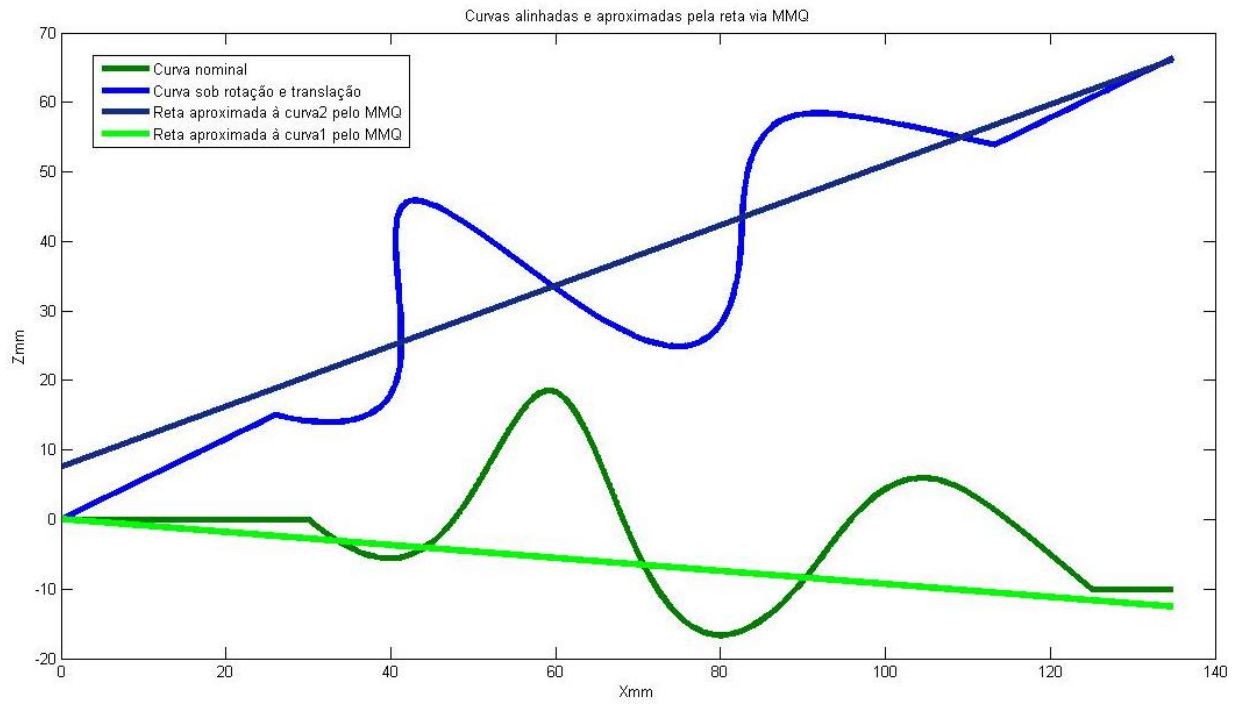




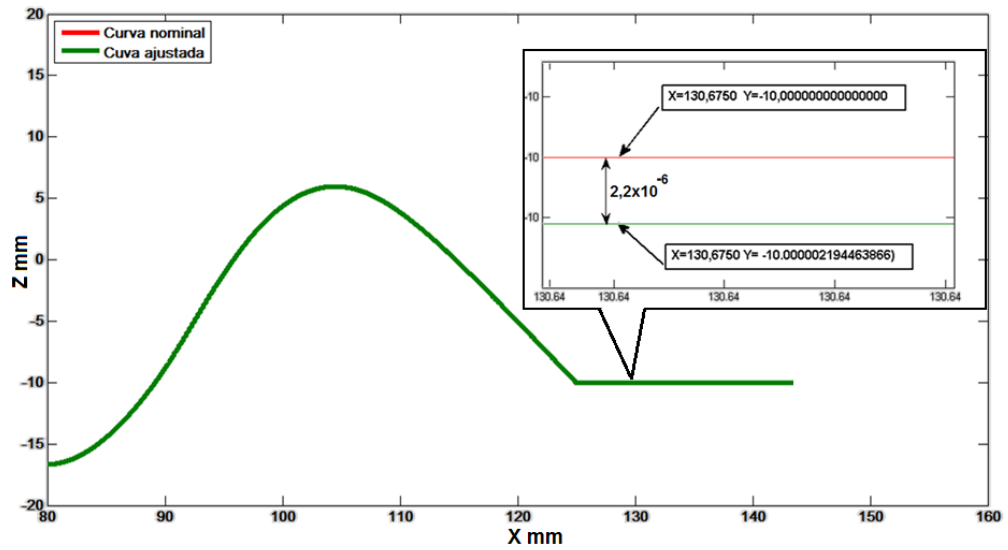
A 3: Curva de alta resolução sob translação e rotação

A figura A4 demonstra as curvas alinhadas pelo início, bem como as retas aproximadas pelo MMQ, o próximo passo é a definição do ângulo de uma reta em relação à outra para que a curva possa ser girada novamente e assim verificar se o ajuste está correto. Como esta parte está sendo utilizada para efeito de teste, sabe-se que o sistema vai ajustar a curva com um erro residual muito baixo ( $10^{-6}$ ), e vai informar uma inclinação de  $30^\circ$ .

Conforme esperado, o ângulo entre as duas retas foi identificado como  $30^\circ$  e a curva foi reescrita sendo girada em sentido contrário. A figura A 5 demonstra as duas curvas ajustadas e plotadas. Como as curvas são compostas por um grande número de pontos em relação ao seu tamanho, e estão com valores muito próximos entre si, apenas uma parte foi realmente plotada enquanto outra sofreu uma aproximação para identificar qual foi o resíduo de erro inserido pelo sistema. Este erro é proveniente das sucessivas aproximações que o sistema faz automaticamente. Como pode ser observado no destaque o erro residual está na escala de  $10^{-6}$  do milímetro, o que demonstra um erro em escala nanométrica, e, por este motivo, pode ser descartado. Esta ordem de grandeza se manteve para todos os 12.200 pontos que compõem a curva ajustada.



A 4: Curva de teste sob primeira fase de ajuste



A 5: Figura ajustada e erro residual

## II. Rotina de comparação de curva (*Best matching*)

Após a execução da rotina de ajustes de curvas é possível garantir que ambas as curvas estão sob o mesmo sistema de referências, e que estão com a média dos pontos tão próximos quanto possível (ajustes de rotação e translação) sem que a curva medida tenha sofrido alguma alteração que comprometa a sua integridade. Assim é possível iniciar o processo de comparação de distâncias ponto a ponto. De fato, no ajuste de curvas, o processo de interpolação também garante que ambas as curvas passem a possuir o mesmo número de pontos, e se ambos estão em função da mesma abscissa  $X$  elas vão se referir ao ponto de mesma posição nas curvas.

A comparação ponto a ponto entre a curva nominal e medida ocorre seguindo a definição da distância Euclidiana, baseada na equação 33 (HAMBURG-PIEKAR, 2006; LI, Y.; GU, 2004):

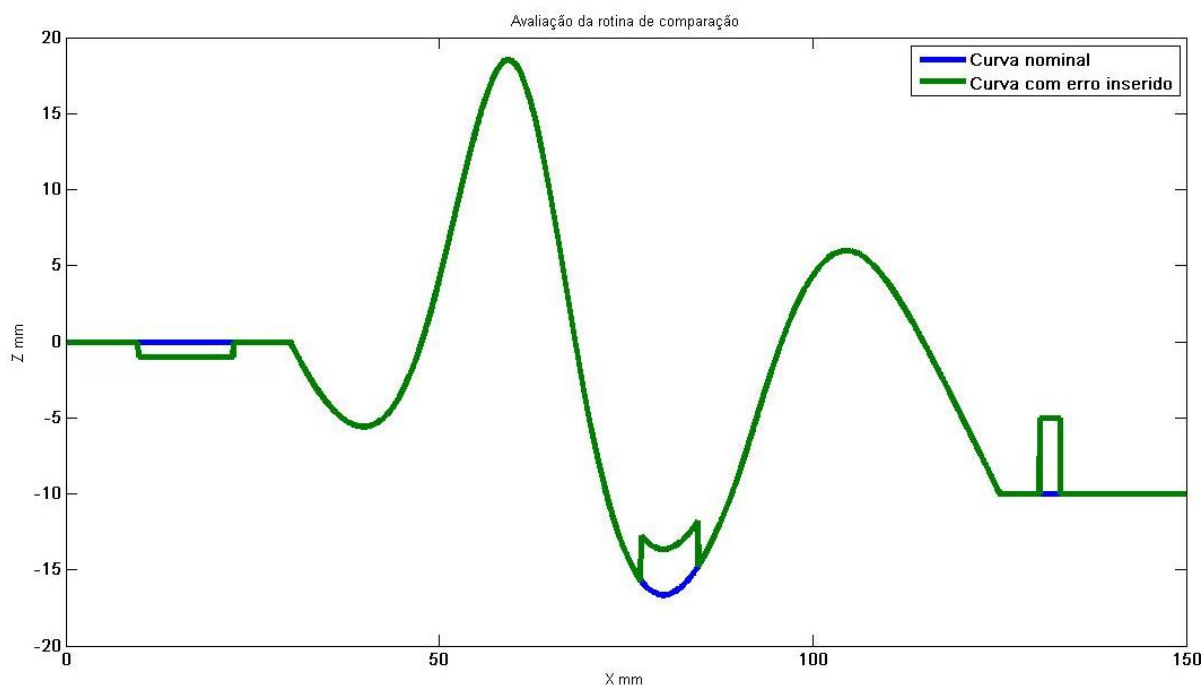
$$D = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + (p_2 - q_2)^2 + (p_3 - q_3)^2 + \dots + (p_n - q_n)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - q_i)^2} \quad (\text{A10})$$

Onde  $p$  e  $q$  são pontos nas curvas medidas e nominal respectivamente, cada ponto  $p$  ou  $q$  é composto por uma dupla de valores que representam os eixos avaliados podendo  $X$  e  $Y$  ou  $X$  e  $Z$ , de acordo com as informações dadas na entrada de dados como relevantes, como descrito na etapa anterior, o presente documento está avaliando as coordenadas  $X$  e  $Z$ .

Como forma de avaliar os pontos presentes em cada saída ajustada à curva NURBS de alta resolução, as comparações ocorrem ponto a ponto ao longo do eixo  $X$ . Para cada  $X$  encontrado, a distância entre a coordenada  $Z$  da curva nominal e a curva medida é avaliada, ao final pode ser gerado um gráfico com as distâncias de cada ponto. Também é possível identificar o crescimento de erro presente em cada saída apenas pela avaliação de cada fonte saída com a etapa seguinte, de forma que a última etapa avaliada demonstrará a quantidade total de erros acumulados.

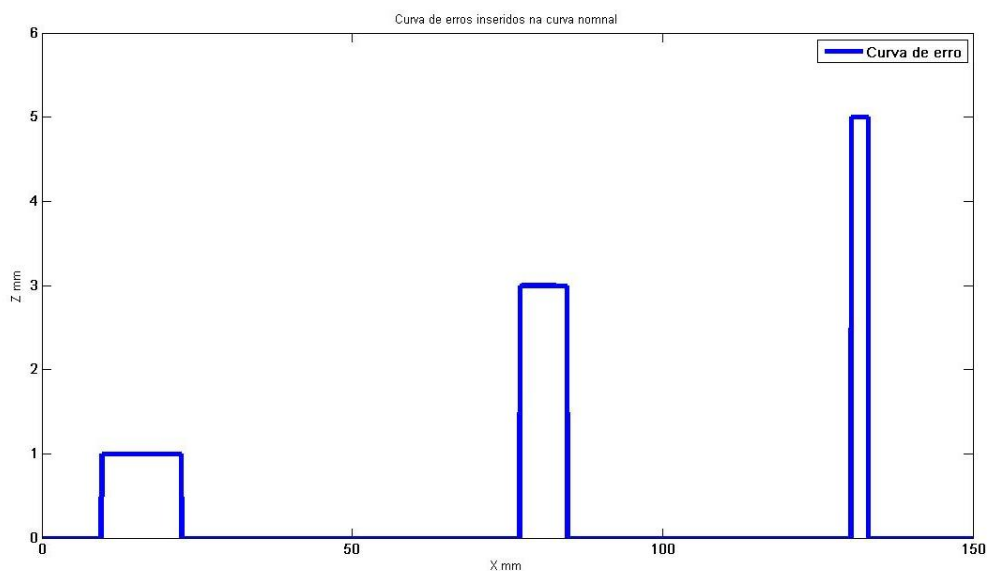
De forma semelhante ao subitem anterior, para esta etapa, uma curva com o erro conhecido foi gerada para que seja possível avaliar se o método funciona e qual o seu possível erro residual. Desta maneira, a curva nominal foi copiada e teve um conjunto de dados modificados, desta vez, não houve nenhuma operação de translação ou rotação.

Os erros inseridos foram: decréscimo de 1 mm em um conjunto de 510 pontos que inicialmente estavam fixo em 0 mm, acréscimo de 5 mm em um conjunto de 106 pontos com valor fixo em -10 mm e um acréscimo de 3 mm em uma área de curva composta por 959 pontos com posições em  $Z$  variando entre -15,79 mm até -11,79 mm A 6.



A 6: Curva com erro conhecido

Ao executar a rotina de comparação de uma curva com erro conhecido, o sistema reconheceu os pontos com erros e computou a amplitude do erro em cada ponto conforme esperado. O resultado pode ser avaliado na figura A 7.



A 7: Curva nominal com erro conhecido

Vale salientar que a figura A 7 mostra todos os erros em valor positivo, pois no presente trabalho, o erro está sendo representado como a distância absoluta entre o ponto nominal e o ponto real da curva medida.

Conclui-se desta forma que o método desenvolvido para avaliar as diversas saídas da cadeia de CAM-MMC pôde ser validado tanto no tocante às rotinas de ajustes de curvas (*Best Fit*) como nas rotinas de comparação de erros (*Best Match*). A partir da inserção de erros conhecidos sobre uma curva ideal foi possível reconhecer que determinada curva medida pode estar ideal, embora com modificações em seu sistema de coordenadas, ou pode ter desvios reais em seus pontos quando comparados com o projeto. Na prática as duas rotinas são utilizadas em conjunto, pois uma curva de um projeto executado reúne tanto desvios de posicionamento quanto desvios reais em seus pontos. Também deve ser lembrado que as fontes de erros que influenciam um determinado ponto da curva sempre se somam, quando duas ou mais fontes se combinam para aumentar a distância entre o projeto e o medido, ou sempre se anulam, quando duas ou mais fontes de erros se influenciam mutuamente para diminuir a distância entre o projetado e o executado. Por este motivo as rotinas desenvolvidas neste trabalho apenas medem de forma indireta as consequências das diversas ações das fontes de erros sobre uma determinada curva, sem ser possível quantificar, diretamente, dois efeitos separados atuando sobre um mesmo ponto na curva.