



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Mestrado - Doutorado

**DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTRATÉGIA DE
MEDIÇÃO, BASEADA EM NURBS, PARA
DETERMINAÇÃO DO DESVIO TOTAL DE PERFIL
(F_a) DE ENGRENAGENS CILÍNDRICAS DE
DENTES RETOS USANDO MMCs**

por

Luiz Henrique Melo Silva Nóbrega

Tese de Doutorado submetida à Universidade Federal da Paraíba
para obtenção do título de Doutor

LUIZ HENRIQUE MELO SILVA NÓBREGA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTRATÉGIA DE
MEDIÇÃO, BASEADA EM *NURBS*, PARA
DETERMINAÇÃO DO DESVIO TOTAL DE PERFIL
(F_a) DE ENGRENAGENS CILÍNDRICAS DE
DENTES RETOS USANDO MMCs**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Título de Doutor.

Orientador: Professor Dr. João Bosco de Aquino Silva

N754d Nóbrega, Luiz Henrique Melo Silva.
Desenvolvimento de uma estratégia de medição, baseada em NURBS, para determinação do Desvio Total de Perfil ($F\alpha$) de engrenagens cilíndricas de dentes retos usando MMCs / Luiz Henrique Melo Silva Nóbrega.- João Pessoa, 2016.
189f. : il.
Orientador: João Bosco de Aquino Silva
Tese (Doutorado) - UFPB/CT
1. Engenharia mecânica. 2. Máquina de Medição por Coordenadas (MMC). 3. Touch Trigger Probe (TTP).
4. Engrenagens cilíndricas de dentes retos. 5. NURBS.
6. Desvio Total de Perfil ($F\alpha$).

UFPB/BC

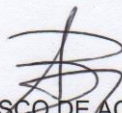
CDU: 621(043)

**DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTRATÉGIA DE MEDIÇÃO,
BASEADA EM NURBS, PARA DETERMINAÇÃO DO DESVIO
TOTAL DE PERFIL (F_α) DE ENGRENAGENS CILÍNDRICAS DE
DENTES RETOS USANDO MMCs**

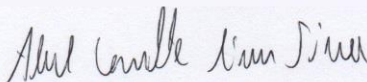
por

Luiz Henrique Melo Silva Nóbrega

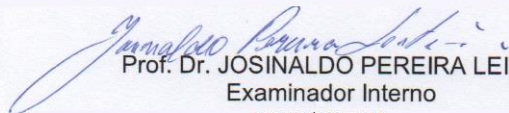
Tese aprovada em 07 de abril de 2016



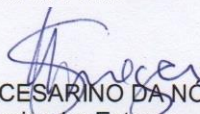
Prof. Dr. JOÃO BOSCO DE AQUINO SILVA
Orientador
UFPB/PPGEM



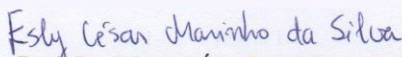
Prof. Dr. ABEL CAVALCANTE LIMA FILHO
Examinador Interno
UFPB/PPGEM



Prof. Dr. JOSINALDO PEREIRA LEITE
Examinador Interno
UFPB/PPGEM



Prof. Dr. SEVERINO CESARINO DA NOBREGA NETO
Examinador Externo
IFPB



Prof. Dr. ESLY CÉSAR MARINHO DA SILVA
Examinador Externo
IFBA



Prof. Dr. JOSÉ CARLOS DE LIMA JÚNIOR
Examinador Externo
UFPB/CT

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a **Deus**, por está me iluminando em mais uma etapa da minha vida, aos meus pais **Antônio Roberto Nóbrega** e **Rosa de Lourdes Melo Silva Nóbrega**, ao meu irmão **Carlos Alberto Nóbrega Sobrinho**, a minha noiva **Maria Augusta Paraguassú Martins Guerra** e a todas as pessoas que contribuíram com a minha formação.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me iluminou imensamente durante este período, pois sem Sua providência nada seria possível. Também agradeço a intercessão de Nossa Senhora.

Aos meus pais Antônio Roberto Nóbrega e Rosa de Lourdes Melo Silva Nóbrega, pela dedicação, zelo, cuidado e compreensão em todas as etapas desta e de outras caminhadas.

Ao meu irmão Carlos Alberto Nóbrega Sobrinho, pelo incentivo, exemplo e apoio durante essa e outras etapas da vida.

A minha noiva Maria Augusta Paraguassú M. Guerra, pelo apoio, compreensão, carinho, paciência e dedicação dispensada durante este período.

As minhas avós Severina Cabral Nóbrega [*in memoriam*] e Maria de Lourdes Melo Silva Nóbrega, pelos ensinamentos e orações.

Aos meus avôs Pedro Alves da Silva [*in memoriam*] e Benício Bezerra Nóbrega [*in memoriam*], pelos ensinamentos.

Ao amigo Igor Lucena Peixoto Andrezza, pela contribuição na elaboração no *software* computacional utilizado neste trabalho de tese.

Ao amigo Edleusom Saraiva da Silva, pela contribuição nas medições usando a MMC do IFPB Cajazeiras.

Ao grande amigo e parceiro de mestrado, doutorado e profissão, Verílton Nunes da Silva, pela contribuição, dedicação e atenção no decorrer deste trabalho.

Aos amigos Rafael Franklin Alves Silva, Francisco Augusto Vieira da Silva e Fábio Andrade Barroso por todo apoio, dedicação, esforço e compartilhamento de suas experiências no decorrer deste trabalho.

Ao professor e amigo Jobson Francisco da Silva, pela contribuição na confecção das engrenagens utilizadas nos procedimentos experimentais. Aproveito para agradecer a Sra. Cléa Cavalcante da Silva, pela dedicação e incentivo a este trabalho.

Aos amigos e professores que integram o Laboratório de Engenharia de Precisão, da Universidade Federal da Paraíba.

Ao professor Severino Cesarino da Nóbrega Neto, pelo incentivo e exemplo durante minha vida acadêmica.

Ao professor coorientador José Carlos de Lima Júnior pelo esforço dispensado e dedicação neste trabalho.

Ao professor orientador João Bosco de Aquino Silva pela sua orientação, força e preciosos ensinamentos dispensados durante todo este período de trabalho.

Ao grande Pe. Léo [*in memoriam*], pelos seus ensinamentos, incentivos, orações e palavras de conforto durante este período de 3,5 anos.

A todos os professores, funcionários e amigos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, em especial a servidora Mônica Rodrigues da Silva e ao servidor Noaldo Sales dos Santos.

Ao Instituto Federal da Paraíba (IFPB), *Campus* Cajazeiras, pelo incentivo a esta formação e por disponibilizar a Máquina de Medição por Coordenada do Laboratório de Metrologia, para realização dos procedimentos experimentais deste projeto de doutorado. Também agradeço aos *campi* do IFPB João Pessoa e Itabaiana.

RESUMO

Por muitos anos a transmissão de movimento e de potência por engrenagens tem sido uma tecnologia importante nas indústrias automotiva, mecânica e aeronáutica, justificando assim a considerável quantidade de pesquisas realizadas no âmbito do controle de qualidade destes componentes. Atualmente, inspeções dos perfis evolventes de engrenagens cilíndricas vêm sendo realizadas utilizando Máquinas de Medição por Coordenadas (MMCs) CNC com mesas rotativas e *softwares* de medição dedicados, equipadas com sensores por contato de escaneamento, do tipo *Touch Trigger Probe – TTP*, ou sem contato, *Laser*. Porém, muitas empresas que fabricam e inspecionam engrenagens utilizam MMCs manuais com sensores do tipo ponto a ponto, ficando assim impossibilitadas de emitir o relatório de desvio de perfil. Neste sentido, a motivação para esta pesquisa é desenvolver e validar estratégias de inspeção para determinação do Desvio Total de Perfil (F_α) de engrenagens cilíndrica de dentes retos, segundo a norma ISO 1328, fazendo o uso da ferramenta matemática *NURBS* (*Non – Uniform Rational B-Splines*) e de MMCs manuais. Estratégias para alteração do parâmetro peso w_i das *NURBS* também serão aplicadas para auxiliar na definição do procedimento de inspeção, sendo este um grau de liberdade a mais do modelo. No primeiro momento, antes da execução dos procedimentos experimentais, simulações foram realizadas em um sistema computacional, e apresentaram resultados satisfatórios. Para os testes experimentais foi utilizada uma MMC manual modelo *MICRO-HITE 3D*, com sensor do tipo ponto a ponto. Resultados de simulações e experimentais mostraram que a técnica *NURBS* contribui para aplicação de MMC manual usando sensor *Touch Trigger* na medição do perfil evolvente de engrenagens cilíndricas de dentes retos. Os resultados experimentais demonstraram a eficácia da metodologia desenvolvida.

Palavras Chave: Máquina de Medição por Coordenadas (MMC), *Touch Trigger Probe* (TTP), Engrenagens Cilíndricas de Dentes Retos, *NURBS*, Desvio Total de Perfil (F_α).

ABSTRACT

For many years the power transmission and movement for gears has been an important technology in the automotive, mechanical and aeronautical industries, justifying the considerable number of research carried out under the quality control of these components. Nowadays, involute profile inspections of cylindrical gears have been carried out using CNC Coordinate Measuring Machines (CMMs) with rotary tables and dedicated measurement software, equipped with contact scanning sensors, Touch Trigger Probes – TTP or non-contact, Laser. However, many companies that manufacture and inspect gears use manual CMMs with point to point sensors, thus being unable to issue the profile deviation report. In respect, the motivation for this research is to develop and validate inspection strategies for determining the Total Profile Deviation (F_a) of spur gears, according to ISO 1328, using of a mathematical tool NURBS (*Non-Uniform Rational B-Splines*) and CMMs manual. Strategies for changing the NURBS weight parameter w_i also were applied to assist in inspection definition procedure, and this is one more degree of freedom. In the first moment, before the execution of experimental procedures, simulations were carried out on a computational system and showed satisfactory results. For the experimental tests, a manual CMM MICRO-HITE 3D model was used with point to point sensor. Simulations and experimental results showed that the NURBS technique contributes to manual CMM application using Touch Trigger Probes in measuring the spur gears involute profile. The experimental results showed the methodology efficacy.

Keywords: Coordinate Measuring Machine (CMM), Touch Trigger Probe (TTP), Spur Gears, NURBS, Total Profile Deviation (F_a).

SUMÁRIO

CAPÍTULO I APRESENTAÇÃO.....	19
1.1 INTRODUÇÃO	19
1.2 OBJETIVO GERAL	22
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO DE TESE.....	23
CAPÍTULO II FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA: MMCS E ENGRENAGENS CILÍNDRICAS DE DENTES RETOS.....	25
2.1 INTRODUÇÃO	25
2.2 ESTRUTURA DAS MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS	26
2.3 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO PARA INSPEÇÃO DE PEÇAS.....	32
2.3.1 Medição por contato.....	32
2.3.1.1 Apalpadores <i>touch trigger</i>	34
2.3.1.2 Outras tecnologias de sensores	39
2.4 FONTES DE INCERTEZA NAS MMCS	40
2.4.1 Erros geométricos	41
2.4.2 Erros do sistema de apalpação	43
2.4.3 Erro do sistema de controle	45
2.4.4 Outras fontes de erros internas ao sistema de medição	45
2.4.5 Fontes de erros externas ao sistema de medição.....	46
2.5 ENGRENAGENS CILÍNDRICAS: TIPO, GERAÇÃO DO PERFIL EVOLVENTE E CONTROLE GEOMÉTRICO	49
2.5.1 Engrenagens: tipos e aplicações	50
2.5.2 Geração do perfil evolvente	51
2.5.3 Usinagem de engrenagens cilíndricas de dentes retos – Fresa Módulo	54
2.6 CONTROLE GEOMÉTRICO DE ENGRENAGENS	56
2.6.1 Grau de qualidade	57
2.6.2 Desvio do perfil evolvente da engrenagem	58
2.6.3 Instrumentos para inspeção de engrenagens	60
2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	64
CAPÍTULO III NON UNIFORM RATIONAL B-SPLINE - NURBS: CURVAS E SUPERFÍCIES	65
3.1 INTRODUÇÃO	65
3.2 NURBS: CURVAS E SUPERFÍCIES.....	66

3.2.1 Definição das curvas <i>NURBS</i>.....	66
3.2.1.1 Funções base e curva <i>B-Spline</i>	67
3.2.1.2 Curvas <i>NURBS</i>	70
3.2.2 Pesos (w_i) nas Curvas <i>NURBS</i>	73
3.2.2.1 Significado geométrico dos pesos	74
3.2.3 Definição das superfícies <i>NURBS</i>.....	75
3.3 ESTUDOS QUE CONTEMPLAM AS CURVAS E SUPERFÍCIES <i>NURBS</i>..	77
3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	83
CAPÍTULO IV DESENVOLVIMENTO DA ESTRATÉGIA DE MEDIÇÃO DO PERFIL EVOLVENTE DE ENGRENAGENS USANDO <i>NURBS</i> (SIMULAÇÃO).....	84
4.1 INTRODUÇÃO	84
4.2 ROTINA PARA GERAÇÃO DA CURVA <i>NURBS</i> UTILIZANDO O SOFTWARE COMPUTACIONAL MATLAB®	85
4.2.1 Geração da curva do perfil evolvente usando <i>NURBS</i>	86
4.3 METODOLOGIA PARA DEFINIÇÃO DO NÚMERO MÍNIMO DE PONTOS DE CONTROLE NA GERAÇÃO DO PERFIL EVOLVENTE USANDO <i>NURBS</i>	91
4.4 ANÁLISE DOS DESVIOS TOTAL DE PERFIL SEGUNDO A ISO 1328 – <i>Dados de Simulação</i>	101
4.5 INTERFACE GRÁFICA SIENG – MMC	103
4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	110
CAPÍTULO V PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS, RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	111
5.1 INTRODUÇÃO	111
5.2 QUALIFICAÇÃO DAS ENGRENAGENS.....	114
5.2.1 Inspeção e qualificação das engrenagens.....	116
5.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS USANDO MMC MANUAL E <i>NURBS</i>	124
5.3.1 Inicialização da MMC <i>Micro-Hite</i> 3D e Influência do Contato Sensor-Peça no Procedimento de Inspeção de perfil evolvente	126
5.3.2 Teste Experimental para Determinação do Perfil Evolvente de Engrenagens, Usando <i>NURBS</i> e a Metodologia Proposta.....	133
5.3.3 Determinação do Desvio Total de Perfil (F_a) das engrenagens	145
5.3.4 Teste de Repetibilidade na Inspeção do Perfil Evolvente, usando <i>NURBS</i> e a metodologia proposta	153
5.3.5 Teste de Reprodutibilidade com Operadores Distintos	164
5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	173

CAPÍTULO VI CONCLUSÃO	175
6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	175
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	177
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	178
APÊNDICE A.....	189
A.1 COEFICIENTE t DE STUDENT	189

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Composição de uma MMC manual modelo <i>Micro-Hite</i> 3D.....	27
Figura 2.2 – Algumas configurações de MMCs. (a) braço horizontal (b) Ponte Móvel (c) Pórtico (d) Tipo em balanço (Nóbrega, 2011)	28
Figura 2.3 – Medição com MMC manual	29
Figura 2.4 – Composição MMC automática	30
Figura 2.5 – (a) Magazine das MMCs (b) MMC em operação para acoplamento do apalpador	32
Figura 2.6 – (a) Sensor TTP com haste única (b) sensor TTP com várias hastes	33
Figura 2.7 – (a) Apalpador acoplado a um cabeçote manual (b) sensor TTP acoplado a um cabeçote motorizado	34
Figura 2.8 – Primeiro sensor TTP 3D patenteado por <i>McMurtry</i>	35
Figura 2.9 – Posição ideal de contato versus posição de geração do sinal <i>Trigger</i> (Nóbrega, 2011).....	36
Figura 2.10 – Esquema mecânico do sensor <i>Touch Trigger</i> (Nóbrega, 2011).....	37
Figura 2.11 – Esquema elétrico do sensor <i>Touch Trigger</i>	37
Figura 2.12 – Balanço de forças do sensor TTP (Estado de repouso).....	38
Figura 2.13 – Sensor TTP atuado ($M_m > M_m'$).....	39
Figura 2.14 – Sensor visão de máquina inspecionando placas de circuito impresso	40
Figura 2.15 – Inspeção utilizando sensor laser.....	40
Figura 2.16 – Principais fontes de incerteza na medição por coordenadas	41
Figura 2.17 – (a) Representação dos erros geométricos em um eixo da MMC (b) erro de rotação (<i>roll</i> , <i>pitch</i> e <i>yaw</i>).....	42
Figura 2.18 – (a) Desgaste abrasivo: material removido da esfera (b) desgaste adesivo: material depositado na esfera (<i>Renishaw</i> ,2009)	44
Figura 2.19 – (a) Posicionamento das escalas de medição (Rolim, 2003) (b) Escala de medição do eixo Z da MMC <i>Micro-Hite</i> 3D	45
Figura 2.20 – (a) Ambiente como fonte de incerteza na medição por coordenadas (b) conhecimentos requeridos por operadores de MMCs	48
Figura 2.21 – (a) Bomba de engrenagens (b) Atuadores rotativos	49
Figura 2.22 – (a) Traçado dos dentes pelo processo da evolvente (Vale, 2006) (b) setor da circunferência na geração do perfil.....	51
Figura 2.23 – (a) Engrenamento ideal na região do perfil evolvente (b) reta de ação (Lima Jr., 2007)	52
Figura 2.24 – (a) Influencia do ângulo de pressão no formato dos dentes de uma engrenagem cilíndrica (Gasparin, 2004) (b) Variação da forma geométrica do dente em função do ângulo de pressão (Lima Jr., 2007).....	53
Figura 2.25 – Perfil evolvente em função do ângulo de pressão e do ângulo evolvente (Shigley, 1970)	54
Figura 2.26 - Fresa módulo para usinagem de engrenagens.....	55
Figura 2.27 – Ferramentas em função do número de dentes	55

Figura 2.28 – Engrenagens cilíndricas de dentes retos com $m = 4$ mm (a) $Z = 12$ (b) $Z = 30$ (c) $Z = 150$ (d) comparação entre as curvas dos dentes.....	56
Figura 2.29 – Perfil evolvente	59
Figura 2.30 – Gráficos ISO 1328 (a) Desvio total de perfil (b) desvio de forma de perfil (c) desvio angular de perfil.....	59
Figura 2.31 – Desvio do perfil evolvente (Adapt. de Gemaque, 2004).....	60
Figura 2.32 – (a) Instrumento de medição do passo de base (b) máquina universal de medição de engrenagem (c) micrômetro para medição de diâmetros primitivos (d) MMC na inspeção do perfil evolvente	61
Figura 2.33 – (a) Sistema de medição para avaliação do desvio de passo (Gao <i>et al</i> , 2015) (b) sistema de medição sem contato do tipo visão de máquina (Gadelmawla, 2011).....	62
Figura 3.1 – Diagrama do esquema de computação triangular (Minetto, 2003)	68
Figura 3.2 – Funções base <i>B-spline</i> (a) grau zero (b) grau um (c) grau 2	68
Figura 3.3 – Curva <i>B-Spline</i> semi-fechada.....	69
Figura 3.4 – Ajuste dos pesos sob uma <i>Spline</i>	70
Figura 3.5 – Peso nulo para o ponto p_9 da curva <i>NURBS</i>	73
Figura 3.6 – Valores de pesos iguais a 1 (a) curva <i>NURBS</i> (b) funções base <i>B-splines</i>	74
Figura 3.7 – Valor do peso w_9 igual a 10 (a) curva <i>NURBS</i> (b) funções <i>B-splines</i>	75
Figura 3.8 – Valor do peso w_9 igual a 0.5 (a) curva <i>NURBS</i> (b) funções <i>B-splines</i>	75
Figura 3.9 – Procedimentos para modelagem de superfície do capacete (a) capacete inspecionado (b) pontos coordenados obtidos pela MMC (c) superfície <i>NURBS</i> do capacete (Silva, 2011).....	76
Figura 3.10 – Refinamento do modelo da região abdominal de um paciente e sua representação utilizando a ferramenta <i>NURBS</i> (Hughes <i>et al</i> , 2007).....	79
Figura 3.11 – (a) Linhas que definem a sequencia de medição da turbina (b) operação de inspeção da turbina utilizando o CMA (Piratelli Filho, 2009)	79
Figura 3.12 – Comparação da quantidade de linhas de código <i>NURBS</i> versus CN para geração de uma determinada trajetória	81
Figura 3.13 – Pontos coordenados apalpados e a superfície <i>NURBS</i> resultante (Silva <i>apud</i> Piratelli Filho e Mota, 2011).....	82
Figura 3.14 – (a) Medição dos pontos coordenados usando MMC (c) Superfície <i>NURBS</i>	83
Figura 4.1 – Código para leitura e seleção do arquivo .xls	86
Figura 4.2 – (a) Estrutura do arquivo fornecido pela MMC (b) função de leitura para arquivo .txt	87
Figura 4.3 – Multiplicando as coordenadas dos pontos de controle pelo peso w_i , respectivamente	87
Figura 4.4 – Cálculo do vetor de nós (a) variável knots armazenando o vetor de nós utilizado na função <i>NURBS</i> (b) função calc_knots para cálculo do vetor de nós (c) código da função qntintervalo para determinar a quantidade de termos entre 0 e 1 do vetor de nós.....	89
Figura 4.5 – Exemplo de uma curva teórica e <i>NURBS</i> (gerada a partir de 10 pontos coordenados) do perfil evolvente do dente de engrenagem	90

Figura 4.6 – Estrutura das funções nrbmak e nrbplot da caixa de ferramentas do Matlab [®]	90
Figura 4.7 – Diagrama de fluxo para definição da estratégia de medição.....	91
Figura 4.8 – Perfil evolvente do dente da engrenagem: $m = 4 \text{ mm}$ e $\phi = 20^\circ$	92
Figura 4.9 – Curvas teórica e <i>NURBS</i> : $m = 4 \text{ mm}$; $NP = 15$ e $\phi = 20^\circ$	94
Figura 4.10 – Curvas teórica e <i>NURBS</i> : $m = 4 \text{ mm}$; $NP = 13$ e $\phi = 20^\circ$	95
Figura 4.11 – Curvas teórica e <i>NURBS</i> : $m = 4 \text{ mm}$; $NP = 12$ e $\phi = 20^\circ$	97
Figura 4.12 – Curvas teórica e <i>NURBS</i> : $m = 4 \text{ mm}$; $NP = 10$ e $\phi = 20^\circ$	98
Figura 4.13 – Diagrama de fluxo referente à alteração dos pesos w_i da curva <i>NURBS</i> ..	99
Figura 4.14 – Análise do Desvio Total de Perfil (F_α): engrenagem módulo 4 mm.....	102
Figura 4.15 – Tela inicial da interface SIENG – MMC	105
Figura 4.16 – Tela de instruções para os operadores da SIENG – MMC	105
Figura 4.17 – Tela para definição de parâmetros na SIENG – MMC	106
Figura 4.18 – Tela da SIENG – MMC para análise do perfil evolvente de engrenagens com de módulo igual a 4 mm	108
Figura 4.19 – Tela da SIENG – MMC ilustrando os resultados dos erros <i>NURBS</i> para engrenagem de módulo 4 mm	109
Figura 4.20 – Tela da SIENG – MMC ilustrando os resultados de desvio de perfil (F_α) para engrenagem de módulo 4 mm.....	109
Figura 5.1 – Processo para fabricação de engrenagens	112
Figura 5.2 – Máquina tridimensional <i>TESA</i> pertencente à empresa colaboradora.....	113
Figura 5.3 – Engrenagens utilizadas nos testes experimentais	114
Figura 5.4 – (a) MMC <i>Crysta-Apex S 7106 CNC</i> (b) Sensores: <i>touch trigger</i> , tipo visão de máquina e <i>laser</i>	115
Figura 5.5 – Menu do <i>software</i> MCOSMOS da MMC <i>Crysta-Apex S 7106</i>	116
Figura 5.6 – Engrenagem posicionada para inspeção usando a MMC CNC	117
Figura 5.7 – Aquisição dos pontos coordenados para definição do plano e origem da MMC	117
Figura 5.8 – Posicionamento do coordenada horizontal X no eixo de simetria longitudinal de um dos dentes da engrenagem	118
Figura 5.9 – (a) Captura dos pontos para criação das linhas e do ponto de interseção (b) tela do MCOSMOS identificando as atividades de máquina	119
Figura 5.10 – (a) Escaneamento da engrenagem usando o SP25M (b) digitalização da peça no <i>software</i> MCOSMOS	119
Figura 5.11 – Parâmetros solicitados para criação do desenho da engrenagem usando o <i>software Solid Edge</i>	120
Figura 5.12 – Desenhos CAD das engrenagens (a) engrenagem A (b) engrenagem B (c) engrenagem C	121
Figura 5.13 – Desenhos CAD dos perfis evolventes das engrenagens (a) engrenagem A (b) engrenagem B (c) engrenagem C.....	121
Figura 5.14 – (a) <i>Menu Profile Tolerance Contour</i> (b) tela do MCOSMOS com os limites tolerâncias e contornos dos perfis teórico e medido	122

Figura 5.15 – Definição dos valores de Desvio Total de Perfil da engrenagem A (a) $F_\alpha = 133,75 \mu\text{m}$ para o dente 1 (b) $F_\alpha = 125,4 \mu\text{m}$ para o dente 2 (c) $F_\alpha = 139,2 \mu\text{m}$ para o dente 3.....	123
Figura 5.16 – Máquina de Medição por Coordenadas modelo <i>Micro-Hite</i> 3D.....	124
Figura 5.17 – Sensor <i>touch trigger</i> e ponteiros disponíveis para inspeção	125
Figura 5.18 – (a) Cabo serial DB9 (b) <i>software</i> RComSerial versão 1.2	126
Figura 5.19 – Execução do processo de origem (a) solicitação na tela do sistema de controle da MMC (b) execução na MMC <i>Micro-Hite</i> 3D.....	127
Figura 5.20 – (a) Qualificação da esfera do apalpador <i>touch trigger</i> (b) características do sensor	127
Figura 5.21 – Alinhamento dos sistemas de coordenadas da máquina e da peça.....	128
Figura 5.22 – Engrenagem posicionada para inspeção na MMC manual	128
Figura 5.23 – (a) Definição do plano na variável A (b) definição da origem na variável C.....	130
Figura 5.24 – (a) Seleção das duas linhas criadas (b) ponto de interseção entre as duas linhas.....	130
Figura 5.25 – (a) <i>Menu</i> para construção da linha entre a origem e ponto de interseção entre as duas retas, coordenada X (b) linhas construída e apresentada na tela da unidade de controle	130
Figura 5.26 – Toque sensor-peça admitindo tolerância de 20° da perpendicular	131
Figura 5.27 – Origem do sistema de coordenadas localizado no centro da esfera de medição.....	131
Figura 5.28 – Erros de compensação do raio da esfera na inspeção de perfil evolvente	132
Figura 5.29 – Engrenagem A fixada no torno de bancada, para inspeção	133
Figura 5.30 – Curva <i>NURBS</i> e pontos de controle referente à: engrenagem A e dente 1	134
Figura 5.31 – Curva <i>NURBS</i> e pontos de controle referente à: engrenagem A e dente 2	135
Figura 5.32 – Curva <i>NURBS</i> e pontos de controle referente à: engrenagem A e dente 3	135
Figura 5.33 – Engrenagem C posicionada para inspeção do perfil evolvente.....	138
Figura 5.34 – Curva <i>NURBS</i> e pontos de controle referente à: engrenagem B e dente 1	139
Figura 5.35 – Curva <i>NURBS</i> e pontos de controle referente à: engrenagem B e dente 2	139
Figura 5.36 – Curva <i>NURBS</i> e pontos de controle referente à: engrenagem B e dente 3	140
Figura 5.37 – Curva <i>NURBS</i> e pontos de controle referente à: engrenagem C e dente 1	140
Figura 5.38 – Curva <i>NURBS</i> e pontos de controle referente à: engrenagem C e dente 2	141
Figura 5.39 – Curva <i>NURBS</i> e pontos de controle referente à: engrenagem C e dente 3	141

Figura 5.40 – Análise do Desvio Total de Perfil (F_α): engrenagem A e dente 1	146
Figura 5.41 – Análise do Desvio Total de Perfil (F_α): engrenagem A e dente 2	146
Figura 5.42 – Análise do Desvio Total de Perfil (F_α): engrenagem A e dente 3	147
Figura 5.43 – Análise do Desvio Total de Perfil (F_α): engrenagem B e dente 1	147
Figura 5.44 – Análise do Desvio Total de Perfil (F_α): engrenagem B e dente 2	148
Figura 5.45 – Análise do Desvio Total de Perfil (F_α): engrenagem B e dente 3	148
Figura 5.46 – Análise do Desvio Total de Perfil (F_α): engrenagem C e dente 1	149
Figura 5.47 – Análise do Desvio Total de Perfil (F_α): engrenagem C e dente 2	149
Figura 5.48 – Análise do Desvio Total de Perfil (F_α): engrenagem C e dente 3	150
Figura 5.49 – Limite de tolerância para migração dos graus de qualidade	152
Figura 5.50 – Engrenagem para realização do teste de repetibilidade	154
Figura 5.51 – Captura dos pontos coordenados e sentido das análises de dados	155
Figura 5.52 – Gráfico de controle para o PT2 – repetibilidade para 95,45%	159
Figura 5.53 – Gráfico de controle para o PT3 – repetibilidade para 95,45%	160
Figura 5.54 – Gráfico de controle para o PT4 – repetibilidade para 95,45%	160
Figura 5.55 – Gráfico de controle para o PT5 – repetibilidade para 95,45%	161
Figura 5.56 – Gráfico de controle para o PT6 – repetibilidade para 95,45%	161
Figura 5.57 – Gráfico de controle para o PT7 – repetibilidade para 95,45%	162
Figura 5.58 – Gráfico de controle para o PT8 – repetibilidade para 95,45%	162
Figura 5.59 – Gráfico de controle para o PT9 – repetibilidade para 95,45%	163
Figura 5.60 – Gráfico de controle para o PT10 – repetibilidade para 95,45%	163
Figura 5.61 – Gráfico de controle para o PT11 – repetibilidade para 95,45%	164
Figura 5.62 – Gráfico de controle para o PT2 – reprodutibilidade para 95,45%	168
Figura 5.63 – Gráfico de controle para o PT3 – reprodutibilidade para 95,45%	168
Figura 5.64 – Gráfico de controle para o PT4 – reprodutibilidade para 95,45%	169
Figura 5.65 – Gráfico de controle para o PT5 – reprodutibilidade para 95,45%	169
Figura 5.66 – Gráfico de controle para o PT6 – reprodutibilidade para 95,45%	170
Figura 5.67 – Gráfico de controle para o PT7 – reprodutibilidade para 95,45%	170
Figura 5.68 – Gráfico de controle para o PT8 – reprodutibilidade para 95,45%	171
Figura 5.69 – Gráfico de controle para o PT9 – reprodutibilidade para 95,45%	171
Figura 5.70 – Gráfico de controle para o PT10 – reprodutibilidade para 95,45%	172
Figura 5.71 – Gráfico de controle para o PT11 – reprodutibilidade para 95,45%	172

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Grau de qualidade para o desvio de perfil (ISO 1328)	58
Tabela 2.2 – Exemplos de aplicações de engrenagens de acordo com os graus de qualidade.....	58
Tabela 4.1 – Vetores de nós gerados a partir do código desenvolvido	89
Tabela 4.2 – Coordenadas das curvas teórica e <i>NURBS</i> referente ao perfil evolvente da engrenagem cilíndrica de dentes retos: $m = 4$ mm; $NP = 15$ e $\phi = 20^\circ$	93
Tabela 4.3 – Coordenadas das curvas teórica e <i>NURBS</i> referente ao perfil evolvente da engrenagem cilíndrica de dentes retos: $m = 4$ mm; $NP = 13$ e $\phi = 20^\circ$	95
Tabela 4.4 – Coordenadas das curvas teórica e <i>NURBS</i> referente ao perfil evolvente da engrenagem cilíndrica de dentes retos: $m = 4$ mm; $NP = 12$ e $\phi = 20^\circ$	96
Tabela 4.5 – Coordenadas das curvas teórica e <i>NURBS</i> referente ao perfil evolvente da engrenagem cilíndrica de dentes retos: $m = 4$ mm; $NP = 10$ e $\phi = 20^\circ$	98
Tabela 4.6 – Aplicação da metodologia de alteração do vetor peso para análise de erro do perfil evolvente da engrenagem com: $m = 4$ mm; $NP = 10$; erro máximo = 12 μ m (Simulação).....	100
Tabela 4.7 – Relação entre o número de pontos coletados versus módulo das engrenagens	101
Tabela 4.8 – Valores de Desvio Total de Perfil (F_α) para as engrenagens com os módulos variando de 1 a 10 mm.....	103
Tabela 4.9 – Classificação das engrenagens quanto aos graus de qualidade segundo a norma ISO 1328.....	103
Tabela 5.1 – Características das engrenagens utilizadas	114
Tabela 5.2 – Qualificação das engrenagens: valores de Desvio Total de Perfil (F_α) ...	122
Tabela 5.3 – Configuração do cabo serial DB9 para MMC manual <i>Micro-Hite 3D</i> ...	125
Tabela 5.4 – Erros <i>NURBS</i> do perfil evolvente: engrenagem A e dente 1	136
Tabela 5.5 – Erros <i>NURBS</i> do perfil evolvente: engrenagem A e dente 2	136
Tabela 5.6 – Erros <i>NURBS</i> do perfil evolvente: engrenagem A e dente 3	137
Tabela 5.7 – Erros <i>NURBS</i> do perfil evolvente: engrenagem B e dente 1	142
Tabela 5.8 – Erros <i>NURBS</i> do perfil evolvente: engrenagem B e dente 2	142
Tabela 5.9 – Erros <i>NURBS</i> do perfil evolvente: engrenagem B e dente 3	143
Tabela 5.10 – Erros <i>NURBS</i> do perfil evolvente: engrenagem C e dente 1	143
Tabela 5.11 – Erros <i>NURBS</i> do perfil evolvente: engrenagem C e dente 2	144
Tabela 5.12 – Erros <i>NURBS</i> do perfil evolvente: engrenagem C e dente 3	144
Tabela 5.13 – Valores de Desvio Total de Perfil (F_α) das peças usinadas	150
Tabela 5.14 – Comparação dos valores de Desvio Total de Perfil (F_α): MMC CNC e manual	152
Tabela 5.15 – Erros <i>NURBS</i> para 20 as medições executadas no teste de repetibilidade: sem alteração do parâmetro peso w_i	156
Tabela 5.16 – Erros <i>NURBS</i> para 20 as medições executadas no teste de repetibilidade: com alteração do parâmetro peso w_i	156
Tabela 5.17 – Parâmetros para construção dos gráficos de controle dos valores de erros da curva <i>NURBS</i>	159

Tabela 5.18 – Erros <i>NURBS</i> para 20 as medições executadas no teste de reprodutibilidade pelo Op.2: sem alteração do parâmetro peso w_i	165
Tabela 5.19 – Erros <i>NURBS</i> para 20 as medições executadas no teste de reprodutibilidade: com alteração do parâmetro peso w_i	166
Tabela 5.20 – Parâmetros para construção dos gráficos de controle dos erros <i>NURBS</i>	167

CAPÍTULO I

APRESENTAÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

Com o constante desenvolvimento de tecnologias inovadoras nos setores automotivos, aeronáuticos, bioengenharia, entre outros, aumentam-se as exigências da qualidade dos produtos manufaturados, no que concerne a sua alta exatidão dimensional e geométrica. Para os setores supracitados, peças com geometrias complexas e formas livres têm sido práticas cada vez mais comuns. Adicionalmente, as novas demandas de engenharia exigem a fabricação de produtos em tempos reduzidos, com alta qualidade e baixo custo. Uma forma de cumprir satisfatoriamente as exigências do mercado é realizando medições mais eficazes de modo a tornar o processo produtivo mais rápido, com menor custo e maior qualidade (Silva e Silva Marinho, 2009). De forma a atender a essas necessidades, se faz necessário sistemas de inspeção cada vez mais exatos e flexíveis.

Segundo Oliveira (2003), em um ambiente produtivo altamente competitivo e globalizado, a garantia da conformidade geométrica - atender as especificações definidas no projeto - dos produtos é condição indispensável para assegurar a intercambialidade e funcionalidade dos produtos. Para que as perdas e o retrabalho sejam minimizados, o processo de medição exerce uma grande responsabilidade, pois além de inspecionar a conformidade geométrica das peças, em determinados casos, deve-se corrigir desvios e variações no comportamento do processo de fabricação. Nas duas situações, informações não confiáveis podem levar a decisão causadora de prejuízos que atinjam consumidores e fabricantes. Neste caso, a principal consequência é a aprovação de peças não conformes e a rejeição de peças conformes.

As operações de inspeção de peças manufaturadas tem sido essenciais para as indústrias e podem ser realizadas manualmente ou por máquinas computadorizadas. Estas últimas são mais comumente utilizadas por dois motivos: a capacidade de realizar operações de inspeção mais complexa, uma vez que tal execução realizada por operadores utilizando equipamentos convencionais acarretaria um maior tempo de trabalho e erros maiores de medição, e devido ao interesse de se utilizar as informações das máquinas computadorizadas para trabalhos de CAD e CAM, auxiliando na engenharia reversa (Nóbrega *et al*, 2013).

A medição por coordenadas evoluiu nas últimas décadas e hoje é a tecnologia que melhor atende aos requisitos da manufatura moderna, por meio das Máquinas de Medição por Coordenadas (MMCs) (Lima Jr, 2003). A função básica das MMCs incide na medição da forma real da peça, sua comparação com a forma desejada e por fim, a avaliação da informação metrológica. A forma real da peça é obtida pelo contato da sua superfície em pontos de medição discretos, no qual estes são expressos em termos de suas coordenadas (Nóbrega, 2011).

Atualmente, as Máquinas de Medição por Coordenadas contam com dois tipos de sensores de medição aplicados ao controle dimensional, os sensores de medição por contato e sem contato. Para aplicações com contato são utilizados os apalpadores do tipo *Touch Trigger* e os *Scanning Probes*. Estes últimos são comumente conhecidos como *Probes* de digitalização. Para o processo de medição sem contato, destacam-se dois tipos de equipamentos capazes de capturar informações do mensurando. São os sistemas do tipo visão de máquina (leitura óptica) e os sistemas de leitura a laser.

De acordo com Silva *et al* (2011), o que se encontra com maior frequência nas indústrias brasileiras são as MMCs que utilizam medições por contato. A coleta de pontos para obtenção de curvas e superfícies livres requer muita habilidade do metrologista. As regiões das peças com mudanças de curvatura precisam de um número maior de pontos, enquanto que as regiões planas ou quase planas necessitam de um número menor. Talón *et al* (2013) afirma que nem todos pontos coordenados coletados por uma MMC são igualmente importantes, uma maior densidade de pontos coordenados são necessários onde as zonas de curvatura são maiores, em contraste com as zonas onde as curvaturas são menores. Esse inconveniente é facilmente resolvido quando se utiliza a medição sem contato, utilizando o cabeçote laser, por exemplo. Estes sistemas são responsáveis por fazer uma varredura na peça a ser inspecionada, coletando uma grande quantidade de pontos de controle.

Frequentemente MMCs sofisticadas são utilizadas com o objetivo de reproduzir um modelo digital preciso a partir dos pontos coordenados para posteriormente serem utilizados em sistemas CAD/CAM. É importante destacar que a precisão do processo de modelagem depende do número de pontos de controle que são capturados na superfície da peça. Consequentemente, os sistemas de inspeção a laser são ferramentas melhores para serem utilizadas para tal finalidade, porém com um custo bem maior quando comparado com os sistemas de medição por contato, que utilizam os *Touch Trigger Probes* (TTP).

Então, surge a seguinte questão: seria interessante para indústrias que utilizam MMCs manuais com apalpadores *Touch Trigger* estabelecer estratégias de medição para inspecionar perfis evolventes de engrenagens cilíndricas de dentes retos? Para este caso, seria utilizada uma quantidade mínima de pontos coordenados, aliada ao uso de uma ferramenta matemática para modelar o perfil evolvente, garantindo a exatidão estabelecida no projeto. Esta, portanto, é a principal motivação para este projeto de doutorado.

Neste trabalho de tese, a *NURBS* (*Non Uniform Rational B-Splines*) será a ferramenta matemática de aproximação para definição de estratégias de medição de perfis evolventes de dentes de engrenagem a partir de um grupo de pontos de controle oriundo de uma MMC manual, com sensor por contato do tipo *TTP*.

De acordo com Minetto (2003), *NURBS* são funções paramétricas que podem representar uma variedade de tipos de curvas. Estas funções são utilizadas em computação gráfica na indústria de CAD/CAM e estão sendo consideradas um padrão para criação e representação de objetos complexos (indústria automobilística, aviação e embarcação). Atualmente é possível verificar o uso expandido das *NURBS* no modelamento de objetos para artes visuais, artes, esculturas; também estão sendo usadas para modelar cenas para aplicação de realidade virtual. Segundo Hong (2016), explorar o uso significativo dos pesos w_i da função *NURBS* é uma das questões mais interessantes e importantes neste campo.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo apresentar uma estratégia, baseada em *NURBS*, para inspeção do perfil evolvente de engrenagens cilíndricas de dentes retos, no sentido de determinar o Desvio Total de Perfil (F_a), usando Máquinas de Medição por Coordenadas (MMCs) manuais e sensor por contato, os *Touch Trigger Probes* (TTP). Como referência foi utilizada a norma ISO 1328. A estratégia foi desenvolvida levando em consideração o número mínimo de pontos coordenados a

serem coletados na superfície da peça, em função do módulo da engrenagem. Com base na metodologia para inspeção, desenvolveu-se um sistema computacional denominado de: Sistema para Inspeção de Engrenagens usando Máquinas de Medição por Coordenadas, o SIENG – MMC.

1.2 OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma estratégia de medição, baseada em *NURBS*, para inspeção do perfil evolvente de engrenagens cilíndricas de dentes retos, no sentido de determinar o Desvio Total de Perfil (F_α), tendo como referência a norma ISO 1328 e utilizando Máquinas de Medição por Coordenadas (MMCs) manuais, equipadas com sensor de contato, os *Touch Trigger Probes* (TTP).

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Adquirir habilidades na inspeção do perfil evolvente de engrenagens cilíndricas de dentes retos, utilizando Máquinas de Medição por Coordenadas manuais equipadas com palpadores do tipo *TTP*;
- Realizar estudos sobre o modelo *Non-Uniform Rational B-Splines* (*NURBS*), no sentido de utilizar tal ferramenta matemática para modelagem de curvas de perfis evolventes de dentes de engrenagem cilíndricas;
- Realizar estudos sobre os principais parâmetros e controles geométricos das engrenagens;
- Definir uma metodologia de medição para coleta de pontos coordenados em uma quantidade mínima, no sentido de possibilitar a aplicação de MMCs manuais na determinação do erro de perfil da evolvente de engrenagens de dentes retos;
- Definir uma estratégia de alteração do parâmetro peso w_i das *NURBS* e automatizar tal processo, reduzindo o erro em cada ponto coordenado, quando necessário;
- Determinar e quantificar o Desvio Total de Perfil (F_α) de engrenagens cilíndrica de dentes retos oriundas do processo de fabricação, comparando o modelo teórico do perfil com o inspecionado pela MMC, seguindo a parâmetros da norma ISO 1328;

- Desenvolver uma plataforma em ambiente computacional baseada na metodologia apresentada, visando uma melhor interação do método desenvolvido com o operador.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO DE TESE

As atividades apresentadas neste trabalho de doutorado, que consiste no desenvolvimento de uma estratégia de medição, baseada em *NURBS*, para determinação do Desvio Total de Perfil (F_α) de engrenagens cilíndricas de dentes retos usando MMCs, serão apresentados nos capítulos:

No **Capítulo II** os fundamentos das MMCs, no que diz respeito a sua estrutura e configurações, técnicas e tipos de medição, como por exemplo, as com contato e sem contato. Ainda neste capítulo será ilustrado com detalhes o funcionamento e configurações do sensor de contato, *Touch Trigger Probe*, equipamento que foi utilizado na aquisição dos dados de medição. As fontes de incerteza de medições com as MMCs também foram estudadas. Com relação às engrenagens que foram objetos de estudo deste trabalho, descrever-se-ão sobre seus tipos, geração do perfil evolvente e controle geométrico segundo a norma ISO 1328, além dos instrumentos que atualmente são utilizados para inspeção de alguns parâmetros destas rodas dentadas.

No **Capítulo III** será descrita a fundamentação teórica do modelo *Non Uniform Rational B-Spline (NURBS)* para representação de curvas e uma abordagem sucinta de superfícies, bem como o significado de alteração do parâmetro peso w_i . Para o bom entendimento destas funções, torna-se importante definir anteriormente as curvas *B-Splines*, a qual se deriva as curvas *NURBS*. Também neste capítulo serão retratados estudos e artigos que contemplam as curvas e superfícies *NURBS* para as mais diversas aplicações.

No **Capítulo IV** serão detalhadas as metodologias desenvolvidas em ambiente de simulação, como: definição da estratégia de inspeção do perfil evolvente de engrenagens cilíndricas de dentes retos utilizando *NURBS* e o método para alteração do parâmetro peso w_i . Também será apresentada a análise do Desvio Total de Perfil (F) para os módulos simulados, além a plataforma SIENG – MMC que auxiliará o operador nos procedimentos de inspeção das engrenagens.

No **Capítulo V**, apresentar-se-ão os procedimentos experimentais utilizando a MMC manual e o modelo *NURBS*, além dos resultados e discursões. Inicialmente será

realizado a geração e ajuste da curva *NURBS* a partir dos pontos coordenados coletados sobre superfície do perfil evolvente, para então sua comparação com o perfil teórico, definido por meio das equações que serão apresentadas no decorrer do trabalho. Seguindo tais procedimentos, torna-se possível analisar o erro de perfil proveniente do processo de fabricação. As peças utilizadas foram qualificadas usando uma MMC CNC.

Para realização dos procedimentos experimentais utilizou-se uma MMC manual modelo *MICRO-HITE 3D*, com sensor do tipo *Touch Trigger*, repetibilidade de $0,62 \mu\text{m}$ e incerteza de medição para o plano e volume, respectivamente: $(3 + 3 \cdot L(\text{mm}) / 1000) \mu\text{m}$ e $(3 + 4 \cdot L(\text{mm}) / 1000) \mu\text{m}$; associado ao uso do modelo *NURBS* para definir estratégias de medições que garantam a reprodução fiel do modelo virtual, coletando uma quantidade mínima de pontos de controle.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA: MMCs E ENGRENAGENS CILÍNDRICAS DE DENTES RETOS

2.1 INTRODUÇÃO

As Máquinas de Medição por Coordenadas (MMCs) são um dos sistemas de medição mais flexíveis e dinâmicos para a medição de peças com geometrias complexas. *Softwares* dos mais variados têm sido desenvolvidos e fazem das MMCs uma forte concorrente para medições de superfícies complexas e características geométricas de engrenagens. Como exemplo tem-se o *Gearpak*, que é um *software* para análise de engrenagens em máquinas tridimensionais, no qual o mesmo cria uma rotina de inspeção e os relatórios de medição. A tecnologia da medição por coordenadas tem como base o princípio que envolve a aquisição das coordenadas de pontos sobre a peça a ser inspecionada e, em seguida, um processamento matemático para se determinar a chamada geometria substituta. A captura dos pontos coordenados pode ser realizada por sensores que utilizam contato direto com a peça ou por sistemas sem contato. De acordo com Porath (2002), as MMCs são ferramentas já consolidadas nos processos de garantia da qualidade dimensional de produtos em indústrias dos mais diversos setores produtivos, além do uso na engenharia reversa.

Segundo Lima Jr (2007), uma MMC pode ser definida como uma máquina é composta por uma série de elementos mecânicos dotados de movimentos, um apalpador ou sensor/transdutor e uma mesa metrológica sobre a qual são fixadas as peças a serem medidas. Apesar de seu bom desempenho, estas máquinas não são perfeitas e apresentam erros nos quais são responsáveis pelas incertezas de medições.

Apesar de existirem instrumentos dedicados à medição de engrenagens, as MMCs são bastante utilizadas na inspeção de parâmetros destas peças, tendo em vista

sua flexibilidade na medição de geometrias complexas. Juntamente com o desenvolvimento da indústria mecânica, as engrenagens estão desempenhando um papel cada vez mais importante em plantas industriais. ***De acordo com Yang (2015), cerca de 20 engrenagens são necessárias em um automóvel para compor a transmissão de energia e que, considerando o potencial de demanda do mercado, está ocorrendo um aumento dos requisitos para melhorar o desempenho de tais peças.*** Esforços também têm sido dispensados no sentido de melhorar a precisão geométrica e inspeção das engrenagens, gerenciando e categorizando seus desvios. A avaliação dos erros das rodas dentadas vão desde métodos manuais, já aplicados por volta de 1770, até os dias atuais, com a utilização de MMCs e centro de medição de engrenagens. As análises dos desvios geométricos terão como referencia a norma ISO (*International Standards Organization*) 1328.

2.2 ESTRUTURA DAS MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS

Uma MMC pode ser compreendida como sendo um conjunto de sistemas funcionando de forma integrada com o objetivo de materializar um sistema coordenado cartesiano, independente de qual seja seu tipo e tamanho. Nesta máquina ocorre a movimentação de três eixos para a determinação das coordenadas espaciais, sendo cada um deles caracterizados por meio de um sistema de guias com mancais aerostáticos e escalas optoeletrônicas ou com um sistema a laser, para determinação das coordenadas com o cabeçote apalpador (Nóbrega, 2011).

A Figura 2.1 ilustra a situação de uma composição básica para uma MMC manual, na qual se destacam os seguintes componentes:

- Estrutura mecânica da Máquina de Medição por Coordenadas;
- Sistema de apalpação: elemento que entra em contato com a peça a ser inspecionada por meio do sensor TTP (*Touch Trigger Probe*);
- Unidade de controle: fornece ao usuário informações dos pontos coordenados apalpados e, dependendo da quantidade dos pontos de controle, determina a geometria substituta. Além disso, esta unidade orienta o operador da máquina no processo de inicialização, qualificação da sonda a ser utilizada, entre outros. É nesta unidade que se encontra instalado o software da máquina.

- Mesa metrológica: incorporada a MMC e serve como base de referência. Sobre ela são fixadas as peças a serem medidas, em que erros de planeza da sua superfície podem afetar os resultados das medições;
- Cabo serial: envia ao computador pessoal ou *notebook* informações das medições realizadas, como por exemplo: posição dos pontos coletado, localização cartesiana e polar, entre outras. No âmbito deste projeto, o referido cabo foi confeccionado, tendo em vista que o mesmo não constava como acessório da MMC usada;
- Computador pessoal ou notebook: recebe as informações via cabo serial das coordenadas dos pontos de controle. Neste projeto, tais pontos serão utilizados para geração de curvas evolventes de engrenagens cilíndricas, usando a ferramenta *NURBS*.

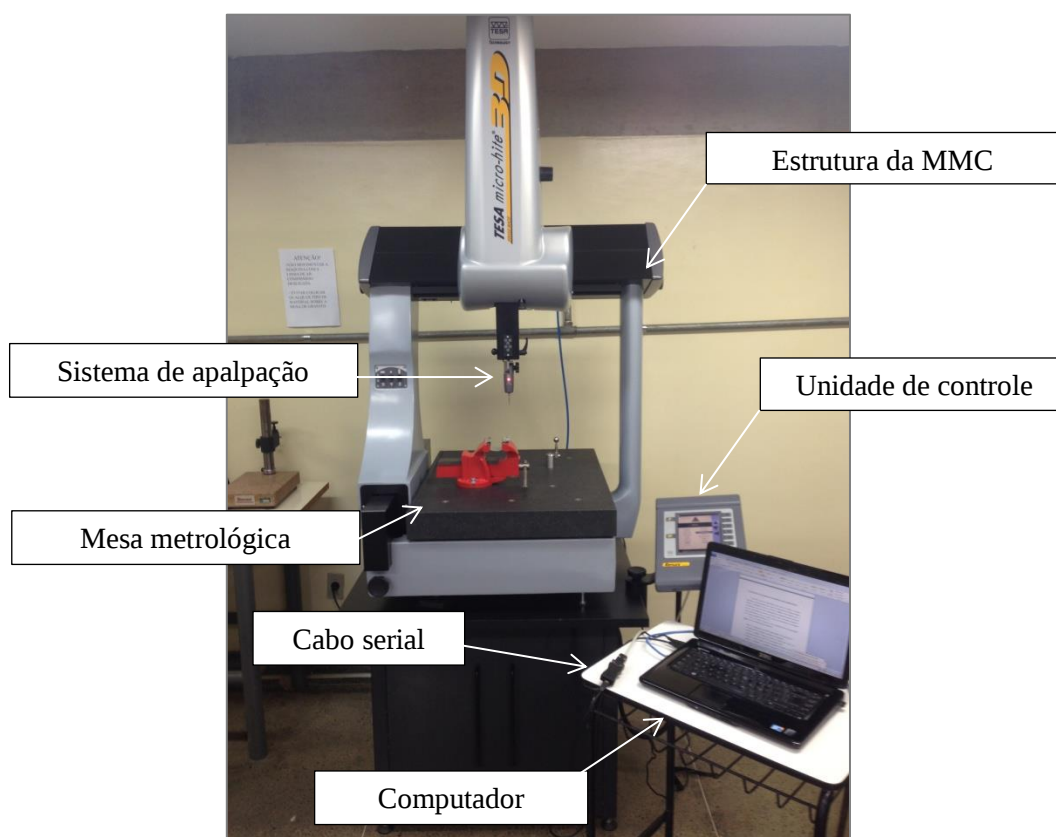


Figura 2.1 – Composição de uma MMC manual modelo *Micro-Hite 3D*

Atualmente, várias configurações de máquinas são disponibilizadas, na qual apresentam diferenças no modo de acionamento e forma de operacionalização. A Figura 2.2 ilustra diferentes modelos de MMCs que são bastante utilizadas na indústria

manufatureira. De acordo com a norma Britânica (BS 6808 de 1987, parte 1) tais configurações se apresentam como as mais comuns a serem utilizadas.

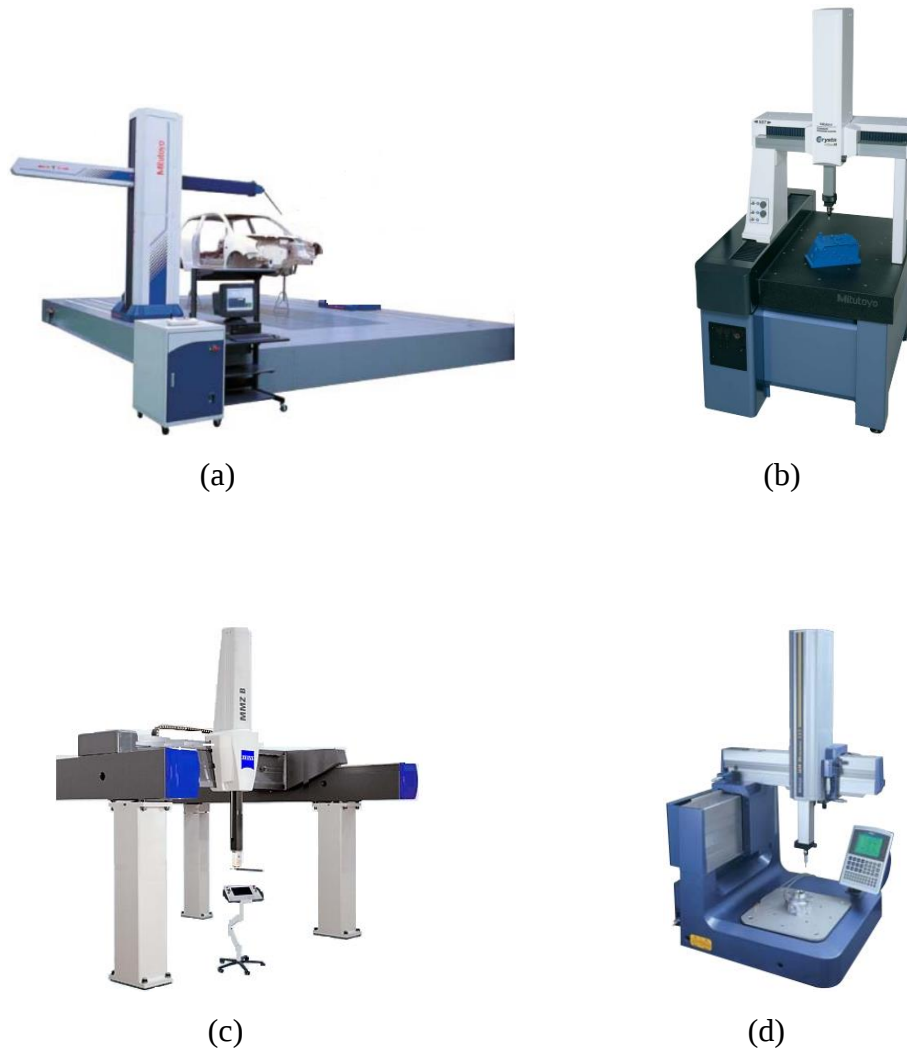


Figura 2.2 – Algumas configurações de MMCs. (a) braço horizontal (b) Ponte Móvel (c) Pórtico (d) Tipo em balanço (Nóbrega, 2011)

As formas construtivas de uma MMC estão relacionadas com o volume de medição, incertezas da medição, tecnologias utilizadas pelo fabricante, entre outras. Fatores construtivos, como por exemplo, mancais aerostáticos em substituição as guias de esferas recirculantes, permitem aos fabricantes diminuir o nível de incerteza da máquina. No que diz respeito à forma de operacionalização, as MMCs podem ser classificadas como: manual ou automática.

De acordo com Rolim (2003), para as MMCs manuais a movimentação do cabeçote apalpador até os pontos da peça é realizada de modo manual pela ação do operador, como pode ser observado na Figura 2.3. Após o contato, as coordenadas dos pontos apalpados são automaticamente adquiridas pelo computador, que recebe informações das escalas de medição para realização do processamento matemático, resultando nas dimensões das peças ou geometrias substitutas. O modelo manual exige um pouco mais de habilidade nas execuções das medições por parte do operador, quando comparadas com os modelos automáticos. As travas pneumáticas, também ilustradas na Figura 2.3, são responsáveis por permitir ou vetar a passagem de ar comprimido para as guias aerostáticas que compõe a máquina.

Uma característica peculiar das Máquinas de Medição por Coordenadas automatizadas está associada a sua unidade de controle, a qual tem função de interação entre os vários componentes que a compõe, tais como: acionamento de motores, transdutores de deslocamento, sistema de apalpação, entre outros. A Figura 2.4 exemplifica uma MMC automática destacando suas principais partes.

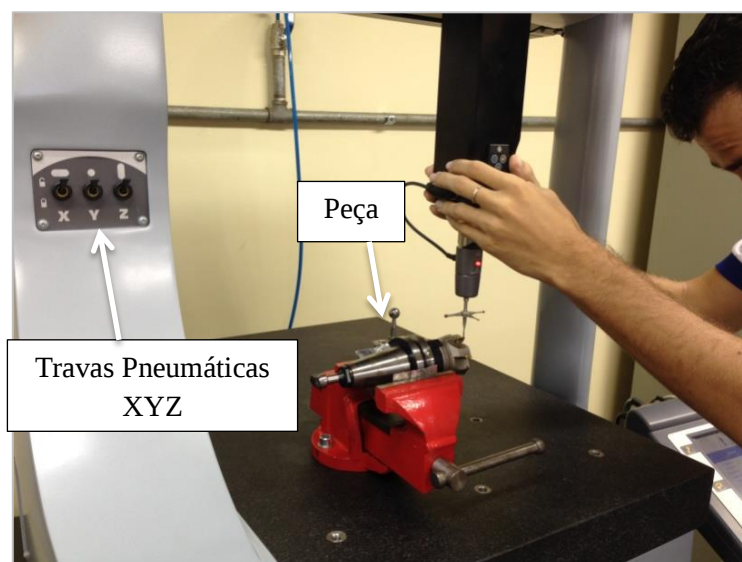


Figura 2.3 – Medição com MMC manual



Figura 2.4 – Composição MMC automática

São consideradas automáticas as MMCs com a movimentação dos seus eixos controlada via Comando Numérico Computadorizado (CNC), e que utiliza *joystick* para movimentação do apalpador, no caso de operações semi-automáticas. De acordo com Sousa (1998), a programação para realização das medições no modo automático pode ser escrita em uma linguagem computacional adequada ou através da técnica de aprendizado, utilizando o *joystick*. Nesta última, a medição da primeira peça é realizada utilizando o *joystick* para definição dos pontos a serem medidos, a sequência de medição e as trajetórias do sensor de acordo com as características a serem inspecionadas, gerando assim, automaticamente, o programa que permite a repetição para medição de outras peças com as mesmas características. Durante o funcionamento o CNC também recebe a indicação da velocidade desejada para movimentação dos eixos. Neste caso, sinais são enviados para os servo-motores que acionam os eixos da máquina.

Wozniak *et al* (2011) afirmaram que as MMCs são amplamente utilizadas na indústria para controlar as dimensões e geometria das peças mecânica, entretanto diversas fontes de erros podem afetar a precisão destas MMCs como erros dos eixos das

máquina e erros do sistemas de apalpação. Wozniak *et al* (2014) relatam que a metrologia por coordenadas, durante estas últimas décadas, tem se tornado uma técnica poderosa e essencial para inspeção de partes numa vasta gama de indústrias, e que as MMCs permitem, além da fácil medição de peças tridimensionais complicadas, a realização da coleta de pontos geométricos. Indústrias altamente competitivas como, por exemplo: aeroespacial e automotiva, exigem sistemas de medição cada vez mais precisos para medir suas peças manufaturadas de elevadas tolerâncias.

Seja qual for a MMC que esteja sendo utilizada, a confiabilidade dos resultados das medições está diretamente relacionada à estratégia de medição, ou seja, o conhecimento de boas práticas metrológicas torna-se essencial para o sucesso das medições. Ao longo dos anos, uma ênfase cada vez maior vem sendo dada ao treinamento dos operadores de MMC, visto que a referida tarefa está diretamente associada à sua qualificação (Hamburg-Piekar, 2006). A partir de uma estratégia de medição e/ou da decisão do operador, define-se o número e distribuição dos pontos na superfície da peça. Estes dois fatores estão interligados diretamente em função das aproximações feitas nos processamentos matemáticos escolhidos para definir as geometrias. Em cada MMC, para o cálculo de determinada geometria, é solicitado o número mínimo de pontos que devem ser apalpados. Quanto maior a quantidade de pontos, e adotada uma boa configuração para distribuição na superfície da peça a ser medida, mais confiável será o resultado da medição. Porém, nos processos industriais espera-se do controle de qualidade respostas rápidas, sendo necessário, portanto, que as peças sejam medidas de modo mais rápido possível, o que concorre para a maioria dos usuários de MMCs executarem medições tomando o número mínimo de pontos coordenados, principalmente naquelas empresas que utilizam máquinas manuais com apalpadores ponto a ponto, os *Touch Trigger Probes*. Trabalhos têm sido desenvolvidos na busca do número mínimo de pontos necessários para determinação adequada de geometrias e também da distribuição sobre a superfície da peça. São exemplos: Orrego *et al*, (2000), Sato *et al* (2004) e García-Hernández *et al* (2013).

De acordo com Varady *et al* (1997), Máquinas de Medição por Coordenadas não são apenas utilizadas para medição de peças, mas também para trabalhos de engenharia reversa. São trabalhos recentes os publicados por Genta *et al* (2015) e Aalam e Al-Ahmari (2015) que versam sobre a otimização de parâmetros para reconstrução de superfícies de forma livre usando MMCs.

2.3 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO PARA INSPEÇÃO DE PEÇAS

O primeiro modelo de uso industrial das máquinas de medir por coordenadas foi apresentado na Feira Internacional de máquinas de Paris, em 1960, pela Ferranti, fabricante inglês de máquinas operatrizes (Bueno, 2009). Desde então, a evolução de diversas tecnologias como sensores lineares de deslocamentos, análise de deformações estruturais, sistemas de movimentação, capacidade computacional, entre outras, contribuíram para um melhor desempenho das MMCs. Mas a invenção e desenvolvimento de um item em especial pode ser considerado a chave para o crescimento e popularização destas máquinas, o *sensor eletrônico por contato*.

Na atualidade, as Máquinas de Medição por Coordenadas incorporam um magazine com uma variedade de tipos de sensores, podendo estes serem divididos em dois tipos: *sensor por contato* e *sensor sem contato*. Com o objetivo de reduzir a intervenção do operador no processo de inspeção, algumas MMCs possibilitam à mudança de sensores de forma automática, podendo ainda selecionar o melhor sensor para determinadas tarefas de medições. Nas Figuras 2.5a e 2.5b é possível observar um magazine com diferentes tipos de sensores, além de um cabeçote em operação para selecionar o dispositivo que melhor se adequa a uma determinada tarefa de medição.

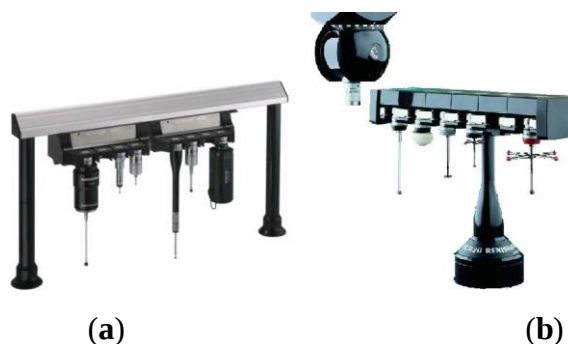


Figura 2.5 – (a) Magazine das MMCs (b) MMC em operação para acoplamento do apalpador

2.3.1 Medição por contato

Para realização das medições por contato, duas técnicas para aquisição dos pontos coordenados podem ser utilizadas, a técnica conhecida como ponto a ponto e a de escaneamento contínuo, nas quais utilizam, respectivamente, os apalpadores *touch trigger* e *scanning probes*, sendo estes também conhecidos como *probes* de

digitalização. No processo de inspeção o cabeçote da máquina pode utilizar uma única haste ou várias hastes como mostram as Figuras 2.6a e 2.6b, respectivamente. Quando são solicitadas medições em diferentes direções e profundidade a utilização de várias hastes agilizam o processo de inspeção.

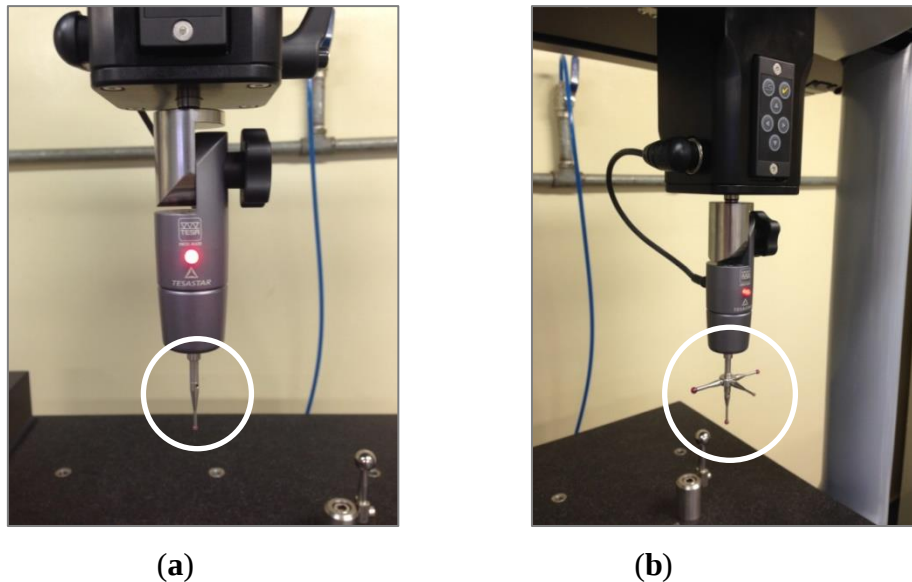


Figura 2.6 – (a) Sensor TTP com haste única (b) sensor TTP com várias hastes

Máquinas de Medição por Coordenadas que possuem haste fixa montada verticalmente, possibilitam modificar a orientação do sensor por meio dos cabeçotes. Esta modificação da orientação do sensor pode ser realizada utilizando cabeçote do tipo manual/articulado ou motorizado. As Figuras. 2.7a e 2.7b ilustram, respectivamente, cabeçotes manual e motorizado, orientando o sensor numa posição conveniente para aquisição dos pontos coordenados.

Tendo em vista a utilização de um apalpador *touch trigger* para realização das medições deste projeto, a seção seguinte explica com detalhes o princípio de funcionamento e características do referido sensor.



(a)



(b)

Figura 2.7 – (a) Apalpador acoplado a um cabeçote manual (b) sensor TTP acoplado a um cabeçote motorizado

2.3.1.1 Apalpadores *touch trigger*

Quando a primeira MMC foi desenvolvida, eram bastante utilizados como elemento sensor os *probes* rígidos. Este dispositivo era um apalpador mecânico unidirecional, e para cada mudança de direção de medição necessitava-se da mudança de posicionamento do sensor e um novo referenciamento, que resultava em uma fonte de incerteza muito grande e uma redução na velocidade de resposta da MMC, principalmente como no caso da medição de diâmetros, esferas, entre outros. O referido sensor era acoplado em componentes móveis das máquinas e exigiam forças do operador para conduzi-lo até um determinado ponto de medição. Neste ponto específico, o operador pressionava um botão ou uma *chave-de-pé* para armazenar a leitura da escala da Máquina de Medição por Coordenadas (Cauchick-Miguel e King, 1997).

Foi diante da necessidade de medir dutos nos motores que equipavam o Concorde que o engenheiro da *Rolls Royce*, Sr. *David McMurtry* inventou o sensor de toque eletrônico multidirecional. Batizado de TP1 (*Touch Probe 1*), o sensor inventado por *McMurtry* revolucionou o uso da MMC, e com ele foi possível realizar medições mais complexas com exatidão e um tempo muito menor do que o necessário pelos sistemas anteriores (Nóbrega, 2011). A Figura 2.8 ilustra o primeiro TTP (*Touch Trigger Probe*).



Figura 2.8 – Primeiro sensor TTP 3D patenteado por *McMurtry*

Após negociação da patente do sensor supracitado com a *Rolls-Royce*, o Sr. David fundou a *Renishaw*, atual líder mundial na fabricação e comercialização de tais equipamentos. Paralelamente, vários fabricantes surgiram, porém, com o princípio de funcionamento patenteado, diferentes tecnologias precisavam ser desenvolvidas (Coelho e Guerra, 2006).

Independentemente da tecnologia a ser utilizada, o sensor de medição é o dispositivo responsável pela identificação do ponto a ser considerado. Quando acionado o sensor envia uma informação ao controle da MMC para que o mesmo capture os valores registrados nos indicadores de deslocamento individuais de cada eixo e os considere como as coordenadas X, Y e Z do ponto que gerou o acionamento do sensor de medição, ou seja, o TTP se baseia na geração ou interrupção de um sinal elétrico, o *trigger*, no momento do contato entre o apalpador e a peça a ser inspecionada.

Uma particularidade a ser considerada para este tipo de sensor é que o sinal de *gatilho* não é gerado assim que o apalpador entra em contato com a peça, ocasionando o efeito conhecido na literatura como: pré-deslocamento ou *pré travel*. Este fenômeno pode ser observado na Figura 2.9. De acordo com Shen e Moon (1996), no momento em que TTP toca na peça, o mesmo irá continuar o seu movimento, até que ocorra uma deflexão mínima da haste necessária para ativar o elemento sensor do apalpador. Alguns autores denominam este fato de *folga de percurso*.

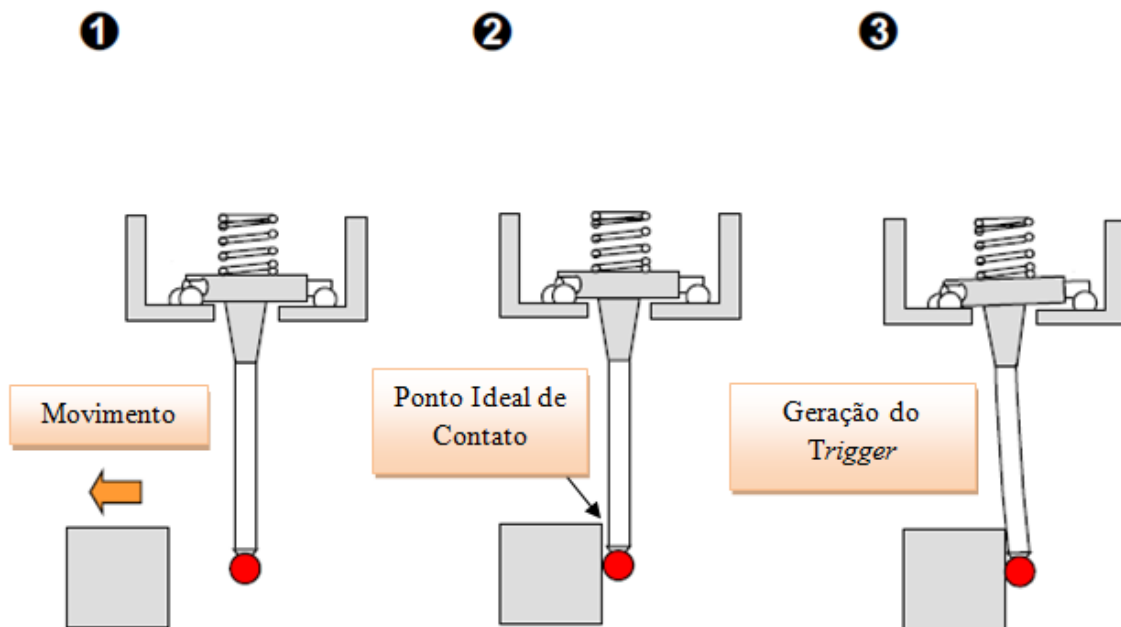


Figura 2.9 – Posição ideal de contato versus posição de geração do sinal *Trigger*
(Nóbrega, 2011)

Existem basicamente três configurações distintas de sensor *Touch Trigger* que são utilizadas pelos diversos fabricantes de apalpadores, para gerar o sinal que indica o contato sensor-peça. São elas: Contato Elétrico, conhecido na literatura por *Kinematic Contact*, Extensômetros ou *Strain Gauges* e por fim, efeito Piezoelétrico.

O sensor *TTP* trabalha com a configuração *Kinematic Contact*, que altera sua condição de acordo com a força aplicada ao ponto de contato (*ponto de medição*), convertendo um evento mecânico em um sinal elétrico. É importante destacar que a esfera localizada na ponta da haste, elemento que entra em contato com o objeto a ser medido, é geralmente feita de rubi, uma vez que este material é bastante rígido e resistente ao desgaste (Bosch, 1995).

A construção do sensor de medição é composta de duas partes, uma fixa e uma móvel, sendo a parte mais importante do sensor o conjunto de três atuadores formados por um par de mancais e um contato entre eles, disposto a 120° entre si e montados entre a parte móvel e a fixa. A disposição de 120° é responsável por um efeito conhecido como *Trilobular*. Existe ainda outro componente muito importante que é a mola de sujeição, responsável por manter a parte móvel e a fixa em contato quando o sensor estiver em seu estado de repouso. A configuração descrita está ilustrada na Figura 2.10.

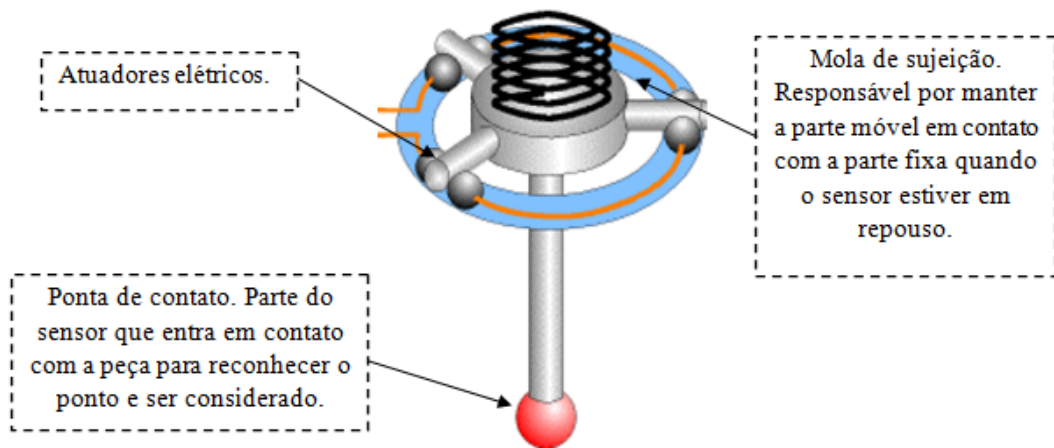


Figura 2.10 – Esquema mecânico do sensor *Touch Trigger* (Nóbrega, 2011)

Os atuadores tem a função de conduzir o sinal elétrico durante seu estado inicial e interromper este sinal quando acionado, funcionando como uma chave normalmente fechada (*NF*). A Figura 2.11 ilustra um apalpador do tipo *Touch Trigger* desenvolvido por Nóbrega (2011) destacando o esquema elétrico deste sensor.

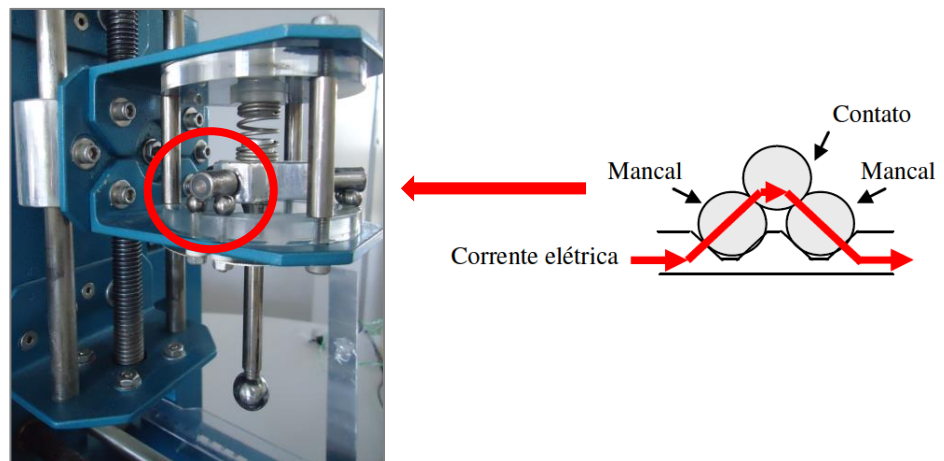


Figura 2.11 – Esquema elétrico do sensor *Touch Trigger*

A mola de sujeição atua como um gatilho do sistema e, assim que o momento sobre a parte móvel M_m – Equação 2.1 for maior que o momento da mola sobre o conjunto móvel M_m' – Equação 2.2, o sistema de atuadores elétricos se separa e interrompe a corrente elétrica do sensor. Por conta desta relação, é a mola que regula o momento de *disparo* do sensor (Nóbrega, 2011). A Figura 2.12 representa as forças citadas anteriormente, em que:

- F_s – Força da mola sobre o conjunto móvel;
- F_c – Força exercida pelo sensor sobre a peça (resultante do movimento relativo entre eles).
- L – Comprimento da haste do sensor;
- R – Comprimento do raio representado na Figura 2.12.

$$M_m = F_c \cdot L \quad (2.1)$$

$$M_m' = F_s \cdot R \quad (2.2)$$

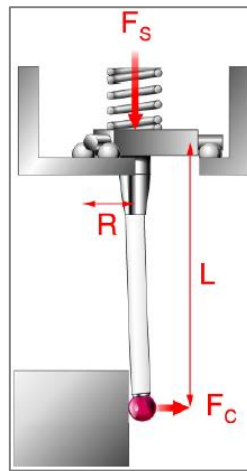


Figura 2.12 – Balanço de forças do sensor TTP (Estado de repouso)

Quando o sensor é movimentado em direção à peça, o valor de F_c aumenta. Como L , R e F_s são constantes, de acordo com as Equações 2.1 e 2.2, após um determinado deslocamento o valor de M_m fica maior que M_m' , ocasionando a abertura dos contatos e o disparo do sensor (Bueno, 2009). A Figura 2.13 ilustra o sensor atuando, interrompendo o circuito elétrico. Segundo Reid (1995), o sinal de gatilho deste tipo de sensor não apenas ocorre quando um dos contatos elétricos é totalmente interrompido, mas já tem início pela alteração da resistência do contato.

Como os atuadores estão dispostos a 120° entre si, a ação pode ocorrer quando F_c for aplicada em qualquer uma das direções radiais do sensor. Esta capacidade aliada à repetitividade de atuação da mola é que conferem ao sensor multidirecional a exatidão e flexibilidade necessária para uma MMC (Bueno, 2009).

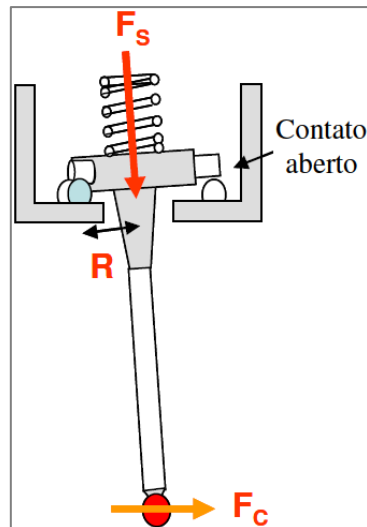


Figura 2.13 – Sensor TTP atuado ($M_m > M_m'$)

2.3.1.2 Outras tecnologias de sensores

Além dos sensores de disparo por toque, outras tecnologias de sensores são utilizadas para inspeção de peças, mas sempre baseadas no princípio de converter uma grandeza física em um sinal elétrico que ordena ao controle da MMC a coleta das coordenadas X, Y e Z dos pontos “*alvo*”.

Para coleta com mais amostragem em um menor tempo, estão disponíveis no mercado os sensores do tipo visão de máquina e de leitura a laser. O sensor do tipo visão de máquina está ilustrado na Figura 2.14 inspecionando uma placa de circuito impresso. O objetivo deste sensor é dotar as MMCs de uma capacidade visual semelhante à dos seres humanos.

Nos sistemas de medição a *laser*, os dados são coletados em dezenas de milhares de pontos por segundo, permitindo que a medição de pequenos furos e ranhuras seja feita com uma única varredura da linha *laser* sobre a peça, no qual com a utilização dos sensores por contato, várias varreduras seriam necessárias (*Hexagon Metrology*). A Figura 2.15 ilustra uma inspeção utilizando um sensor a *laser*.

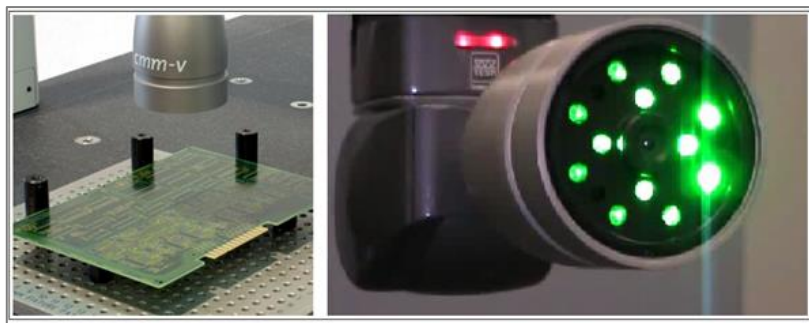


Figura 2.14 – Sensor visão de máquina inspecionando placas de circuito impresso



Figura 2.15 – Inspeção utilizando sensor laser

2.4 FONTES DE INCERTEZA NAS MMCS

Mesmo sendo aplicados recursos de tecnologia avançada, a técnica da medição por coordenadas não é perfeita. Como qualquer sistema de medição, estas máquinas também apresentam erros que são de difícil avaliação quando comparados aos sistemas de medição convencionais.

As fontes de incerteza associadas à medição por coordenadas podem ser classificadas dentro de quatro grupos, são eles: MMC, ambiente de medição, peça, operador juntamente com a estratégia de medição. A Figura 2.16 destaca um diagrama com as principais causas que podem influenciar o resultado de uma medição realizada numa MMC. De acordo com Albertazzi Jr. e Sousa (2008), por melhor que seja a qualidade do sistema de medição, por mais cuidadoso e habilidoso que seja o operador e por mais bem controladas que sejam as condições ambientais, ainda assim, em maior ou menor grau, o erro de medição estará presente.

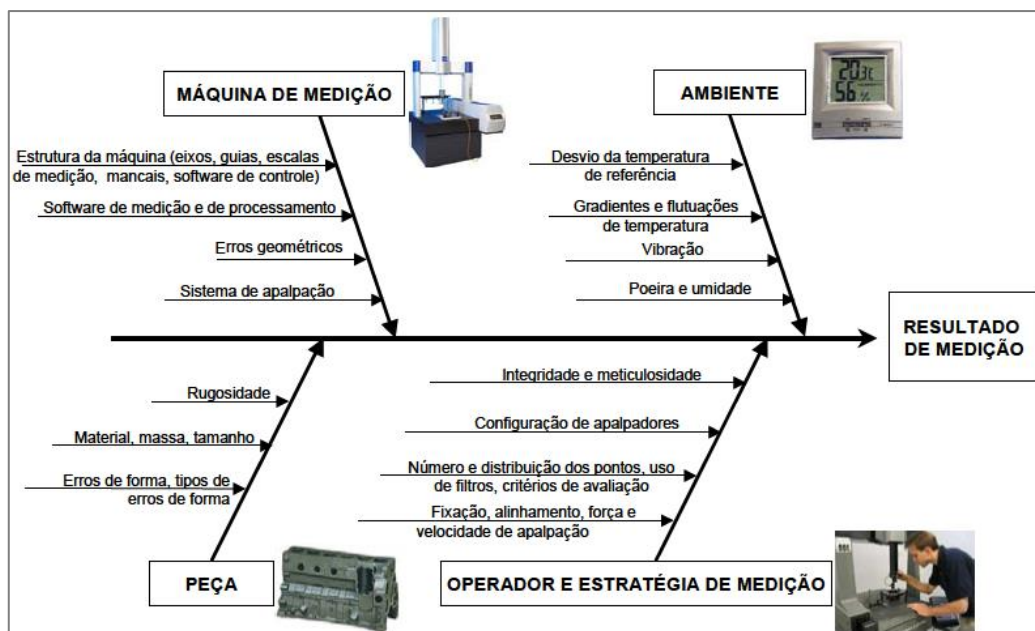


Figura 2.16 – Principais fontes de incerteza na medição por coordenadas

Quanto às fontes de incerteza provenientes da MMC, estas podem ser divididas basicamente em três subsistemas: estrutura da máquina, sistema de apalpação e *software* de medição. Gemaque (2004), utilizou em sua pesquisa uma Máquina de Medição por Coordenadas com *software* específico para o controle dimensional e geométrico de engrenagens. Uma das vantagens de usar um *software* dedicado para este tipo de tarefa é que o mesmo fornece incertezas de medição compatíveis com algumas classes de engrenagens.

Albertazzi Jr. e Sousa (2008) destacam que as fontes de erros podem ser internas ao sistema de medição ou externas a ele, podem decorrer da interação entre o sistema de medição e o mensurando ou entre o sistema de medição e o operador. Nas seções 2.4.1 a 2.4.5 serão apresentadas as componentes principais de tais categorias de fontes de erros das MMCs.

2.4.1 Erros geométricos

Nas fontes de erros internos ao sistema estão os erros que mais influenciam os resultados das medições. Os *erros geométricos* são classificados dentro de tal grupo e, de acordo com Rolim (2003), estes representam a maior fonte de desvios nos resultados das medições realizadas com as MMCs. Desde o início da medição por coordenadas, os erros inerentes ao projeto e construção da MMC vêm sendo constantemente estudados,

pois estes são geralmente uma das principais causas de incerteza (Weckmann *et al*, 2004). Arenhart (2007), afirma que as fontes de erro em uma MMC são geralmente constituídas por aspectos estruturais mecânicos, construtivos e de montagem, envolvendo os elementos de máquinas (guias, mancais, escalas, entre outros).

Numa máquina com 3 (três) eixos tem-se para cada um deles, 6 (seis) componentes de erros geométricos, somando 18 (dezoito) erros para MMC. A estes, somam-se ainda os 3 (três) erros de perpendicularidade/esquadro entre os eixos da máquina, totalizando-se 21 (vinte e um) erros. A Figura 2.17a ilustra o modelo de um corpo rígido, no qual o mesmo servirá como referência para representar os 6 (seis) graus de liberdade do eixo y da máquina, ou seja, será considerado apenas uma guia. Para o referido eixo, são 3 (três) graus de rotação e 3 (três) de translação que, neste caso, podem gerar erros de deslocamentos no sistema de apalpação em relação às escalas. De acordo com a Figura 2.17a, os erros de rotação podem dar-se em torno do eixo X (y_{rx}), em torno do próprio eixo Y (y_{ry}) ou em torno do eixo Z (y_{rz}). Oliveira (2003), afirma que os erros de rotação se dividem em: rolamento (*roll*), guinamento (*yaw*) e tombamento (*pitch*), conforme ilustrado na Figura 2.17b. Os erros de translação podem ser de retilidade nas guias (y_{tz} e y_{tx}) ou das escalas (y_{py}). Os desvios geométricos apresentados podem ser advindos da fabricação (erros de planeza e retitude), montagem e ajustes mecânicos ou desgaste dos elementos.

Os erros geométricos, sendo de origem sistemática, permitem a realização de sua correção através de programas computacionais, melhorando de modo expressivo à exatidão das medições realizadas com as MMCs (Rolim, 2003).

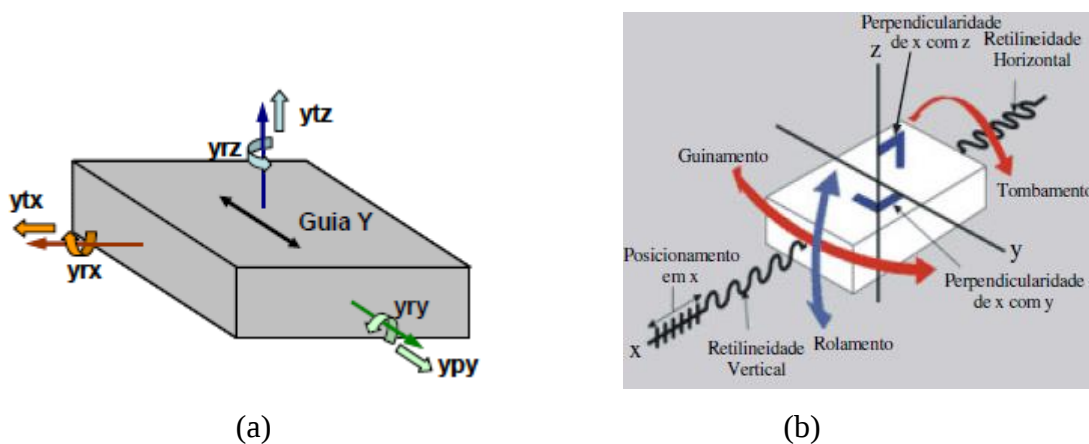


Figura 2.17 – (a) Representação dos erros geométricos em um eixo da MMC (b) erro de rotação (*roll*, *pitch* e *yaw*)

2.4.2 Erros do sistema de apalpação

Como descrito, a aquisição de dados da peça a ser medida é realizada pelo sistema de apalpação, normalmente denominado cabeçote apalpador, o qual pode ser do tipo por contato e sem contato. De acordo com Noronha (1994), o sistema mais comumente utilizado no setor industrial é do tipo por contato com comutador e conhecido na literatura como *touch trigger*.

Os erros provocados pelo sistema de apalpação têm componentes aleatórias e sistemáticas, cuja amplitude depende muito das condições de uso do conjunto cabeçote/apalpador, como por exemplo: tempo de uso, severidade de colisões, nível de poeira no ambiente, manuseio pelos operadores, etc. Pode ser citado ainda, o projeto construtivo do sensor.

Segundo Oliveira (2003), boa parte dos efeitos sistemáticos dos erros de apalpação são compensados pela qualificação do apalpador com a esfera padrão da máquina. Entretanto, restam erros residuais de flexão da haste, desvio de forma do sensor (esfera do apalpador), repetibilidade. Geralmente estes erros tornam-se significativamente maiores quando são utilizadas hastes mais longas.

Erros causados pelo sistema de apalpação são caracterizados por desvios na posição de referência do apalpador. São algumas das potenciais causas de erros dos apalpadores do tipo TTP:

- **Rigidez Limitada:** Principal causa do efeito conhecido na literatura como **pré-deslocamento**. Como descrito na seção 2.3.1.1, quando o elemento sensor entra em contato com a peça, um balanço de forças é estabelecido. Antes do **trigger** ser alcançado, os momentos M_m e M_m' vão aumentando e causando uma deflexão na haste do apalpador. Este fenômeno é denominado pré-deslocamento ou *pré-travel*. Silva e Silva (2009), afirmam que o modelo de análise das influências que envolvem a deflexão na haste do sensor pode ser bem representado como sendo o deslocamento de uma viga engastada com carregamento estático concentrado na extremidade livre, de acordo com a Equação 2.3, na qual E é o módulo de elasticidade transversal do material, e I o momento de inércia.

$$Pré - Deslocamento = \frac{F_c \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad (2.3)$$

- **Erros do Sistema Eletrônico:** Este tipo de erro pode ser observado principalmente em apalpadores comutadores quanto ao atraso no tempo de resposta dos circuitos eletrônicos (Nóbrega, 2011).
- **Efeitos Térmicos:** A localização do centro da esfera pode sofrer deslocamentos caso haja dilatação da haste. Além disso, deformação térmica de componentes internos pode comprometer o funcionamento (Nóbrega, 2011).
- **Erros Geométricos:** São resultados de limitações envolvendo o processo de fabricação e fenômenos que podem ocorrer durante da utilização do sensor. Por exemplo, erro de forma da esfera de apalpação e desalinhamento da haste em função de erros de montagem. Além disso, podem ser citados os desgastes abrasivo e adesivo. O desgaste abrasivo é causado quando se digitaliza a superfície de uma peça de ferro fundido com esferas de rubi, e pequenas partículas de resíduo causam ranhuras na própria esfera, resultando em pequenos planos na ponta da haste, Figura 2.18a. Para minimizar este fenômeno e, conseqüentemente, o erro de medição, esferas de zircônia é uma opção. Ao contrário do desgaste abrasivo, o desgaste adesivo é causado quando a esfera e o material da peça têm uma afinidade química. Isso pode ser percebido na digitalização de peças de alumínio com esferas de rubi. Neste caso, o material passa de um componente relativamente dúctil para a ponta da haste, resultando no revestimento de alumínio à esfera e, mais uma vez, afetando a sua circularidade. Este fenômeno pode ser observado na Figura 2.18b.

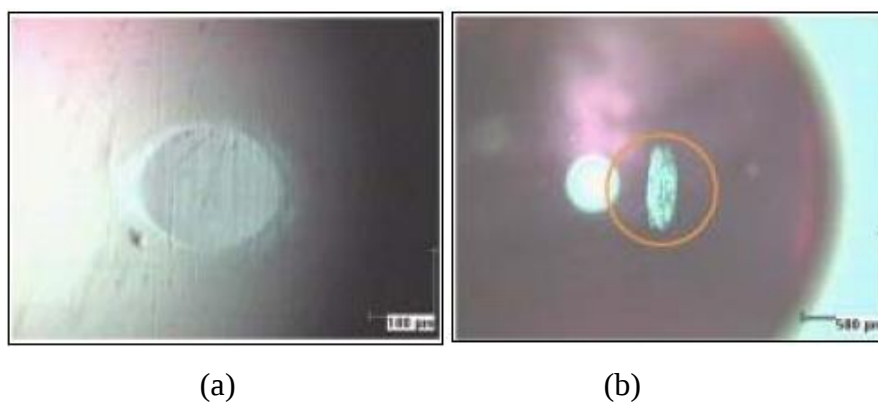


Figura 2.18 – (a) Desgaste abrasivo: material removido da esfera (b) desgaste adesivo: material depositado na esfera (Renishaw, 2009)

2.4.3 Erro do sistema de controle

As Máquinas de Medição por Coordenadas em sua grande maioria são equipadas com sistema de controle computadorizado para realização automática das tarefas de medição. Mesmo sendo fabricados com recursos de alta tecnologia, os controles disponibilizados estão sujeitos a erros, favorecendo tanto a indicação incorreta dos valores das coordenadas, como também os erros de digitalização quanto à amostragem na conversão dos sinais das escalas de medição (Lima Jr *et al*, 2007).

O sistema de controle da MMC é formado por circuitos eletrônicos que recebem as informações sobre o modo como a máquina irá realizar a operação de medição. Neste caso, as informações são processadas e repassadas ao módulo de acionamento na forma de impulsos elétricos, os quais são responsáveis pelo acionamento dos motores que transmitirão à máquina os movimentos solicitados. Essa operação é realizada em uma sequência programada para o posicionamento e coleta de pontos, com definição controlada dos valores de velocidade e aceleração (Rolim, 2003).

2.4.4 Outras fontes de erros internas ao sistema de medição

As escalas de medição são acessórios de fundamental importância na tecnologia e funcionamento das MMCs. Estas escalas normalmente são do tipo eletro-ópticas incrementais podendo ser reflexiva, confeccionada em aço, ou transparente, confeccionado em vidro, existindo ainda opção do uso de laser interferométrico. As Figuras 2.19a e 2.19b ilustram as escalas de medição instaladas nas direções dos eixos da máquina e a escala do eixo Z referente à MMC manual *Micro-Hite 3D*.

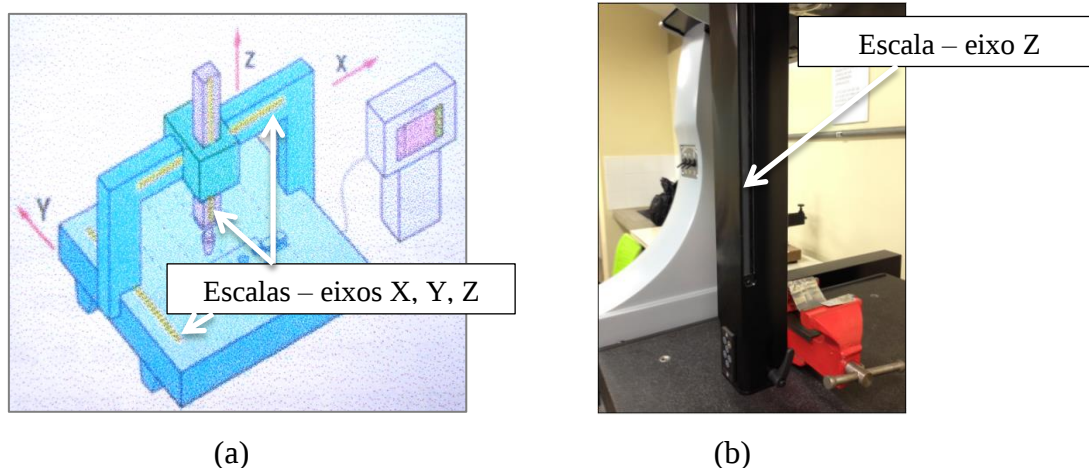


Figura 2.19 – (a) Posicionamento das escalas de medição (Rolim, 2003) (b) Escala de medição do eixo Z da MMC *Micro-Hite 3D*

Noronha (1994), afirma que a principal causa de erros nas escalas eletro-ópticas está relacionada ao espaçamento entre os traços no sentido da existência de uma subdivisão defeituosa. Outras possíveis causas de erros são: falhas na montagem e nos ajustes, assim como erros de aquecimento local por meio do conjunto optoeletrônico provocando dilatação não homogênea.

O processamento computacional também se torna motivo de desvio nas Máquinas de Medição por Coordenadas. A partir das coordenadas dos pontos apalpados, o processamento matemático para obtenção da geometria procurada, conhecida na literatura como geometria substituta, é executado por meio de algoritmos matemáticos. Muitos dos fabricantes de MMCs desenvolvem e utilizam, para determinação das geometrias substitutas, diferentes algoritmos matemáticos, como por exemplo: mínimos quadrados, condição mínima, entre outros. É a partir dos algoritmos matemáticos e da quantidade de pontos coordenados coletados que se definem entidades como reta, plano, circunferência, cone, cilindro, esfera e outras possíveis combinações para determinação de elementos geométricos. Alguns autores afirmam que ainda não há métodos universalmente aceitos para avaliar os efeitos de um determinado algoritmo matemático na incerteza total de medição com uma MMC. Pesquisas no que diz respeito à avaliação dos erros nos processamentos matemáticos das medições com MMCs foram desenvolvidas. Entretanto, os resultados comprovaram várias diferenças nos resultados, modificando assim o pensamento aceito até então de que o processamento matemático não constituía fonte de erros no resultado da medição.

2.4.5 Fontes de erros externas ao sistema de medição

Os resultados das medições realizadas com MMCs também podem ser afetados por fatores externos. Podem ser destacadas como fontes de incerteza externas as medições por coordenadas: erros devido às variações de temperatura, erros devido à velocidade de medição, erros dinâmicos, entre outros.

Uma das maiores fontes de erros externo numa MMC está relacionada às variações de temperatura no ambiente de trabalho. Os efeitos dessas variações afetam diretamente a repetibilidade da máquina (Orrego, 1999). Esta fonte de erro atua tanto na estrutura e escalas da máquina quanto nas peças a serem medidas, pois expansões ou contrações térmicas podem levar a desvios nos resultados.

Apesar de existir a possibilidade de minimizar os efeitos da temperatura, seja por compensação matemática ou através do uso de máquinas com maior robustez aos efeitos de temperatura, é de fundamental importância que se busque um eficiente controle das condições ambientais para que a confiabilidade das medições não seja comprometida. A observância das condições limites ambientais especificadas no manual é imprescindível para que a performance da máquina seja mantida conforme a especificação. Fabricantes de MMCs especificam, na maioria das vezes, que estas máquinas sejam utilizadas em ambiente com temperatura controlada no valor de referência de $(20^{\circ} \text{C} \pm 1)$. A incapacidade de manter o ambiente de medição nesta faixa compromete o desempenho da máquina frente àquele declarado pelo fabricante.

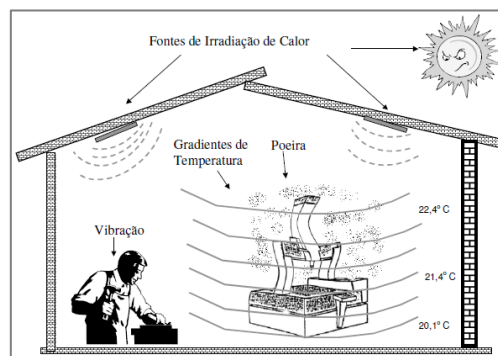
Outro ponto a ser considerado na utilização das MMCs e que pode ser caracterizado como fonte de desvio é a velocidade com a qual as medições são realizadas. Ao apalpar um ponto coordenado sobre a superfície de uma peça, existirá um tempo de resposta entre o momento de disparo do sinal do sensor, a chegada da informação ao controle da máquina e a leitura do posicionamento dos indicadores dos eixos, no qual este processo é realizado na ordem de milissegundos. Bueno (2009), afirma que esse tempo é suficiente para criar uma diferença de posicionamento entre o momento de disparo e o valor armazenado da indicação do eixo. Essa é uma condição particular das máquinas que utilizam os sensores *touch trigger* com a tecnologia dos contatos cinemáticos (*kinematic contact*), no qual o valor do erro torna-se constante desde que a velocidade de medição seja constante. Para este caso o erro é caracterizado como sistemático, podendo ser corrigido adicionando ou diminuindo uma constante ao valor exibido.

A diferença entre a posição de disparo e a posição armazenada é diretamente proporcional à velocidade de medição. Quanto maior a velocidade de medição, maior o deslocamento durante o *tempo de resposta* do sistema eletrônico. Esse efeito pode ser compensado durante o procedimento da calibração do sensor. Porém, se a velocidade de medição utilizada na calibração for diferente da utilizada na medição, a resposta dinâmica do sensor será diferente (Nóbrega, 2011). Quando se trabalha com velocidade de medição muito elevada, o diâmetro da esfera utilizada na ponta do apalpador considerado pelo sistema é cada vez menor, ou seja, é como se a ponta de contato “*encolhesse*”, devido à maior diferença entre a posição de disparo e o valor armazenado.

Os resultados das medições realizadas com Máquinas de Medição por Coordenadas são fortemente afetados por fontes de vibrações atuantes próximas ao local

onde estão sendo efetuadas as inspeções. Nas máquinas instaladas em laboratórios, têm-se efeitos dinâmicos bem menores, pois as forças envolvidas na medição são muito pequenas e, geralmente, os movimentos são lentos. Porém, nas máquinas instaladas em ambientes industriais, várias fontes de vibrações podem afetá-las. Entre as fontes comuns encontram-se as máquinas-ferramenta, compressores, prensas de conformação, movimento de cargas, tráfego de veículos e equipamentos de ventilação industrial. São práticas efetivas no sentido de minimizar o efeito das vibrações nas MMCs: utilização de amortecedores, instalação da máquina em fundação adequada, entre outras. Normas técnicas internacionais como *European Cooperation for Accreditation of Laboratories*, sugerem testes para análises dos níveis de vibrações nas máquinas. Pesquisas já são realizadas para o desenvolvimento de modelos que compensem os efeitos dos erros causados por vibrações. A Figura 2.20a ilustra o ambiente como fonte de incerteza na medição por coordenadas.

Estratégia de medição inadequada também pode ser considerada como fonte de erro externo. A Figura 2.20b ilustra os múltiplos conhecimentos que são necessários por parte do operador das MMCs.



(a)



(b)

Figura 2.20 – (a) Ambiente como fonte de incerteza na medição por coordenadas (b) conhecimentos requeridos por operadores de MMCs

2.5 ENGRENAGENS CILINDRICAS: TIPO, GERAÇÃO DO PERFIL EVOLVENTE E CONTROLE GEOMÉTRICO

As engrenagens se fazem presentes em vários mecanismos, aparelhos, máquinas e motores, com funções de: transmissão de movimentos entre eixos rotacionais, ampliação/redução de torque, conversão de movimentos de rotação em movimentos de translação (associação engrenagem/cremalheira), bombeamento de fluidos, entre outros. As Figuras 2.21a e 2.21b ilustram aplicações com engrenagens.

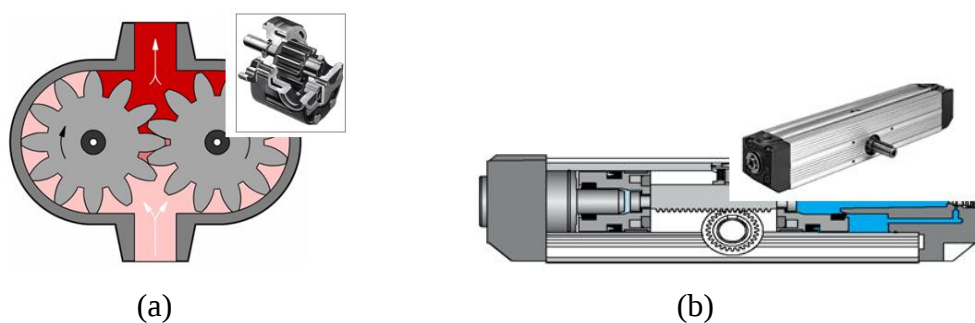


Figura 2.21 – (a) Bomba de engrenagens (b) Atuadores rotativos

Essas peças são um dos mecanismos mais comuns para transmissão de torque e movimento. Para muitas indústrias modernas e aplicações de transporte, as engrenagens são importantes e frequentemente usadas como componentes fundamentais. Erros na fabricação destas rodas dentadas causam dois tipos de problemas: o aumento do ruído acústico e um maior desgaste durante a operação (Gadelmawla, 2011). Martin *et al* (2008), desenvolveu um *software* para o controle dos parâmetros geométrico de engrenagens. Este autor afirma que nos últimos anos a indústria de transmissão tem tido um impacto no projeto de peças mecânicas e, concomitantemente, um aumento na rigorosidade das inspeções das peças fabricadas, no que diz respeito aos níveis de tolerância.

Convém ressaltar que no tocante as engrenagens, métodos de medição ópticos para inspeção de micro engrenagens tem sido utilizados. Esforços também têm sido dispensados na tentativa de desenvolver apalpadores com menores dimensões capazes de executar medições de pequenas rodas dentadas (Gear Metrology, 2003); (Gadelmawla, 2011); (Enami *et al*, 1999); (Okuyama, 1994); (Younes *et al*, 2005 – parte 1) e (Younes *et al*, 2005 – parte 2)

Nesse contexto, os itens que seguem abordarão, respectivamente: os tipos e aplicações de engrenagens; a geração do perfil evolvente e por fim, o controle geométrico de engrenagens e instrumentos de medição.

2.5.1 Engrenagens: tipos e aplicações

Do ponto de vista da geometria global, as engrenagens podem ser classificadas em: cilíndrica, cônicas e hiperbolóidicas. Nessa ordem, tem-se um aumento da complexidade tanto de projeto quanto de fabricação e, conseqüentemente, de inspeção. A qualidade geométrica necessária para uma determinada aplicação e a seleção do tipo de engrenagem dependerá de algumas variáveis de projeto, como por exemplo: posição geométrica relativa dos eixos no espaço, potência a ser transmitida, velocidade de rotação, limitação do nível de ruído, eficiência da transmissão, entre outras (Collins, 2006).

As engrenagens cilíndricas podem ser de dentes retos ou helicoidais. No primeiro caso, as engrenagens cilíndricas possuem seus dentes orientados na direção paralela ao eixo de transmissão. Este tipo de engrenagem possui rendimento elevado pela ausência, quase que total, de deslizamento entre os flancos de dentes conjugados, não gerando cargas axiais nos mancais. Porém, são ruidosas em alta velocidade de operação devido à existência de cargas de impacto, as quais limitam a velocidade de operação destas engrenagens e, conseqüentemente, seu campo de aplicação. Já as engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais normalmente são empregadas com eixos paralelos, mas também são encontradas com eixos reversos. Nestas engrenagens, os flancos dos dentes conjugados entram em contato de forma progressiva, pela qual se tem uma diminuição das cargas de impacto e, conseqüentemente, do ruído (Gemaque, 2004). Apesar de esta característica possibilitar a aplicação de tal tipo de engrenagem em transmissões de alta velocidade, estas geram forças axiais nos mancais.

As engrenagens cônicas são utilizadas para transmissão entre eixos ortogonais e exigem alta exatidão na fabricação e montagem para um adequado funcionamento. Seus dentes podem ser retos ou helicoidais. Assim como as engrenagens cilíndricas de dentes retos, as engrenagens cônicas de dentes retos não devem ser utilizadas em altas velocidades. As engrenagens com geometrias hiperbolóidicas permitem altas relações de transmissão e grande capacidade de carga.

A complexidade geométrica das engrenagens é algo marcante, gerando grandes dificuldades em seu processo de fabricação e inspeção. As principais consequências dos erros geométricos são os elevados níveis de ruídos, vibrações, decréscimo do rendimento e falhas prematuras. Dentre as engrenagens mencionadas, um estudo mais detalhado sobre as engrenagens cilíndricas de dentes retos será realizado. O perfil evolvente deste tipo de roda dentada será um dos elementos de inspeção deste trabalho de tese. Nas seções de 2.5.2 a 2.6.1 serão abordados: a geração do perfil evolvente, controle geométrico de engrenagens e os sistemas dedicados à medição de engrenagens versus MMC.

2.5.2 Geração do perfil evolvente

O perfil evolvente de uma engrenagem é gerado a partir de retas tangentes a uma circunferência, denominada circunferência de base. Como pode ser observado na Figura 2.22a, a circunferência é caracterizada pelo seu diâmetro de base (d_b) e o e , parâmetro este que faz referência a espessura circular do dente. No primeiro momento, a reta tangencia a circunferência supracitada num ponto qualquer, chamado de **A** e a partir daí passa a rolar sem deslizamento sobre a circunferência de base, descrevendo no espaço os pontos **A**, **1'**, **2'**, **3'** e **A'**, como pode ser observado na Figura 2.22b.

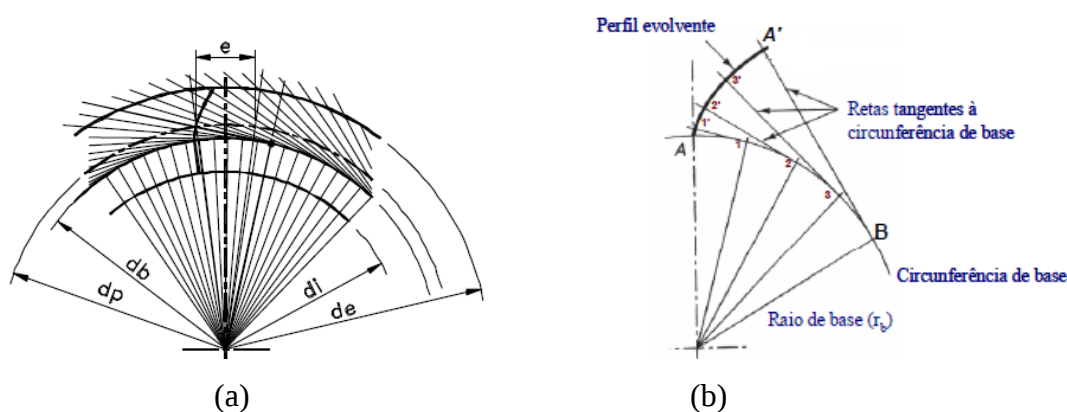


Figura 2.22 – (a) Traçado dos dentes pelo processo da evolvente (Vale, 2006) (b) setor da circunferência na geração do perfil

Neste caso, o perfil evolvente corresponde ao arco **AA'** e equivale a uma das formas geométricas dos dentes das engrenagens.

Se duas engrenagens possuem perfis ideais, o movimento de engrenamento será contínuo e as engrenagens só entram em contato na região do perfil evolvente, como pode ser observado na Figura 2.23a (Lima Jr., 2007). Essa figura destaca o engrenamento entre coroa e pinhão, na qual a evolvente 1 e evolvente 2, cada uma gerada a partir de sua respectiva circunferência de base, se encontram a partir do ponto de contato **P**. Se as condições citadas anteriormente foram obedecidas, o ponto **P**, durante o engrenamento, se desloca de **E** para **G**, sobre a reta de ação, como apresentado na Figura 2.23b. Esta reta é tangente às circunferências de base de ambas as engrenagens e perpendicular aos perfis evolvente. O ângulo de pressão ϕ , que corresponde ao ângulo formado pela reta de ação e a reta perpendicular à reta que une os dois centros das engrenagens, é de fundamental importância para a determinação das cargas nos flancos dos dentes. Portanto, a variação do ângulo de pressão implica consequentemente na variação das forças que agem sobre as engrenagens (Sousa e Denini, 2004).

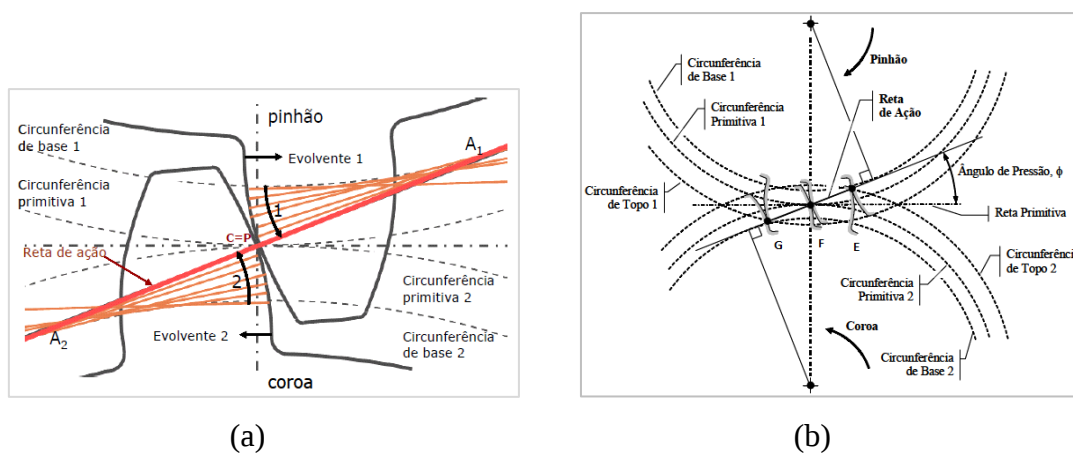
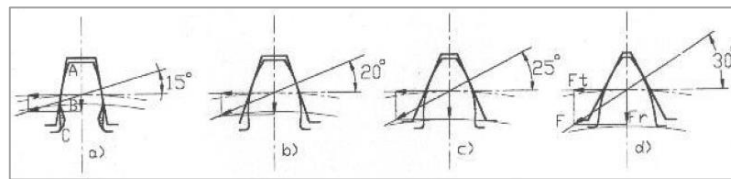


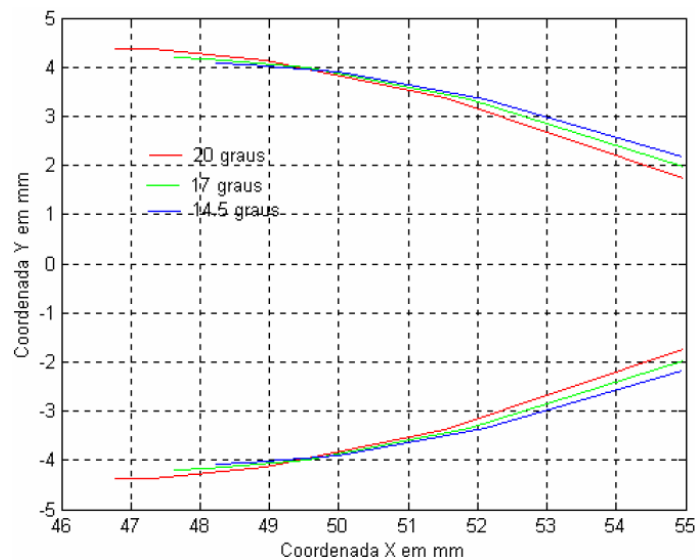
Figura 2.23 – (a) Engrenamento ideal na região do perfil evolvente (b) reta de ação (Lima Jr., 2007)

De acordo com Gasparin (2004), o ângulo de pressão define o formato do dente, enquanto que o módulo o tamanho do dente. A Figura 2.24a ilustra a evolvente ou formato do dente variando de acordo com o ângulo de pressão. Neste caso, pode-se perceber que quanto maior for o ângulo de pressão mais longo será o dente. Ao aumentar o módulo, muda-se a altura do dente da engrenagem e o passo circular. Lima Jr. (2007), também apresenta em seu trabalho de tese a influência do ângulo de pressão

na forma geométrica do dente e, por meio de simulação, demonstra que quanto maior o ângulo ϕ mais longo será o dente. Verificar Figura 2.24b.



(a)



(b)

Figura 2.24 – (a) Influencia do ângulo de pressão no formato dos dentes de uma engrenagem cilíndrica (Gasparin, 2004) (b) Variação da forma geométrica do dente em função do ângulo de pressão (Lima Jr., 2007)

Lima Jr. (2007) apresenta o perfil evolvente do dente sendo gerado a partir da circunferência de base, no qual depende do ângulo de pressão ϕ , e o ângulo da evolvente β . Verificar Figura 2.24.

O ângulo da evolvente (β) é matematicamente definido pela Equação 2.4 (Shigley, 1970).

$$\beta = ev(\phi) = \tan(\phi) - \phi \quad (2.4)$$

Observando a Figura 2.25, o raio (r) de um ponto qualquer, $P = (X, Y)$, da evolvente do dente em relação à origem do sistema é definido pela Equação 2.5.

$$r = \frac{r_b}{\cos(\beta)} = \frac{\left(\frac{Z \cdot m}{2}\right) \cos(\phi)}{\cos(\beta)} \quad (2.5)$$

Onde: r_b : raio da circunferência primitiva; Z: número de dentes da engrenagem; m: módulo da engrenagem.

Em função de r e β é possível obter as coordenadas (X,Y) de um ponto qualquer pertencente a evolvente com base nas Equações 2.6 e 2.7 (Spiegel, 1973).

$$X = r (\cos \beta + \beta \operatorname{sen} \beta) \quad (2.6)$$

$$Y = r (\operatorname{sen} \beta - \cos \beta) \quad (2.7)$$

Na prática, quando uma engrenagem é usinada, torna-se importante verificar se a mesma atende as especificações e tolerâncias definidas em projeto. Dentre os parâmetros geométricos que podem ser inspecionados, destaca-se o perfil evolvente do dente, pois o mesmo pode apresentar desvios em relação ao que foi definido em projeto.

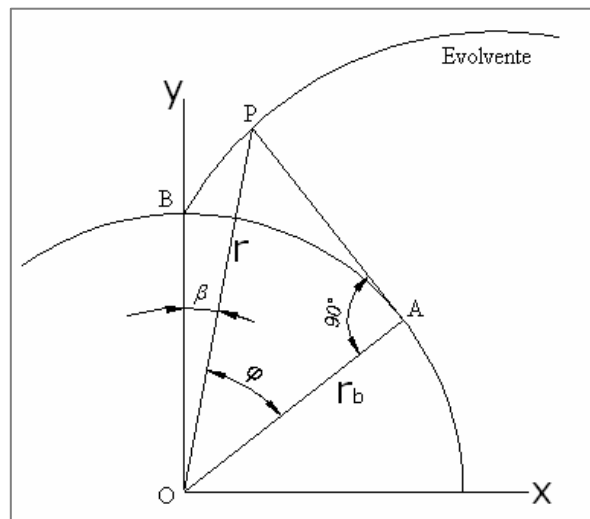


Figura 2.25 – Perfil evolvente em função do ângulo de pressão e do ângulo evolvente (Shigley, 1970)

2.5.3 Usinagem de engrenagens cilíndricas de dentes retos – Fresa Módulo

Fresa módulo é uma ferramenta de forma que se caracteriza por apresentar a mesma geometria do vão entre dois dentes adjacentes de uma engrenagem, ilustrada na Figura 2.26. O fato de poder ser utilizada em uma fresadora comum, que possua um

cabeçote divisor, torna este processo bastante utilizado em oficinas de fabricação e manutenção. Elas são fornecidas em um jogo de 8 peças para cada módulo, até o módulo 10 (M10). A Figura 2.27 ilustra a geometria das fresas em função do número de dentes, onde na parte superior do desenho tem-se a numeração da ferramenta e na parte inferior o número de dentes da engrenagem (Z) que a mesma é capaz de usinar. A partir do M10, tais ferramentas são fornecidas em um conjunto de 15, no qual os perfis dos dentes têm maior dimensão. Como pode ser observado ainda na Figura 2.26, quanto menor o número da ferramenta, maior o ângulo de curvatura do perfil evolvente que será usinado. As Figuras 2.28a, 2.28b, 2.28c e 2.28d ilustram, respectivamente, o desenho em *software* CAD de três engrenagens de módulo 8 mm (m8) e $Z = 12$; $Z = 30$ e $Z = 150$, e um comparativo entre os perfis desenhados.



Figura 2.26 - Fresa módulo para usinagem de engrenagens

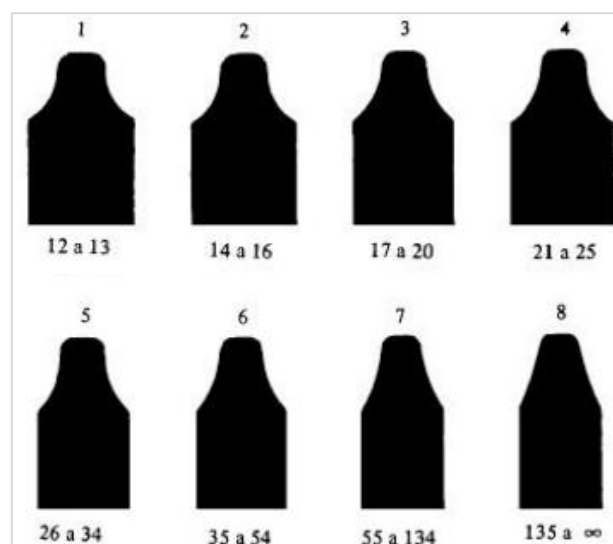


Figura 2.27 – Ferramentas em função do número de dentes

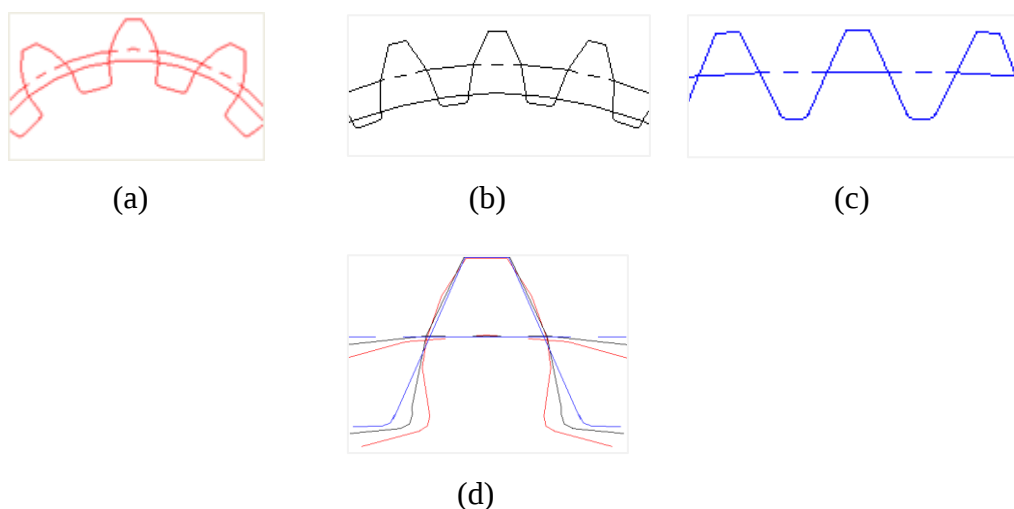


Figura 2.28 – Engrenagens cilíndricas de dentes retos com $m = 4$ mm (a) $Z = 12$ (b) $Z = 30$ (c) $Z = 150$ (d) comparação entre as curvas dos dentes.

2.6 CONTROLE GEOMÉTRICO DE ENGRENAGENS

Por diversos fatores as superfícies das engrenagens sofrem variações em relação a sua geometria esperada como ideal no ato de sua fabricação. Os desvios, dependendo de suas dimensões, tornam-se de difícil identificação e comprometem a funcionalidade do sistema (Gemaque, 2004). Atualmente, os perfis evolventes dos dentes de engrenagens de precisão são geralmente medidos por centros de medição de engrenagens, na qual os sistemas eletrônicos criam uma evolvente teórica para comparar com o perfil real do dente (Zhifeng, 2011).

Para inspeções desta natureza vem-se utilizando Instrumentos de Medição de Engrenagens numericamente controlados (GMI – Gear Measuring Instruments) e/ou as Máquinas de Medição por Coordenadas (CMM – Coordinate Measuring Machines). Com a utilização destas tecnologias, o tempo e a incerteza de medição podem ser reduzidos significativamente, informações mais detalhadas são disponíveis e a medição é feita automaticamente, sem ser influenciada por uma avaliação subjetiva.

São inúmeras as origens dos erros no processo de fabricação de engrenagens. Podem ser citados: excesso de vibração da máquina-ferramenta, não concordância entre o eixo da engrenagem e o eixo do mandril, erros causados por uma inadequada fixação da ferramenta de corte, falhas de lubrificação no processo de usinagem e deformações térmicas da máquina ferramenta, da ferramenta de corte e da engrenagem sendo fabricada.

Segundo Gemaque (2004), há diversas normas específicas que versam sobre o controle de tolerâncias geométricas de engrenagens. Dentre as normas, destacam – se: ISO 1328 (1997), AGMA 2000-A88 (1988) e DIN 3962 (1978). As principais diferenças entre as normas citadas são: simbologia utilizada para representação dos parâmetros geométricos, definição dos limites de tolerâncias que cada norma abrange e a quantidade de classes disponíveis.

A ISO 1328 - 1/2 aborda as tolerâncias geométricas de engrenagens cilíndricas de dentes retos, apresentando limites para os **parâmetros característicos** da geometria das engrenagens a serem controladas, delimitando para cada tipo de aplicação os erros máximos permissíveis. Esta norma foi utilizada como referência neste trabalho de tese. **Parâmetros característicos** são elementos de controle da geometria das engrenagens.

Os desvios das engrenagens são avaliados para se garantir um funcionamento adequado do par pinhão/corona. A ISO 1328 - 1/2 apresenta um conjunto de tabelas que caracterizam cada um dos desvios e, dependendo da tolerância admitida por projeto, torna-se possível ter um determinado **grau de qualidade**.

2.6.1 Grau de qualidade

Dependendo da norma a ser analisada e aplicada, o grau de qualidade pode sofrer variações. Na ISO 1328 e DIN 3960, sendo esta última referenciada por Brito Neto (2013), os parâmetros característicos possui 13 graus de qualidade, sendo 0 o grau mais exigente e 12 o menos exigente. O diâmetro de referência e módulo de uma engrenagem são os parâmetros de projeto considerados pelas normas para classificação da peça em seu grau de qualidade. Na Tabela 2.1, tem-se exemplo do grau de qualidade para o Desvio Total de Perfil (F_α). Neste caso, para uma engrenagem de módulo 4 mm, 16 dentes e ângulo de pressão 20°, o diâmetro de referência é de 64 mm. Analisando a referida tabela, o Desvio Total de Perfil – F_α varia de 1,7 μm (para o grau de qualidade zero) até 108 μm (para o grau de qualidade 12).

Segundo a ISO 1328, os valores das tolerâncias são determinados empiricamente e equacionados por: $F_\alpha = 3,2\sqrt{m} + 0,22\sqrt{d} + 0,7$.

Tabela 2.1 – Grau de qualidade para o desvio de perfil (ISO 1328)

Diâmetro de Referência d (mm)	Módulo M (mm)	Grau de Qualidade												
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		F_α (µm)												
$50 < d \leq 125$	$0,5 \leq m \leq 2$	1,0	1,5	2,1	2,9	4,1	6,0	8,5	12,0	17,0	23,0	33,0	47,0	66,0
	$2 < m \leq 3,5$	1,4	2,0	2,8	3,9	5,5	8,0	11,0	16,0	22,0	31,0	44,0	63,0	89,0
	$3,5 < m \leq 6$	1,7	2,4	3,4	4,8	6,5	9,5	13,0	19,0	27,0	38,0	54,0	76,0	108,0
	$6 < m \leq 10$	2,0	2,9	4,1	6,0	8,0	12,0	16,0	23,0	33,0	46,0	65,0	92,0	131,0
	$10 < m \leq 16$	2,5	3,5	5,0	7,0	10,0	14,0	20,0	28,0	40,0	55,0	79,0	112,0	159,0
	$16 < m \leq 25$	3,0	4,2	6,0	8,5	12,0	17,0	24,0	34,0	48,0	68,0	96,0	136,0	192,0

Brito Neto (2013) apresenta em seu trabalho um quadro com o tipo de aplicação da engrenagem de acordo com os graus de qualidade. As aplicações podem ser observadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Exemplos de aplicações de engrenagens de acordo com os graus de qualidade

Graus de Qualidade	Aplicações
01	Difícilmente é utilizada, tal a dificuldade para sua obtenção. Foi criada prevendo-se uma utilização futura.
02	Utilizadas em indústrias de precisão (relojoaria e aparelhos de precisão).
03	Utilizadas como padrão em laboratórios de controle. São consideradas engrenagens de precisão.
04	Utiliza-se na fabricação de engrenagens padrão, engrenagens para avião, engrenagem de alta precisão para torres de radar.
05	Utilizadas em aviões, máquinas operatrizes, instrumentos de medidas, turbinas, etc.
06	Utiliza-se em automóveis, ônibus, caminhões, navios, em ponte de alta rotação.
07	Empregadas em veículos, máquinas de levantamento e transporte, etc.
08 e 09	Bastante empregadas, pois não precisam ser retificadas. Utilizadas em máquinas em geral.
10 e 12	Engrenagens mais rústicas, normalmente utilizadas em máquinas agrícolas.

2.6.2 Desvio do perfil evolvente da engrenagem

O desvio de perfil refere-se o quanto o perfil evolvente real obtido do processo de fabricação se afasta do perfil teórico da evolvente gerado a partir da circunferência

de base. De acordo com a ISO 1328, as medições do perfil devem ocorrer no ponto médio da largura do dente, conforme ilustrado na Figura 2.29. Esta mesma figura apresenta o perfil evolvente teórico e real, nas cores azul e vermelha, respectivamente.

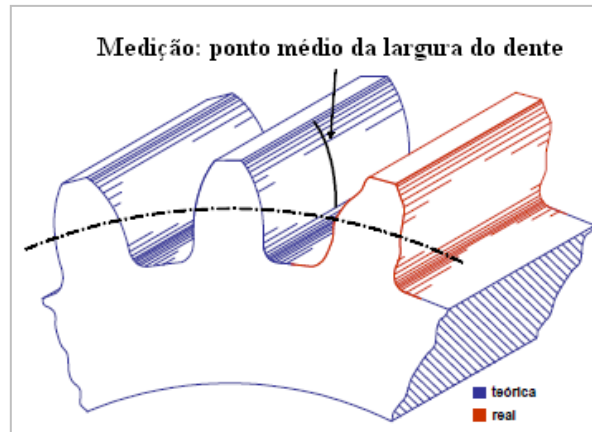


Figura 2.29 – Perfil evolvente

A avaliação do desvio de perfil segundo a ISO 1328-1/2 é caracterizada por três parâmetros, são eles: desvio total de perfil – F_α ; desvio de forma de perfil – f_{fa} ; e o desvio angular de perfil – $f_{H\alpha}$. Para uma avaliação quantitativa, tomando como referência os valores em μm da Tabela 2.1 já apresentada, pode-se fazer o diagrama de Desvio Total de Perfil, que possui intrinsecamente os dois resultados de desvios citados anteriormente, sendo mais conservativo. A Figura 2.30a, 2.30b e 2.30c ilustram, respectivamente o desvio total de perfil, desvio de forma de perfil e o desvio angular de perfil, segundo a ISO 1328.

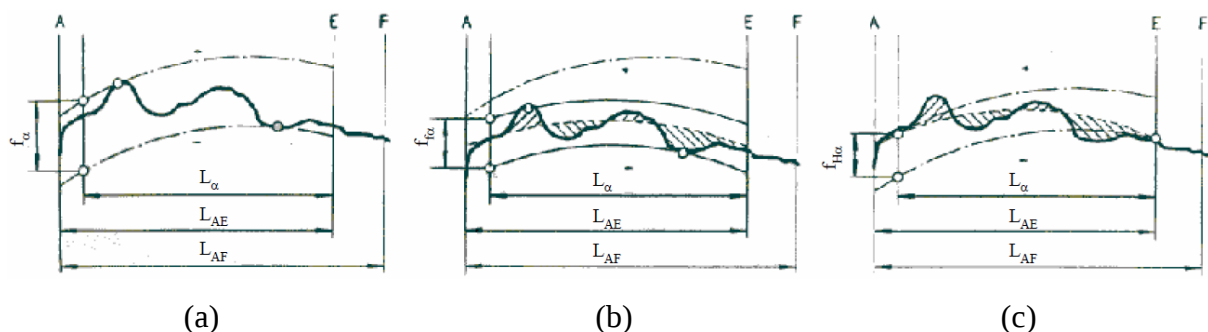


Figura 2.30 – Gráficos ISO 1328 (a) Desvio total de perfil (b) desvio de forma de perfil
(c) desvio angular de perfil

Ao realizar a inspeção do perfil evolvente utilizando uma Máquina de Medição por Coordenadas com sensor *touch trigger*, e considerando somente a região do perfil do dente definida pela norma ISO 1328, após o toque do sensor, têm-se os pontos coordenados, conforme ilustra os pontos de cor verde da Figura 2.31. De acordo com Gemaque (2004) e Lima Jr. (2007), fazendo referência a Figura 2.31, devido às variações do processo de fabricação, deve-se desconsiderar nas medições as regiões 1 e 2, conhecidas como *Fillet* e *Tip Round*, pelo fato das mesmas se afastarem do perfil evolvente. Com os pontos coletados pelo sistema de apalpação, gera-se a linha sinuosa, **curva a**, que corresponde ao perfil real/medido da evolvente. Na **curva b**, tem-se o perfil teórico do dente. Deslocando-se o perfil ideal de tal forma que o mesmo tangencie os pontos medidos o mais próximo e afastado possíveis do dente, os limites superior e inferior, tem-se o Desvio Total de Perfil (F_{α}).

O desvio do perfil ocasiona a variação da reta de ação e, conseqüentemente, variação no ângulo de pressão, implicando em variação das cargas nas superfícies das engrenagens contribuindo para falhas prematuras nas engrenagens.

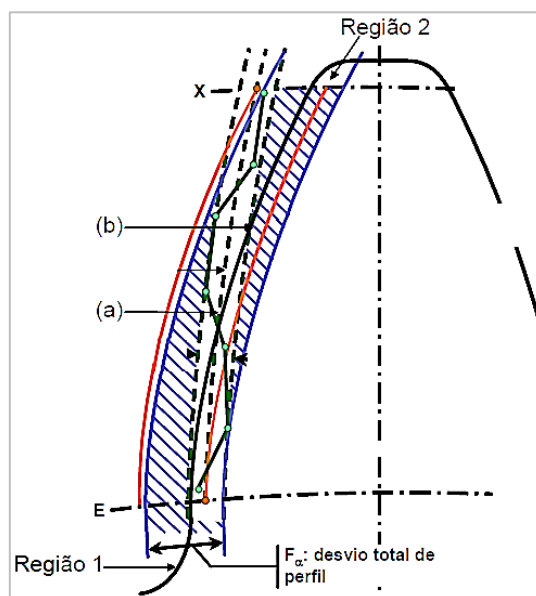


Figura 2.31 – Desvio do perfil evolvente (Adapt. de Gemaque, 2004)

2.6.3 Instrumentos para inspeção de engrenagens

Devido às características e complexidades geométricas das engrenagens, sistemas foram desenvolvidos para realização de sua inspeção, podendo o usuário optar pelo controle de todos os parâmetros da engrenagem em um sistema universal, ou pela

utilização de um sistema de medição específico para cada parâmetro que se deseja controlar. A Figura 2.32 ilustra sistemas dedicados ao controle geométrico de engrenagens. Sistemas e metodologias para inspeção de parâmetros de engrenagens são apresentados por Gao *et al* (2015) e Gadelmawla (2011), no qual os referidos autores utilizam em seus trabalhos, respectivamente: (1) sistema de medição por contato para investigação do desvio de passo em engrenagens cilíndricas de dentes retos, na Figura 2.33a; (2) sistema de medição sem contato do tipo visão de máquina para verificação de parâmetros de engrenagens, na Figura 2.33b.



(a)



(b)



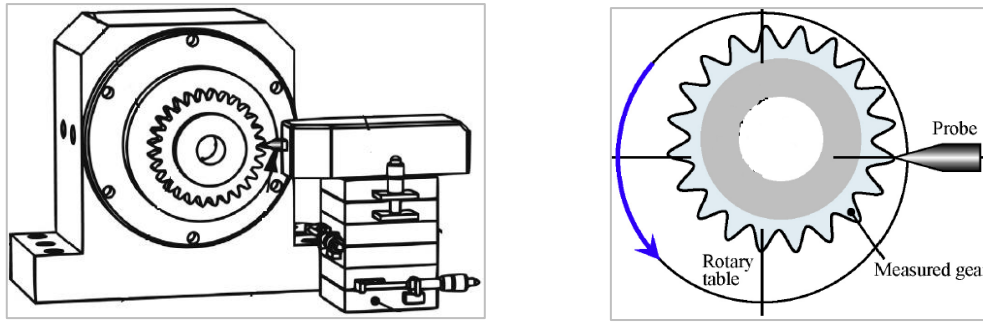
(c)



(d)

Figura 2.32 – (a) Instrumento de medição do passo de base (b) máquina universal de medição de engrenagem (c) micrômetro para medição de diâmetros primitivos (d)

MMC na inspeção do perfil evolvente



(a)



(b)

Figura 2.33 – (a) Sistema de medição para avaliação do desvio de passo (Gao *et al*, 2015) (b) sistema de medição sem contato do tipo visão de máquina (Gadelmawla, 2011)

A seleção do processo de medição de engrenagens depende de alguns fatores como: nível de exatidão requerido, magnitude da tolerância especificada (classe de qualidade à qual a engrenagem pertence), tamanho da engrenagem, número de engrenagens produzidas, nível de automação e informatização desejado e custo da inspeção. Para realização de medições de forma automática destacam-se as MMCs e as máquinas de medição dedicada.

Brito Neto (2003), fez um comparativo da utilização de sistemas dedicados à medição de engrenagens versus as MMCs. Comparar os sistemas dedicados à medição de engrenagens não informatizados e não automatizados com as MMCs é uma tarefa complexa, tendo em vista às grandes diferenças de contexto nos quais estes são aplicados. Aqueles sistemas de medição geralmente são utilizados no controle de pequenos lotes de engrenagens ou na verificação de parâmetros específicos, realizados pelo próprio operador da máquina-ferramenta, para concretização de uma rápida

avaliação da conformidade da característica recém-fabricada. Já o contexto de aplicação das Máquinas de Medição por Coordenadas tem como característica a necessidade do controle de um grande número de peças e, em determinados ambientes, a integração direta do controle metrológico com a produção. Neste caso, a comparação mais coerente seria entre as MMCs e os sistemas universais CNC de medição de engrenagens, devido ao seu nível de informatização e automação, bem como o baixo grau de incerteza de medição e flexibilidade.

Logo, o uso de sistemas dedicados CNC de medição no controle dos modernos processos de fabricação de engrenagens e/ou as MMCs são duas grandes opções para este tipo de tarefa. De acordo com Brito Neto (2003), a principal razão da preferência de MMCs em detrimento aos sistemas CNC dedicados à medição de engrenagens é quando os usuários de tais sistemas de medição não tem uma dedicação constante de inspeção de engrenagens. Pois se o requerimento não está próximo de 100%, corre o risco de não obter o retorno do investimento, devido aos altos custos envolvidos na utilização de sistemas dedicados a medição de engrenagens (Hoover, 2002). Este mesmo autor afirma ainda que não são todas as MMCs que estão em par de igualdades com os sistemas de medição CNC dedicados, mas certamente os modelos que se encontram no topo da linha. Porém, existem MMCs menos sofisticadas que poderão atender satisfatoriamente os requerimentos de um controle metrológico de engrenagens, por exemplo, casos em que as tolerâncias geométricas das engrenagens são mais abertas.

Máquinas menos sofisticadas, citadas no parágrafo anterior, podem ser interpretadas como sendo as Máquinas de Medição por Coordenadas manuais com sensores do tipo *touch trigger* e *software* de medição bastante limitado. Para estas MMCs usadas na inspeção de parâmetros geométricos de engrenagens, torna-se necessário desenvolver estratégias de medição, aliadas a modelos matemáticos, de maneira a orientar o operador qual seria a melhor forma de coletar as informações da superfície da peça.

Segundo Brito Neto (2003), como a medição de engrenagens requer a análise de uma larga quantidade de pontos, o usuário que desejar utilizar uma MMC para o controle geométrico de engrenagens, deverá optar, preferencialmente, por um modelo que tenha a capacidade de realizar *scanning*. No entanto, um dos objetivos específicos deste trabalho de tese é tornar viável o uso de MMCs manuais com apalpador ponto a ponto na inspeção do perfil evolvente de engrenagens cilíndricas de dentes retos, por meio de uma estratégia de medição que defina uma quantidade mínima de pontos

coordenados a serem coletados na superfície da peça. São trabalhos relacionados com o tema e publicados recentemente os de Tolvaly-Rosca *et al* (2015), Zhang *et al* (2015), Haefner *et al* (2015) e Jain e Gupta (2014).

2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentado o conceito das Máquinas de Medição por Coordenadas e algumas configurações destas máquinas disponíveis no mercado. Adicionalmente, abordaram-se as técnicas de medição para inspeção de peças, dando ênfase as medições por contato que utilizam os apalpadores do tipo *touch trigger*. Para este tipo de sensor, apresentou-se um histórico, bem como uma das tecnologias utilizada para geração do sinal de gatilho, o *trigger*. Também foram descritas as principais fontes de incerteza internas e externas ao sistema de medição. Por fim, foi realizada uma abordagem referente às engrenagens cilíndricas de dentes retos, com foco na geração e inspeção do perfil evolvente, controle geométrico e instrumentos para inspeção. Ainda nesse contexto foi apresentada parte da norma ISO 1328, que trata do grau de qualidade dos parâmetros geométricos das engrenagens. O corrente capítulo será de fundamental importância para execução dos procedimentos experimentais desenvolvidos nesta tese.

CAPÍTULO III

NON UNIFORM RATIONAL B-SPLINE - NURBS: CURVAS E SUPERFÍCIES

3.1 INTRODUÇÃO

Non Uniform Rational B-Spline, comumente conhecida como **NURBS**, tem se tornado um padrão na indústria para representação, concepção e troca de informações geométricas processadas por computadores. As excelentes propriedades matemáticas e algorítmicas, combinadas com aplicações industriais bem sucedidas têm contribuído para a enorme popularidade da **NURBS** (Piegl e Tiller, 1997). Muitos padrões nacionais e internacionais, por exemplo: IGES, STEPS e PHIGS reconhece **NURBS** como uma poderosa ferramenta para desenho geométrico. A literatura escassa e dispersa, e a disponibilidade de *papers* abordando apenas a matemática das *Splines*, que é complexa e requer uma compreensão detalhada, motivou Piegl e Tiller (1997) para elaboração e publicação do **The NURBS Book**.

As funções **NURBS** permitem adaptar curvas e superfícies polinomiais tanto para a representação de forma livre como para as formas geométricas comuns. Isso se logra pela manipulação dos graus de liberdade que tem tais funções em sua formulação matemática. Essa manipulação permite um controle de aproximação local por meio dos pesos w_i e pontos de controle. Segundo Pizo (2009), para aperfeiçoar a aproximação mediante curvas e superfícies **NURBS**, deve-se modificar seus graus de liberdade a fim de minimizar a distância entre a representação paramétrica e o conjunto de dados.

Nas próximas seções será apresentada uma fundamentação teórica das curvas e superfícies **NURBS**, como: funções base e curva *B-Spline*, geração das curvas **NURBS**, o significado geométrico dos pesos (w_i) e, por fim, a definição das superfícies **NURBS**. Pesquisas relevantes também serão descritas neste capítulo.

3.2 NURBS: CURVAS E SUPERFÍCIES

Para representação gráfica de curvas e superfícies de formas livres e/ou complexas, muitas são as áreas de pesquisas, no sentido de reproduzir de maneira fiel o objeto que está sendo inspecionado. Considera-se curva e superfície complexas, o formato apresentado pela peça, em que esta não tem as características de geometrias conhecidas dentro da análise matemática, e sim definidas por pontos de controle através de técnicas Bézier, *B-Spline*, *NURBS*, etc. (Li e Gu, 2004). Segundo Soni *et al* (2009), as tecnologias para tal representação são bastante utilizadas pela engenharia reversa, que tem como principal objetivo produzir um modelo digital preciso em um ambiente virtual para posterior utilização em sistemas CAD/CAM.

Dentre algumas vantagens de se trabalhar com a ferramenta *NURBS*, um dos benefícios que levaram a sua popularização foi o fato desta oferecer liberdade extra por meio de um dos seus parâmetros, os pesos - w_i , em que estes podem ser utilizados para gerar uma grande variedade de formas (Hong (2016) - *Department of Mechanical Engineering; State University of New York*). Explorar o uso significativo dos pesos - w_i é uma das questões mais interessantes e importantes neste domínio. Pesquisas têm sido realizadas com tal finalidade.

3.2.1 Definição das curvas *NURBS*

Uma importante ferramenta para modelagem de curvas durante a aquisição de dados em um processo de inspeção ou engenharia reversa é utilizando *NURBS*. Embora as curvas *B-Splines* sejam bastante utilizadas em projetos e apresente muitas propriedades úteis, elas não conseguem representar curvas de formatos simples (Andreza *et al*, 2011). Portanto, para representar círculos, elipse, etc., é necessária uma extensão destas curvas. Neste caso, para solucionar tal problema, se faz necessário generalizar as *B-Splines* para curvas racionais usando coordenadas homogêneas, no qual se determina as *B-Splines* Racionais Não-Uniforme (Silva, 2011). De acordo com Minetto (2003), as *B-Splines* são curvas paramétricas polinomiais. As formas geométricas citadas anteriormente devem ser representadas com funções racionais, ou seja, funções que são quocientes de dois polinômios. Para compreender bem as curvas *NURBS*, torna-se necessário um bom entendimento da curva e funções *B-Splines*. Estas últimas serão foco do próximo item.

3.2.1.1 Funções base e curva *B-Spline*

Para desenhar uma curva *B-spline* de grau p são necessárias algumas informações: um conjunto de $n + 1$ pontos de controle $P_0, P_1, \dots, P_n$, e um vetor de nós $u = \{u_0, u_1, \dots, u_m\}$, de modo que todos os segmentos de curva sejam unidos, satisfazendo certa condição de continuidade. Neste caso a curva é definida de acordo com a Equação 3.1. Detalhes do assunto são encontrados nas seguintes referências: Minetto (2003); Pizo (2009); Silva (2011) e Ferreira (2011).

$$P(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) P_i \quad (3.1)$$

Na Equação 3.1 $N_{i,p}(u)$ são as funções base *B-Splines* e P_i os pontos de controle. Dentre os diversos métodos para definir uma função *B-Spline*, o método de recorrência de Cox-deBoor é muito útil para implementação computacional. Como definido em Piegel e Tiller (1997), a i -ésima função de base *B-Spline* de grau p , denotado por $N_{i,p}(u)$, é definida de acordo com as Equações 3.2 e 3.3:

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & \text{se } u_i \leq u < u_{i+1} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.2)$$

$$N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u) \quad (3.3)$$

Pode-se observar na Equação 3.2 que o grau da função é zero. Sendo assim, $N_{i,0}(u)$ é conhecida na literatura como *função passo*, na qual terá sempre valor nulo, exceto no intervalo aberto $[u_i, u_{i+1})$. Para funções com p maior que zero é utilizada a Equação 3.3. Para compreender o modo de computar $N_{i,p}(u)$ esta última função ($p > 0$), pode-se usar o esquema de computação triangular, ilustrado na Figura 3.1, em que é possível observar os períodos de nó na primeira coluna à esquerda. O esquema apresentado na Figura 3.1 é conhecido por alguns autores como tabela triangular truncada.

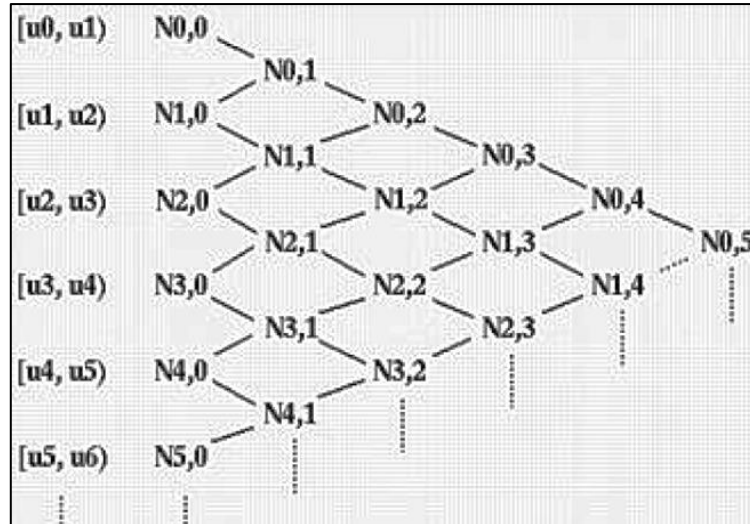


Figura 3.1 – Diagrama do esquema de computação triangular (Minetto, 2003)

Neste sentido, observa-se que para computar $N_{i,1}(u)$, $N_{i,0}(u)$ e $N_{i+1,0}(u)$ são exigidos; ou seja, é preciso se concentrar no significado dos coeficientes na definição de $N_{i,p}(u)$. Quando $N_{i,p}(u)$ está sendo computado, usa $N_{i,p-1}(u)$ e $N_{i+1,p-1}(u)$. As Figuras 3.2a, 3.2b e 3.2c ilustram exemplos de funções base *B-spline* de grau zero, um e dois, respectivamente.

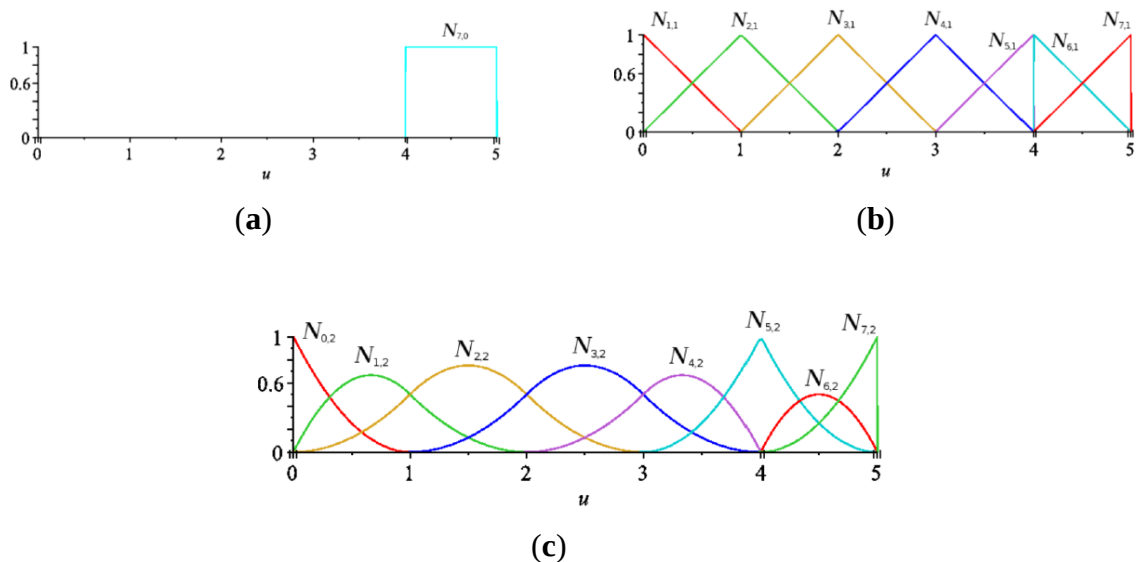


Figura 3.2 – Funções base *B-spline* (a) grau zero (b) grau um (c) grau 2

A distribuição do vetor paramétrico de nós que gera as funções-base tem grande influência no processo de aproximação das *B-Splines*. Para se trabalhar com curvas semi-fechada Figura 3.3, os primeiros e últimos nós devem ter multiplicidade $p_{\text{grau}} + 1$,

seguir uma sequência não decrescente de números reais em que $u_i \leq u_{i+1}$, como apresentado na Equação 3.4 e satisfazer: $m = n + p + 1$. Outras configurações de curvas podem ser geradas de acordo com a estrutura do vetor u .

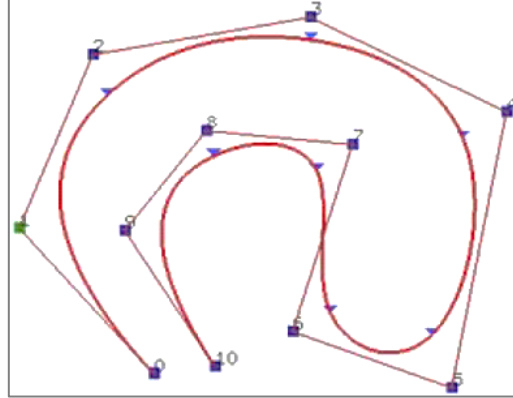


Figura 3.3 – Curva *B-Spline* semi-fechada

$$u = \left\{ \underbrace{a, \dots, a}_{p+1}, u_{p+1}, \dots, u_{m-p-1}, \underbrace{b, \dots, b}_{p+1} \right\} \quad (3.4)$$

São duas as propriedades importantes que determinam as características geométricas desejáveis para este projeto, sobre a curva descrita:

1. A curva *B-Spline* $P(u)$ é uma curva formada por segmentos, com cada componente uma curva de grau p .
2. O esquema de suporte local: modificando a posição do ponto de controle p_i , a curva $P(u)$ somente será afetada no intervalo $[u_i, u_{i+p+1})$.

As propriedades apresentadas acima auxiliam na determinação de estratégias de medições da curva envolvente das engrenagens cilíndricas de dentes retos, pois alterações em pontos determinados afetam apenas os vizinhos mais próximos.

Lerios (2001), cita que para mudar a forma de uma curva *B-spline*, pode-se modificar um ou mais destes parâmetros de controle: as posições de pontos de controle, as posições de nós e o grau da curva. Autores afirmam que modificando a posição de nó não é previsível nem satisfatório, pois não fica claro como a forma da curva responderá a mudança do vetor. Esses estudos são de extrema importância quando se deseja alterar a curva a partir de uma determinada quantidade de pontos de controle, no sentido de diminuir o erro entre os pontos de controle, simulados ou coletados a partir de uma

MMC, e seus correspondentes na curva. Na curva *NURBS* surge mais um parâmetro capaz de mudar sua forma, os pesos w_i . No tópico a seguir serão apresentados os passos para atingir a fórmula desta curva.

3.2.1.2 Curvas *NURBS*

As *NURBS* surgiram a partir dos trabalhos pioneiros de *Pierre Bézier*, na *Renaut*, sobre curvas e superfícies, entre os anos de 1960 a 1970. A popularidade desta ferramenta em sistemas CAD e computação gráfica tem levado o método a uma grande quantidade de pesquisas e aplicações.

Antes da existência dos computadores, profissionais como engenheiros, arquitetos, etc., desempenhavam seus trabalhos com ferramentas de trabalho convencionais, porém existia um problema crítico na construção naval. Os projetos de navios precisavam ser desenhados em tamanho natural e, neste caso, o desenho à mão de curvas era quase impossível, por mais que o profissional fosse qualificado. Como solução para esta tarefa, empregava-se tiras longas de madeira, chamada *spline*. De acordo com o desenho, a *spline* era fixada em determinados pontos com elementos chamados de pesos, como ilustrado na Figura 3.4. Tais curvas eram lisas e a curvatura dependia da posição dos pesos. Como computadores foram introduzidos no processo de projeto, as propriedades físicas da *spline* foram investigadas de forma que elas pudessem ser matematicamente modeladas (Deboor, 1978).



Figura 3.4 – Ajuste dos pesos sob uma *Spline*

Reis *apud* Félix *et al* (2012), afirma que as *NURBS* são curvas que podem ou não passar pelos pontos de controle final e inicial, podendo-se aproximar dos demais

pontos de controle e matematicamente descrita pelo quociente entre polinômios. As *NURBS* contam com todas as propriedades derivadas da *B-Splines* e apresentam uma capacidade de aproximação local maior. Isso é observado ao modificar-se o peso w_i , que está associado ao ponto de controle P_i , em uma curva *NURBS*.

Dentre os pesquisadores que apresentam o referido assunto, Minetto (2003) e Murarolli (2012) fazem um estudo detalhado e direcionado para os conceitos matemáticos da *NURBS*. Neste caso, com base nos autores supracitados, será demonstrada a maneira de como atingir a fórmula das *Non-Uniform Rational B-Splines*, a partir da equação da curva *B-spline*.

Como demonstrado na seção 3.2.1.1, para construção de uma curva *B-Spline* de grau p é necessário um conjunto de pontos de controle e um vetor de nós, sendo estes utilizados nas funções base *B-spline*, apresentadas nas Equações 3.2 e 3.3. Introduzindo o conceito de coordenadas homogêneas naquela curva, se faz necessário escrever o ponto de controle P_i como um vetor coluna com quatro componentes, sendo o último componente igual a 1, conforme apresentado na Equação 3.5.

$$P_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Para coordenadas homogêneas é possível multiplicar as coordenadas do ponto de controle $P_i (x_i, y_i, z_i, 1)$ por um número não nulo, pois este produto não muda a posição do ponto. Então, pode-se multiplicar P_i com w_i para obter uma nova forma de coordenadas homogêneas, como demonstrado na Equação 3.6.

$$P_i = \begin{bmatrix} w_i x_i \\ w_i y_i \\ w_i z_i \\ w_i \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Substituindo a Equação 3.6 na Equação 3.1, tem-se a Equação 3.7, na qual $Q(u)$ está na forma de coordenadas homogêneas.

$$Q(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) \begin{bmatrix} w_i x_i \\ w_i y_i \\ w_i z_i \\ w_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) w_i x_i \\ \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) w_i y_i \\ \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) w_i z_i \\ \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) w_i \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Convertendo a fórmula da Equação 3.7 para coordenada cartesiana tem-se a Equação 3.8. Para isso, basta dividir $Q(u)$ pelo quarto componente.

$$Q(u) = \frac{\begin{bmatrix} \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) (w_i x_i) \\ \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) (w_i y_i) \\ \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) (w_i z_i) \\ \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) w_i \end{bmatrix}}{1} = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) w_i}{\sum_{i=0}^n N_{j,p}(u) w_j} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

E então se atinge a Equação 3.9, referente à curva NURBS.

$$Q(u) = \frac{1}{\sum_{i=0}^n N_{j,p}(u) w_i} \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) w_i P_i \quad (3.9)$$

Piegl e Tiller (1997) representam a Equação 3.9 na forma equivalente demonstrada na Equação 3.10.

$$Q(u) = \sum_{i=0}^n R_{i,p}(u) P_i \quad (3.10)$$

Sendo $R_{i,p}(u)$ definida de acordo com a Equação 3.11.

$$R_{i,p}(u) = \frac{N_{i,p}(u) w_i}{\sum_{j=0}^n N_{j,p}(u) w_j} \quad (3.11)$$

De acordo com a Equação 3.9, a curva *NURBS* é definida por:

- Pontos de controle: $P_0, P_1, \dots, P_n$;
- Vetor de nós u : $u_0, u_1, \dots, u_m$;
- Pesos: $w_0, w_1, \dots, w_n$;

Em que, ainda na Equação 3.11, $N_{i,p}(u)$ são as funções base *B-spline* já apresentadas. Como demonstrado, pesos (w_i) e pontos de controle (P_i) são associados, pois aqueles configuram o quarto componente dos pontos coordenados. Sendo assim, o vetor de pontos de controle e pesos deve ter a mesma ordem.

Geralmente os pesos w_i são positivos. Se um peso w_i torna-se zero, o coeficiente de P_i é zero, e conseqüentemente o ponto de controle P_i não tem nenhum impacto na computação de $Q(u)$ para qualquer u , isto é, P_i é desabilitado (Minetto *apud* *NURBS Curves and Surfaces*, 2003). A Figura 3.5 apresenta o resultado quando se atribui o valor zero ao peso do ponto P_9 .

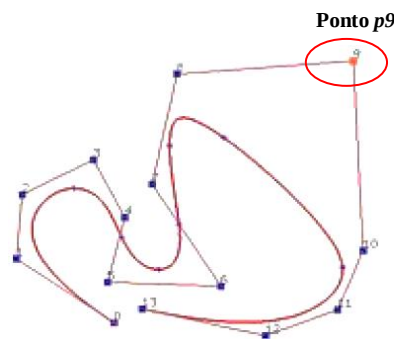


Figura 3.5 – Peso nulo para o ponto p_9 da curva NURBS

Além de herdar as propriedades das curvas *B-splines*, como por exemplo, a edição de pontos de controle localmente, pode-se alterar os pesos da função, o que implica uma nova ferramenta para modelagem de curvas (Vieira, 2005). A alteração deste parâmetro também é foco deste trabalho de tese.

3.2.2 Pesos (w_i) nas Curvas NURBS

A primeira investigação dos efeitos dos pesos (w_i) nas curvas NURBS foi realizada na tese de doutorado de Versprille, em 1975. A partir desta, várias outras pesquisas vêm sendo desenvolvidas. Purwar *apud* Piegl (1986) explorou o significado geométrico dos pesos. Puwar *apud* Au e Yuen (1995) introduziram uma abordagem mais ampla, na qual conseguem modificar a forma da curva NURBS alterando os pesos e localização dos pontos de controle, simultaneamente. Pizo (2009) apresenta o efeito da

modificação do peso w_i associado ao ponto de controle P_i , no qual somente afeta a curva no intervalo $[u_i, u_{i+p_{\text{grau}}+1})$.

3.2.2.1 Significado geométrico dos pesos

De acordo com o descrito na seção 3.2.1.2, já existe uma ideia básica dos efeitos dos pesos no modelo digital de uma determinada peça. Qualitativamente, acrescentando/diminuindo o valor de w_i , será acrescentado/diminuído o valor de $R_{i,p}(u)$, demonstrado na Equação 3.11. Mais precisamente, incrementando o valor de w_i , a curva será puxada em direção ao ponto de controle P_i . De fato, todos os pontos afetados na curva também serão puxados em direção ao referido ponto coordenado. Quando w_i tende ao infinito, a curva passará pelo ponto de controle. Por outro lado, diminuindo este parâmetro a curva se afastará do ponto P_i .

Para exemplificar o que foi descrito, as Figuras 3.6a e 3.6b ilustram, respectivamente, o formato de uma curva *NURBS* de grau 6 juntamente com suas funções base *B-Spline*, para valores de pesos iguais a 1. Neste caso demonstrativo, será analisado o ponto P_9 . Com o aumento de w_9 para 10, a função *B-Spline* correspondente $R_{9,6}(u)$ torna-se maior, ilustrada na Figura 3.7b, e a curva é levada em direção ao ponto de controle P_9 , ilustrada na Figura 3.7a. Com a diminuição de w_9 para 0,5, a função base correspondente torna-se menor, apresentada na Figura 3.8b, e a curva é empurrada para longe do ponto P_9 , observada na Figura 3.8a.

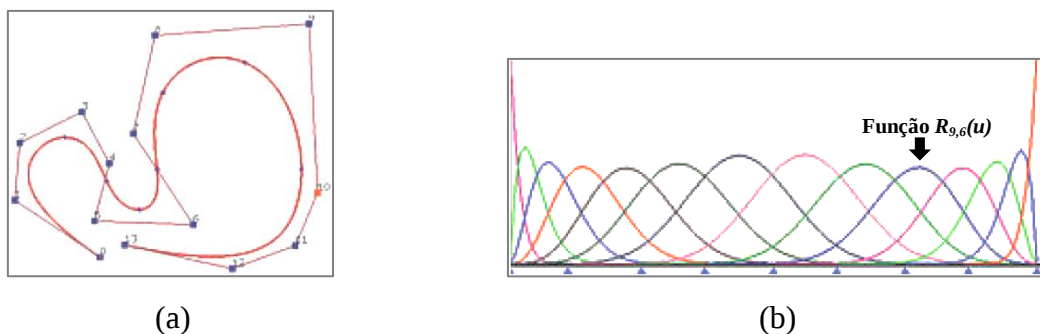


Figura 3.6 – Valores de pesos iguais a 1 (a) curva *NURBS* (b) funções base *B-splines*

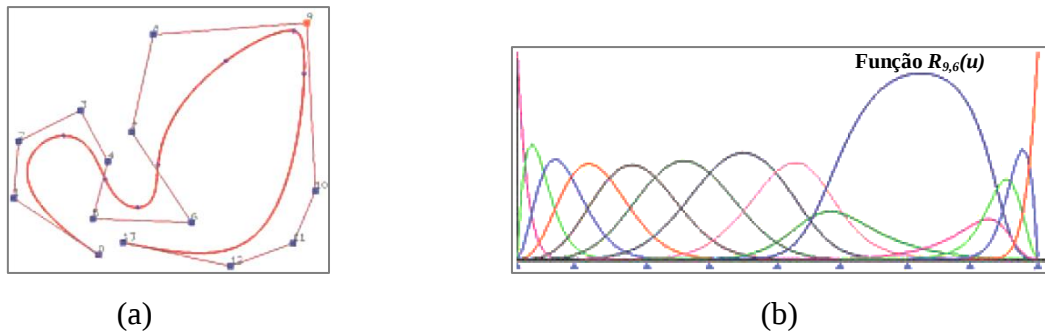


Figura 3.7 – Valor do peso w_9 igual a 10 (a) curva *NURBS* (b) funções *B-splines*

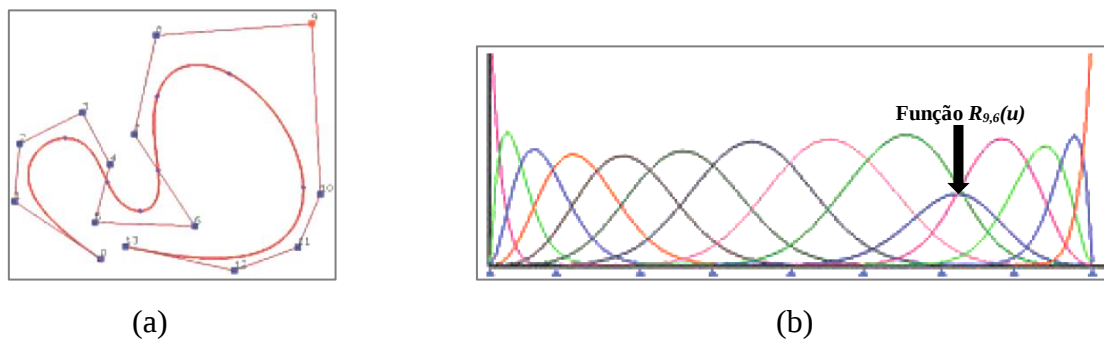


Figura 3.8 – Valor do peso w_9 igual a 0.5 (a) curva *NURBS* (b) funções *B-splines*

Apesar das superfícies *NURBS* não serem utilizadas como aplicação neste trabalho de tese, será apresentado de maneira sucinta tal fundamentação no item que segue, como fonte registro bibliográfico para consultas posteriores. A representação de superfícies é bastante semelhante a representação paramétrica das curvas *NURBS*.

3.2.3 Definição das superfícies *NURBS*

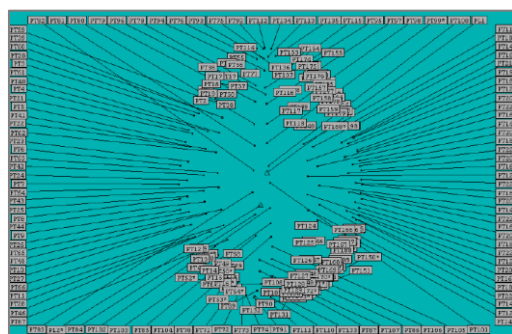
O desenvolvimento de *softwares* de modelagens utilizando *NURBS* possibilita a criação de superfícies com boa definição, e pode ser considerada na criação de novos produtos. Esta técnica é bastante aplicada na modelagem de carros, navios e aviões. Aprimoramento e desenvolvimento de algoritmos de superfícies *NURBS* torna-se cada vez mais recente. Elsaesser (1998) descreveu um método para aproximar a superfície *NURBS* a pontos digitalizados, na qual consistia numa técnica de otimização que modifica a posição dos pontos de controle. O referido autor também fez tentativas de otimização alterando o vetor paramétrico de nós.

Silva *et al* (2011) desenvolveu uma metodologia para modelagem de um capacete para ciclismo, utilizando *NURBS*. O procedimento experimental deste trabalho

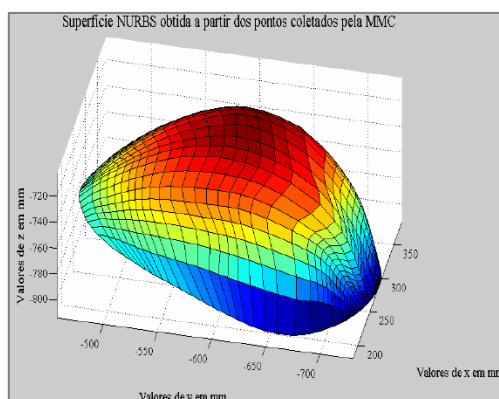
consistiu na obtenção dos pontos coordenados da superfície do capacete utilizando uma Máquina de Medição por Coordenadas automática. As medições iniciais foram realizadas manualmente com o auxílio de um *joystick* para determinação do sistema de coordenadas e, posteriormente, realizada de maneira automática. Erros entre a superfície modelada e pontos coordenados foram calculados. As Figuras 3.9a, 3.9b e 3.9c ilustram, respectivamente: o capacete inspecionado, os pontos obtidos pela MMC automática e a superfície do capacete utilizando *NURBS*.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.9 – Procedimentos para modelagem de superfície do capacete (a) capacete inspecionado (b) pontos coordenados obtidos pela MMC (c) superfície *NURBS* do capacete (Silva, 2011)

A expressão geral para representação da superfície *NURBS* é dada pela Equação 3.12. De acordo com Piegl e Tiller (1997), uma superfície *NURBS* de grau p na direção u e grau q na direção v são definidos por meio de um conjunto de pontos de controle P_{ij} , os pesos correspondentes w_{ij} e as funções base *B-Spline* $N_{i,p}(u)$ e $N_{j,q}(v)$, sendo estas

últimas definidas pelos valores contidos nos vetores de nós apresentados nas Equações 3.13 e 3.14.

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{i,j} P_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{i,j}} \quad (3.12)$$

$$U = \left\{ \underbrace{0, \dots, 0}_{p+1}, u_{p+1}, \dots, u_{r-p-1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{p+1} \right\} \quad (3.13)$$

$$V = \left\{ \underbrace{0, \dots, 0}_{q+1}, u_{q+1}, \dots, u_{s-q-1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{q+1} \right\} \quad (3.14)$$

Os valores de r e s são definidos, respectivamente, por: $r = n + p + 1$ e $s = m + q + 1$. Semelhante ao que foi descrito nas curvas *NURBS*, a Equação 3.12 também pode ser representada na sua forma equivalente, conforme Equação 3.15.

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m R_{i,p}(u, v) P_{i,j} \quad (3.15)$$

Sendo $R_{i,p}(u, v)$ definida de acordo com a Equação 3.16.

$$R_{i,j}(u, v) = \frac{N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{i,j}}{\sum_{k=0}^n \sum_{l=0}^m N_{k,p}(u) N_{l,q}(v) w_{k,l}} \quad (3.16)$$

3.3 ESTUDOS QUE CONTEMPLAM AS CURVAS E SUPERFÍCIES *NURBS*

Os estudos e publicações de modelagem geométrica de curvas e superfícies utilizando a ferramenta *NURBS* têm crescido bastante nos últimos anos. Inicialmente utilizada na área da computação gráfica, esta ferramenta vem ganhando espaço na engenharia, principalmente em projetos de engenharia reversa, nas indústrias manufatureiras e de processo, medicina, artes, etc.

Minetto (2003) publicou um trabalho com o objetivo primordial concentrado nas curvas *NURBS*. Este foi direcionado para os conceitos matemáticos da *NURBS*, em que foi utilizado uma ferramenta conhecida como DesignMentor com a finalidade de testar os algoritmos desse conceito. Ainda neste trabalho o autor afirma que para mudar a forma da curva *NURBS* é necessário modificar alguns parâmetros da mesma, como por exemplo: as posições de pontos de controle, as posições de nós, o grau da curva e/ou os pesos w_i . Hong (2016), pela Universidade Estadual de Nova York, *Stony Brook*, publicou um artigo que disserta sobre o efeito dos pesos nas curvas e superfícies *NURBS*. A alteração deste último parâmetro pode auxiliar no modelamento geométrico, um dos objetivos deste trabalho de doutorado. Uma abordagem mais avançada do conteúdo é dada por Piegl e Tiller (1997).

Os pesquisadores Hughes *et al* (2007) do Departamento de Ciências da Computação e do Instituto de Engenharia Computacional da Universidade do Texas, em Austin, EUA, utilizaram o modelamento *NURBS* para, a partir de dados de imagens de tomografia computadorizada ou ressonância magnética, construir modelos vasculares para análise do fluxo sanguíneo de pacientes específicos. Médicos, fazendo o uso desta ferramenta computacional, avaliam o modelo fisiológico/anatômico para predizer o plano de tratamento do paciente. As imagens dos exames citados são tratadas computacionalmente no sentido de eliminar os componentes desnecessários ao estudo. A Figura 3.10 apresenta o refinamento de um modelo da região abdominal, até alcançar o sólido *NURBS*.

Piratelli Filho (2009), apresentou uma metodologia para construção de modelos de Projeto Auxiliado por Computador (CAD) de peças de grande porte e geometria complexa, como por exemplo, as pás de turbinas hidráulicas de 4,3 m. O referido trabalho foi desenvolvido aplicando técnicas de engenharia reversa e modelagem com *B-Splines* Racionais não Uniformes (*NURBS*). As pás das turbinas foram inspecionadas utilizando Máquinas de Medir por Coordenadas modelo braço articulado (CMA) com sonda rígida por contato. As Figuras 3.11a e 3.11b ilustram, respectivamente, as linhas que definem a sequência de medição e inspeção da turbina utilizando o CMA.

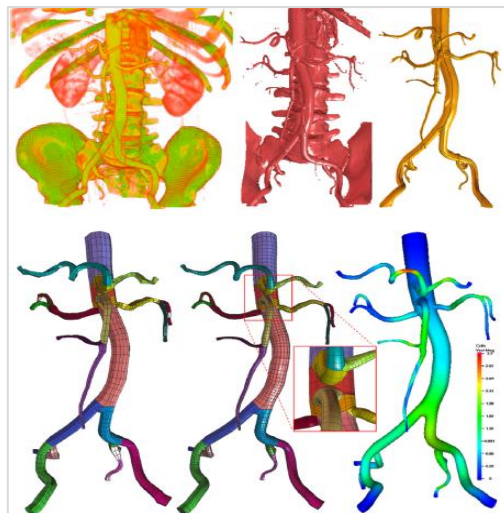
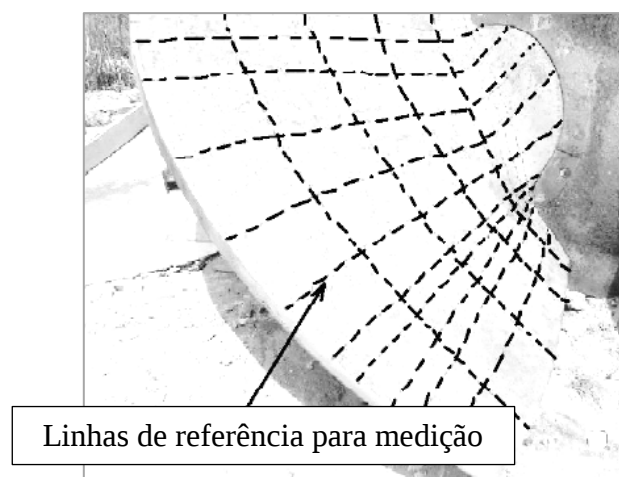
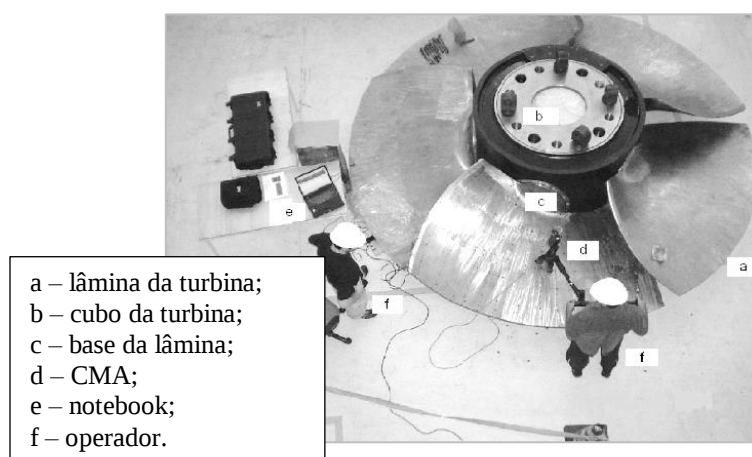


Figura 3.10 – Refinamento do modelo da região abdominal de um paciente e sua representação utilizando a ferramenta *NURBS* (Hughes *et al*, 2007)



(a)



(b)

Figura 3.11 – (a) Linhas que definem a sequência de medição da turbina (b) operação de inspeção da turbina utilizando o CMA (Piratelli Filho, 2009)

A integração entre sistemas CAD e CAM é muito comum, principalmente quando se trabalha na área de inspeção e engenharia reversa. Werner (1998) *et al* e Kerstens e Kruth (1998), afirmam que o processo de engenharia reversa é realizado em quatro etapas, são eles: a medição dos pontos coordenados, para identificação do objeto; a aproximação da superfície, que consiste na representação geométrica do objeto, utilizando uma técnica de modelagem; sistema CAD/CAM, para o fornecimento da documentação técnica e programação no Comando Numérico (CN); e processo de usinagem, para fabricação das peças. Os autores citados utilizaram em seus trabalhos as MMCs para coleta dos pontos de controle e a *NURBS* como técnica de modelagem.

Pesquisadores como Emami e Arezoo (2010), empregam *NURBS* para a realização da trajetória da ferramenta de máquinas CNC (Comando Numérico Computadorizado). Segundo os autores, a *NURBS* foi escolhida porque é uma curva que oferece grande flexibilidade geométrica. Lin *et al* (2008), propuseram um estudo para desenvolver uma técnica para converter arquivos CN em linhas e segmentos *NURBS* e com isso melhorar tanto a exatidão quanto a eficiência do sistema. Neste trabalho foi possível verificar que quanto maior a quantidade de pontos de controle, mais linhas de programação são necessárias no código do CN. Além disso, na conversão do código Comando Numérico para o código *NURBS* correspondente, tem-se que este último necessita de uma quantidade bem menor de linhas de programação, quando comparado com aquele e, conseqüentemente, um menor tempo no processo de usinagem da peça. A Figura 3.12 apresenta os códigos *NURBS* e Comando Numérico, referente a uma determinada trajetória, na qual é possível perceber uma redução significativa da quantidade de linhas de programação no código *NURBS*.

Procedimentos experimentais de inspeção que utilizam MMCs e sensores de escaneamento a laser são capazes de coletar uma infinidade de pontos coordenados para geração digital do modelo. García-Hernández (2013), afirma que após o processo de digitalização de um perfil ou uma superfície, uma grande quantidade de pontos de controle fica disponível, mas nem todos eles são igualmente importantes: mais pontos coordenados são necessários em zonas onde a curvatura é maior. Neste sentido, o autor citado anteriormente apresenta um método de seleção de pontos coordenados que tem como base o erro máximo permitido. Este método seleciona os pontos coordenados mais importantes na reconstrução do modelo, visando um menor tempo de usinagem.

Código NURBS	
G06.2 P04 K0.0 X-91.547 Y10.104 Z-23.463	
K0.0 X-91.209 Z-23.460	
K0.0 X-90.538 Z-23.533	
K0.0 X-89.245 Z-23.931	
K0.125 X-87.247 Z-23.320	
K0.250 X-86.495 Z-27.302	
K0.500 X-86.539 Z-28.676	
K1.0	
K1.0	
K1.0	
K1.0	

Código CN	Continuação do código CN
G01X-91.547Y10.104Z-23.463	CN
X-91.544Z-23.463	=
X-91.469Z-23.464	=
X-91.261Z-23.471	=
X-91.052Z-23.487	
X-90.844Z-23.512	
X-90.636Z-23.546	
X-90.427Z-23.589	
X-90.219Z-23.641	
X-90.011Z-23.703	
X-89.802Z-23.775	
X-89.594Z-23.857	
X-89.49Z-23.903	
X-89.386Z-23.951	
X-89.177Z-24.057	
=	
=	
=	
	X-86.781Z-26.927
	X-86.729Z-27.099
	X-86.703Z-27.194
	X-86.677Z-27.298
	X-86.625Z-27.542
	X-86.599Z-27.693
	X-86.573Z-27.885
	X-86.56Z-28.01
	X-86.547Z-28.188
	X-86.540Z-28.413
	X-86.539Z-28.676

Figura 3.12 – Comparação da quantidade de linhas de código *NURBS* versus CN para geração de uma determinada trajetória

A utilização de Máquinas de Medição por Coordenadas para inspeção de engrenagens está se tornando cada vez mais útil nos sistemas de manufatura modernos. Cheng *et al* (2004), publicou um trabalho que tem como título: *investigação da otimização do tamanho amostral na medição de superfícies do dente da engrenagem usando uma MMC*. Este autor afirma que um dos principais problemas para inspeção de engrenagens utilizando o sensor por contato de uma MMC se encontra na técnica/metodologia de aquisição dos pontos. O número mínimo de pontos medidos para superfícies dos dentes em 3D são derivados de alguns fatores, como por exemplo, a especificação de tolerância em projeto e a variabilidade do processo de manufatura. Se elevada precisão é requerida, mais pontos precisam ser inspecionados.

O trabalho desenvolvido por Silva (2011) apresentou uma metodologia para modelagem de um perfil evolvente de engrenagens cilíndricas de dentes retos. Este autor afirma ainda que as indústrias que fabricam engrenagens necessitam de equipamentos capazes de medir o perfil evolvente com elevada exatidão. O referido perfil é um dos parâmetros característicos que necessitam de um controle geométrico. Gemaque (2004) define o desvio de perfil como sendo o afastamento do perfil evolvente real obtido do processo de fabricação do perfil ideal gerado a partir da respectiva circunferência de base. De acordo com Mazzo (2013), a evolvente é o elemento ativo do dente na transmissão, portanto, o elemento principal. É esse elemento que determina a qualidade do dentado, em virtude de sua precisão, que, por sua vez, afeta sensivelmente a vida útil da roda. Esta qualidade indica com exatidão o processo de fabricação adequado para a geração e acabamento da evolvente. Estas são apenas algumas razões e trabalhos que justificam a importância desse elemento no estudo do dente.

Silva *apud* Piratelli Filho e Mota (2011) analisou o desempenho de método de recuperação de modelos CAD baseados na medição utilizando Máquina de Medição por Coordenadas modelo braço articulado com sonda de contato ponto a ponto e modelagem *NURBS* aplicado a superfícies de formas livres de dimensões reduzidas, como mostra a Figura 3.13.

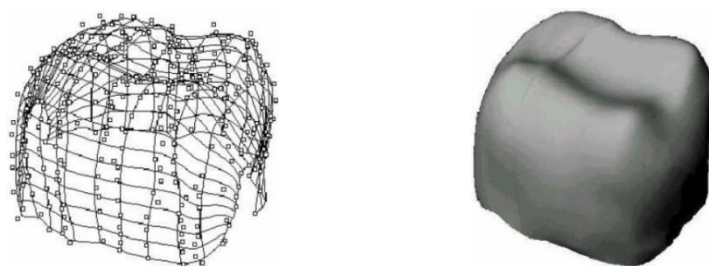
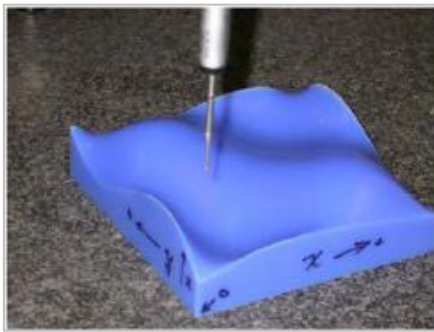


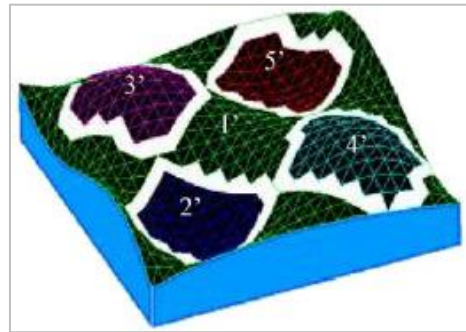
Figura 3.13 – Pontos coordenados apalpados e a superfície *NURBS* resultante (Silva *apud* Piratelli Filho e Mota, 2011)

Li e Gu (2005) publicaram um artigo que aborda metodologias para inspeção de superfícies de peças de formas livres utilizando *NURBS*, Figura 3.14a e 3.14b. Os autores afirmam que formas livres são amplamente utilizadas em muitas áreas que vão desde a concepção e fabricação de modelos, matrizes e padrões, nas indústrias automotivas e aeroespaciais, a área de biomédica e entretenimento. Apesar de técnicas de inspeção e equipamentos de medição para peças de características geométricas

regulares têm sido avançadas nos últimos anos e está normalmente na indústria, à inspeção de peças fabricadas com superfície de forma livre não tem sido bem estudada.



(a)



(b)

Figura 3.14 – (a) Medição dos pontos coordenados usando MMC (c) Superfície NURBS

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados os fundamentos teóricos da ferramenta matemática que auxilia no desenvolvimento deste trabalho de tese. Primeiramente com as definições das Funções Base e curvas *B-splines*, deu-se início aos estudos das Curvas *Non Uniform Rational B-Splines*, com a introdução do conceito de coordenadas homogêneas. Analisou-se também a influência do parâmetro peso (w_i) nas funções *NURBS*. Por fim foi apresentado como fundamento base e motivação para o presente estudo, pesquisas com aplicações daquela ferramenta matemática na área de engenharia e outras áreas.

CAPÍTULO IV

DESENVOLVIMENTO DA ESTRATÉGIA DE MEDIÇÃO DO PERFIL EVOLVENTE DE ENGRENAGENS USANDO *NURBS* (SIMULAÇÃO)

4.1 INTRODUÇÃO

A partir de um banco de dados contendo pontos simulados ou coletados por uma MMC e utilizando o modelamento matemático *NURBS*, torna-se possível representar graficamente os perfis inspecionados. Para este tipo de procedimento, a exatidão do processo de modelagem será tão maior quanto maior for o número de pontos de controle, seja utilizando sensores sem contato (*laser*) ou por contato (escaneamento contínuo ou os ponto a ponto).

De acordo com Sousa (2008) e Piratelli-Filho (2009), são muitas as vantagens do uso da tecnologia *laser* para fins de inspeção de peças e engenharia reversa, entretanto, a maioria das indústrias brasileiras não possuem este tipo de sensor. Usualmente, as MMCs são equipadas com sensores por contato do tipo *TTP*.

Para indústrias que utilizam MMCs manuais e sensores ponto a ponto, torna-se necessário definir uma estratégia de medição de curvas e/ou superfícies, no sentido de representar de maneira fiel à forma geométrica digital da peça e dentro de uma faixa de erro estabelecida.

Como visto no Capítulo II, o perfil evolvente de engrenagens cilíndricas de dentes retos é um parâmetro que, para aplicações de precisão, necessita ser controlado, tendo em vista que o contato das engrenagens motriz e movida ocorre justamente na região do perfil evolvente. Normalmente, as indústrias que fabricam engrenagens necessitam de equipamentos capazes de medir tal parâmetro com elevada exatidão.

Com base no contexto apresentado, foram determinadas estratégias para inspeção do perfil evolvente de engrenagens cilíndricas, fazendo o uso do modelo *NURBS* e MMC manual, no sentido de determinar o Desvio Total de Perfil (F_a). Inicialmente, as estratégias foram definidas no âmbito da simulação computacional, utilizando como ferramenta de trabalho o Matlab[®], para só então iniciar os testes experimentais. Tais procedimentos serão apresentados no capítulo V.

Com a finalidade de aproximar ao máximo a curva evolvente teórica da curva *NURBS*, foi definida uma estratégia para alteração automática do parâmetro peso (w_i).

Neste contexto, serão apresentadas nas seções de 4.2 a 4.4: a metodologia para geração de curva *NURBS* utilizando o *software* computacional Matlab[®]; a metodologia utilizada para definição da estratégia de medição do perfil evolvente de engrenagens cilíndricas de dentes retos; a metodologia para alteração automática do parâmetro peso w_i das curvas *NURBS*; e por fim, a determinação do Desvio Total de Perfil (F_a) com os dados oriundos da simulação. O referido desvio será analisado segundo a norma ISO 1328. Ainda neste capítulo será apresentada uma interface gráfica desenvolvida em ambiente Matlab[®], aqui chamada de SIENG – MMC (Sistema para Inspeção de Engrenagens usando MMC), no qual a mesma foi desenvolvida com objetivo de facilitar o procedimento de inspeção das engrenagens e orientar o operador nas ações a serem seguidas, fornecendo-o informações de medições.

4.2 ROTINA PARA GERAÇÃO DA CURVA *NURBS* UTILIZANDO O SOFTWARE COMPUTACIONAL MATLAB[®]

A metodologia para geração de curvas utilizando a ferramenta *NURBS*, mais especificamente para geração da curva do perfil evolvente a partir de dados teóricos, foi desenvolvida por meio de uma caixa de ferramentas do Matlab[®]. Esta última tem como finalidade a representação de geometrias diversas e consiste em um conjunto de rotinas para criação das *NURBS*. Tais rotinas de programação foram desenvolvidas por Zhang (2008), tendo como prefixo de identificação **nrb**, por exemplo, as funções **nrbmak** e **nrbplot**, que tem como objetivos, respectivamente: construção da *NURBS* a partir de pontos coordenados, pesos e nós; e representação gráfica da curva. O código desenvolvido pelo autor supracitado tem como função realizar o desenho da geometria, porém: cálculos para geração do vetor de nós; leitura de pontos coordenados; determinação dos valores de erros entre a curva teórica e *NURBS*; rotina para inserção

dos valores do parâmetro peso w_i e suas possíveis alterações quando necessário; além da interface gráfica para auxiliar o operador no momento das inspeções, foram desenvolvidos no âmbito deste trabalho de tese.

4.2.1 Geração da curva do perfil evolvente usando *NURBS*

Como definido no Capítulo III, um dos dados de entrada para geração do perfil evolvente da engrenagem são os pontos de controle, que neste primeiro momento serão pontos simulados baseados nas Equações 2.6 e 2.7, apresentadas no Capítulo II. Por meio das equações torna-se possível simular pontos coletados por uma Máquina de Medição por Coordenadas e obter o perfil evolvente teórico de uma engrenagem.

Lima Jr. (2007) desenvolveu uma rotina para geração do perfil evolvente de engrenagens cilíndricas de dentes retos, no qual os dados podem ser armazenados numa planilha com extensão **.xls**. Para importar os dados da planilha no Matlab® utilizou-se o comando: **xlsread**, em que o mesmo faz a leitura de todos os dados da planilha, porém, para selecionar apenas as células que contém informações relevantes à equação *NURBS*, foi necessário implementar a rotina da Figura 4.1.

```
A = xlsread('nome do arquivo'); % Ler o arquivo .xls.
cpnts = A(1:4, 1:npts) % Seleciona as células da planilha.
```

Figura 4.1 – Código para leitura e seleção do arquivo **.xls**

Como pode ser observado Figura 4.1, na variável **cpnts**, que correspondem aos pontos coordenados da equação *NURBS*, são armazenadas as quatro primeiras linhas da planilha **A (1:4,)**; e as colunas da primeira até **npts**. Esta última variável faz referencia a quantidade de pontos de coordenados simulados. As quatro linhas lidas da planilha para o Matlab® correspondem às coordenadas X, Y, Z e W, sendo esta última o peso w_i .

É importante destacar que os dados fornecidos pela MMC manual que será utilizada neste projeto serão importados para um computador e salvos em arquivo com extensão **.txt**, a partir de uma estrutura particular. Informações de medições que constam nos arquivos das MMCs dependerão do seu tipo e fabricante. Para leitura dos dados no formato **.txt**, utilizou-se a função: **textread**. As Figuras 4.2a e 4.2b ilustram, respectivamente, o formato da estrutura do arquivo fornecido pela MMC usada e parte da rotina desenvolvida para leitura no *software* computacional. Observando a Figura

4.2a, se percebe que o arquivo **.txt** consta as seguintes informações: o número do ponto coordenado e sua localização cartesiana e polar para todos os pontos capturados pela máquina. Neste caso, a informação do arquivo que é necessária para geração da curva *NURBS* e que precisam ser lidas pelo Matlab® é apenas a localização cartesiana do ponto, ou seja, os valores de X, Y, Z. O parâmetro peso w_i é inserido na quarta linha da matriz de pontos via linhas de programação. Então, este código específico consiste, na sua totalidade em: ler o arquivo com todas as informações contidas no mesmo, no formato **string**; transformar os dados em uma variável do tipo **char**, selecionar as informações que serão utilizadas e, por fim, montar a matriz com os dados pertinentes à geração da curva *NURBS*.

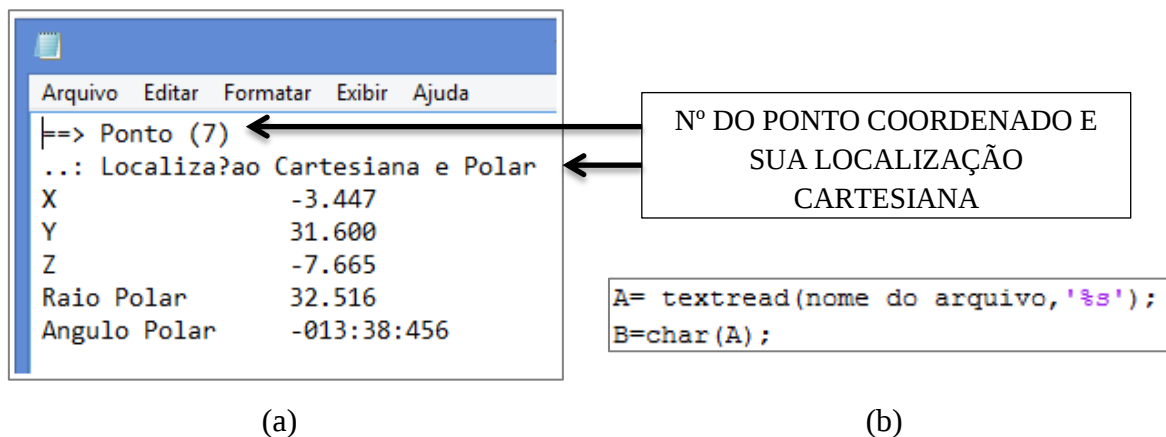


Figura 4.2 – (a) Estrutura do arquivo fornecido pela MMC (b) função de leitura para arquivo **.txt**

Após importar para o *software* os dados citados, as coordenadas dos pontos de controle p_i são multiplicadas pelo peso w_i , no sentido de obter a forma de coordenadas homogêneas. Então, nas linhas de programação do Matlab® tem-se a seguinte rotina, Figura 4.3:

```
cpnts(1,:) = cpnts(4,:).*cpnts(1,:);
cpnts(2,:) = cpnts(4,:).*cpnts(2,:);
cpnts(3,:) = cpnts(4,:).*cpnts(3,:);

% multiplicando os pesos (wi - quarta linha) pelos valores de x (primeira linha).
% multiplicando os pesos (wi - quarta linha) pelos valores de y (segunda linha).
% multiplicando os pesos (wi - quarta linha) pelos valores de z (terceira linha).
```

Figura 4.3 – Multiplicando as coordenadas dos pontos de controle pelo peso w_i , respectivamente

Assim como os pontos de controle, o vetor de nós e sua estrutura também são informações necessárias para construção da curva *NURBS*. Como descrito no item 3.2.1, e citado por Piegl e Tiller (1997) e Minetto (2003), o referido vetor pode ser definido como uma sequência não-decrescente de números reais, numa estrutura particular. Para determinação da quantidade de elementos que contém o vetor de nós e sua criação, uma rotina em ambiente computacional foi desenvolvida, na qual, para sua formação necessita-se das seguintes informações: número de pontos de controle e o grau da função *NURBS*. Os autores citados neste parágrafo afirmam que: para construção de uma curva desconhecida consegue-se, com uma função de grau três $p = 3$, ter uma boa modelagem. Seguindo tal orientação, foram utilizadas funções de grau 3 para representar as formas livres criadas neste trabalho de tese.

Silva (2011) menciona que muitas vezes o grau da função depende de um conhecimento prévio da forma que se deseja construir; como por exemplo, para construção de uma curva parabólica deve ser informado grau 2, ou seja, $p = 2$. A Figura 4.4a ilustra a variável **knots** (nós) armazenando a função **calc_knots** (cálculo do vetor de nós), sendo esta última dependente de duas variáveis: **npts** e **degree**, que correspondem ao número de pontos de controle e grau da função *NURBS*, respectivamente. A Figura 4.4b apresenta uma rotina para determinação do vetor de nós. Pode-se identificar na figura supracitada a presença de mais uma função, a **qntintervalo**, apresentada na Figura 4.4c, que tem como objetivo determinar a quantidade de termos que devem constar no vetor de nós entre o intervalo de valores de 0 e 1, que corresponde a estrutura do vetor. Como descrito no Capítulo III, a quantidade de 0 (zeros) e 1 (uns) dependem do grau da função.

Minetto (2003) faz uma observação mais detalha a respeito do grau das curvas *B-Splines*, justificando assim a generalização destas últimas para curvas racionais usando coordenadas homogêneas.

A Tabela 4.1 ilustra dois vetores de nós gerados a partir do código desenvolvido em Matlab[®] apresentado no parágrafo anterior. Estes foram utilizados pelo autor como dados da função *NURBS* para geração de curvas evolventes, em trabalho já publicado em periódico (Nóbrega *et al*, 2014)

A partir dos dados carregados e calculados em ambiente computacional, pode-se construir a curva desejada por meio das funções **nrbmak** e **nrbplot**, contidos na caixa de ferramentas do Matlab[®], nas quais são responsáveis pela geração e plotagem da curva *NURBS*, respectivamente. A Figura 4.5 ilustra a curva teórica e *NURBS* do perfil

evolvente de uma engrenagem, em que tal ferramenta matemática gera uma curva que melhor se adequa ao conjunto de pontos de controle. A curva do modelo matemático foi construída a partir de 10 pontos coordenados, sendo a diferença entre os pontos de controle teóricos e seus correspondentes na curva *NURBS* considerada como sendo o erro do sistema, podendo este ser minimizado de duas maneiras: aumentando-se a quantidade de pontos de controle, principalmente nos locais em que se apresenta um maior ângulo de curvatura; ou pela alteração do parâmetro peso w_i do modelo matemático.

```
knots = calc_knots(npts,degree);
```

%USANDO A FUNÇÃO 'calc_knots' PARA DEFINIR O VETOR DE NÓS

(a)

```
function vetor = calc_knots(numberPoints, grau)
    intervalo = qntintervalo(numberPoints, grau);
    vetor = zeros(1, 2*(grau+1) + intervalo);
    vetor(1, grau+1:grau+intervalo+2) = 0:1/(intervalo+1):1;
    vetor(1, size(vetor,2)-grau+1:size(vetor,2)) = ones(1, grau);
```

%FUNÇÃO PARA CALCULAR O VETOR DE NÓS

(b)

```
function saida = qntintervalo(pontosdecontrole, p)
    n = (pontosdecontrole-1);
    m = n + p + 2;
    pc = m - (2*(p+1));
    saida = pc;
```

(c)

Figura 4.4 – Cálculo do vetor de nós (a) variável **knots** armazenando o vetor de nós utilizado na função *NURBS* (b) função **calc_knots** para cálculo do vetor de nós (c) código da função **qntintervalo** para determinar a quantidade de termos entre 0 e 1 do vetor de nós

Tabela 4.1 – Vetores de nós gerados a partir do código desenvolvido

Vetor	Nº de pontos (npts)	Grau da Curva (degree)	U_{vetor}
1	5	3	$U_{5\text{pontos}} = \{0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.5 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1\}$
2	6	3	$U_{6\text{pontos}} = \{0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.33 \ 0.66 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1\}$

Ainda de acordo com as funções responsáveis pela geração e plotagem da curva *NURBS* em ambiente computacional, tem-se que: a **nrbmak** é armazenada em uma variável denominada **curva**, na qual solicita como dados de entrada a matriz de pontos coordenados **cpnts** e o vetor de nós **knots**. No entanto, na função **nrbplot** é inserido a variável **curva** com tais informações, como pode ser observado na Figura 4.6.

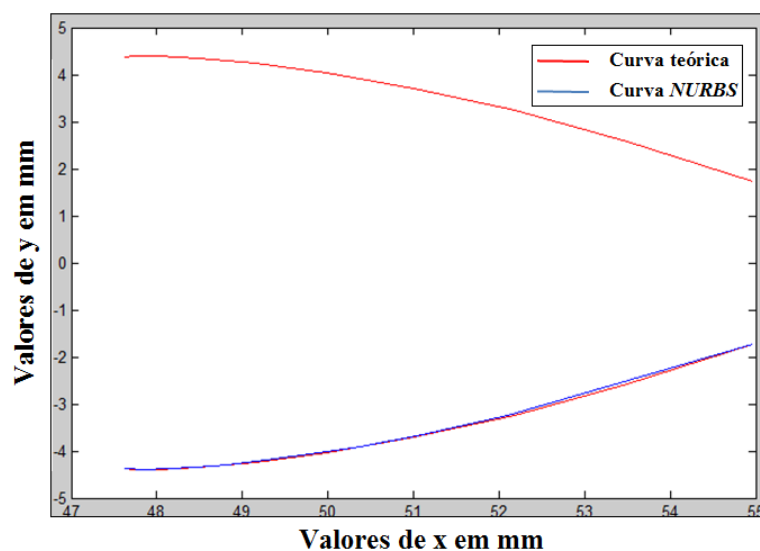


Figura 4.5 – Exemplo de uma curva teórica e *NURBS* (gerada a partir de 10 pontos coordenados) do perfil evolvente do dente de engrenagem

```
curva = nrbmak(cpnts, knots);
nrbplot(curva, 100)
```

USANDO AS FUNÇÕES DO TOOLBOX

Figura 4.6 – Estrutura das funções **nrbmak** e **nrbplot** da caixa de ferramentas do Matlab®

De posse dos pontos de controle teóricos obtidos por meio de simulação e dos seus correspondentes na curva *NURBS*, desenvolveu-se um código para calcular os valores de erros, no qual corresponde a distancia entre tais pontos.

O código de programação para o cálculo do erro foi armazenado em uma função chamada de: **ClosestsPoints** (pontos mais próximos), que seleciona os pontos da curva *NURBS* mais próximos dos pontos de controle teóricos. Neste caso, no código

desenvolvido obtêm-se duas matrizes, para só então fazer a diferença entre os respectivos valores.

Com base no que foi apresentado nesta seção, foi definida estratégias de medição para perfis com diferentes módulos, que será apresentada na seção 4.3.

4.3 METODOLOGIA PARA DEFINIÇÃO DO NÚMERO MÍNIMO DE PONTOS DE CONTROLE NA GERAÇÃO DO PERFIL EVOLVENTE USANDO *NURBS*

O objetivo da metodologia que será apresentada é tornar possível inspecionar o perfil evolvente de engrenagens cilíndricas de dentes retos usando MMCs manuais, coletando um número mínimo de pontos de controle, numa medição eficiente e com alta exatidão. Assim, pretende-se viabilizar o uso de tais modelos de MMCs para medição do perfil evolvente. A estratégia seguirá os passos do fluxograma ilustrado na Figura 4.7

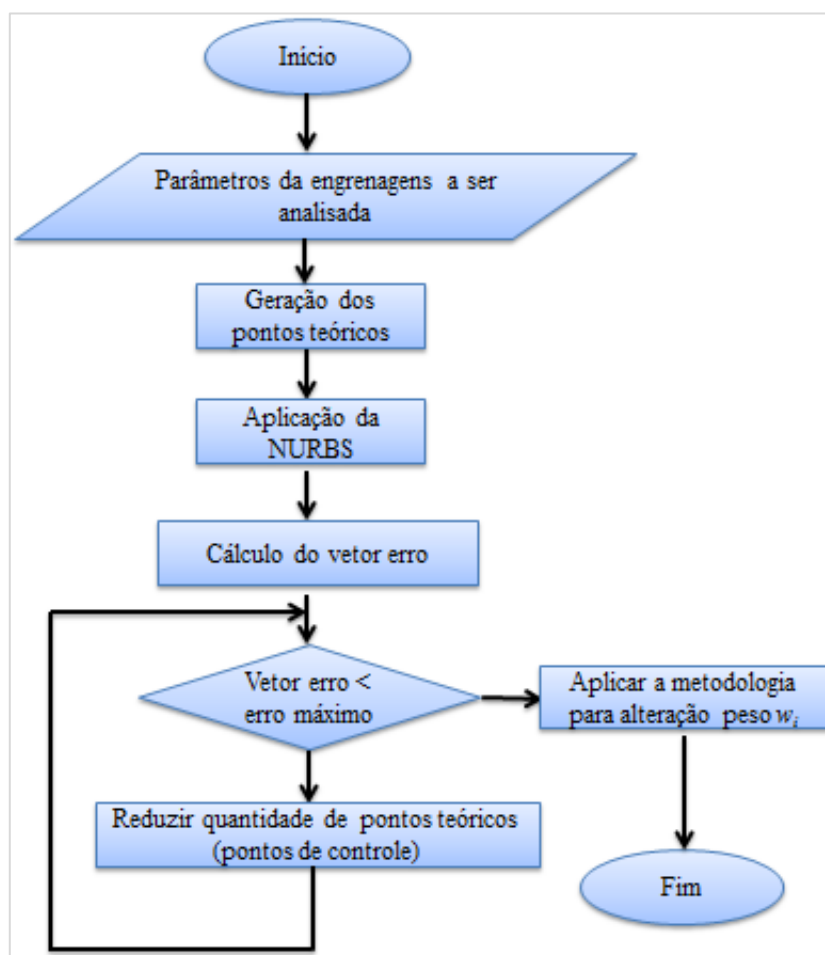


Figura 4.7 – Diagrama de fluxo para definição da estratégia de medição

Primeiramente, para definição da estratégia de medição dos perfis evolventes, se fez necessário gerar, baseados nas Equações 2.6 e 2.7 fundamentadas na seção 2.5.2, pontos coordenados utilizando o *software* computacional Matlab®, no sentido de simular pontos coletados por uma MMC usando sensor TTP.

Como ponto de partida foi selecionado para simulação a geração do perfil evolvente de uma engrenagem com as seguintes características: módulo (m) de 4 mm, número de dentes (Z) igual a 16 e ângulo de pressão (ϕ) de 20° . A Figura 4.8 ilustra o perfil evolvente teórico da engrenagem cilíndrica de dentes retos com as características supracitadas, destacando os 15 pontos coordenado plotados sob a curva.

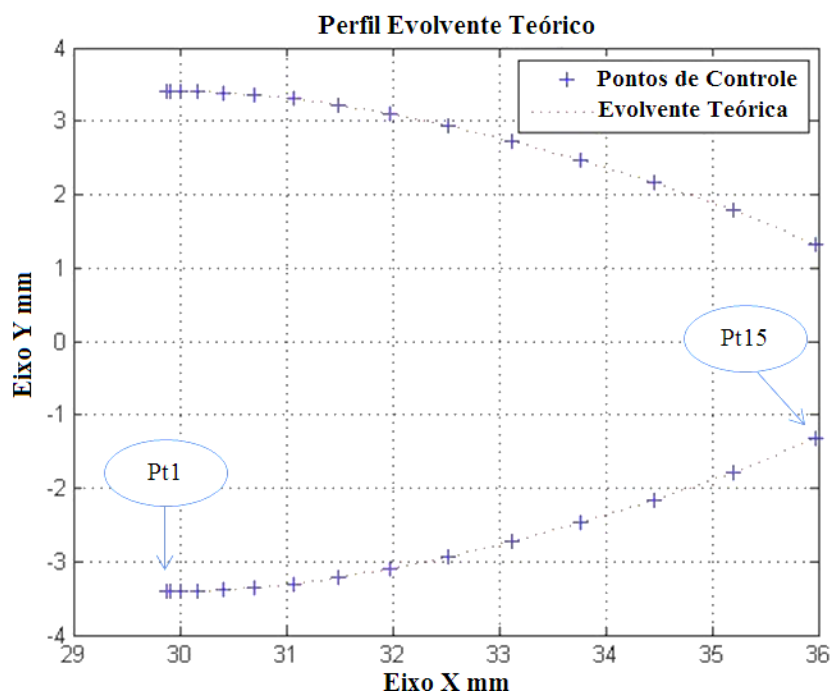


Figura 4.8 – Perfil evolvente do dente da engrenagem: $m = 4$ mm e $\phi = 20^\circ$

Com a finalidade de definir a estratégia para medição da engrenagem de módulo 4 mm, foi gerada a curva evolvente utilizando ferramenta *NURBS*, usando todos os pontos apresentados na Figura 4.8. Na curva *NURBS* foram localizados os pontos para então serem comparados com os valores dos pontos do perfil teórico. Para esta simulação o grau da função foi $p = 3$ e o vetor de nós $u = \{0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0,1111 \ 0,2222 \ 0,3333 \ 0,4444 \ 0,5556 \ 0,6667 \ 0,7778 \ 0,8889 \ 1 \ 1 \ 1\}$

A diferença entre os pontos de controle teóricos e os seus correspondentes na curva *NURBS* é definida como sendo o erro do sistema. Este valor depende do número de pontos e de sua distribuição ao longo do perfil evolvente.

A Tabela 4.2 e Figura 4.9 ilustram, respectivamente: os valores dos pontos teóricos e seus correspondentes da curva *NURBS*, além dos valores de erros e pesos w_i ; e a curva teórica e *NURBS* para o caso da peça em questão.

Baseado na ISO 1328 foi estabelecido que o erro máximo permissível da curva *NURBS* seria igual a 10 μm , para engrenagens com módulos variando de 1 à 3,5 mm. Para engrenagens com módulos maiores que 3,5 mm e menores ou iguais a 10 mm, definiu-se um erro máximo de 12 μm . Módulos de 1 a 10 mm foram os analisados neste trabalho, em que é possível constatar estes sendo os mais usuais em aplicações práticas.

Além de considerar a norma ISO 1328, são fatores relevantes que levaram a definir os erros apresentados no parágrafo anterior: a análise das Tabelas 2.1 e 2.2 que constam no Capítulo II, na qual apresentam uma relação entre o grau de qualidade e as aplicações das engrenagens; a verificação dos diâmetros das esferas de rubi dos apalpadores que constam na MMC, de acordo com o tamanho da engrenagem; tempo disponível para inspeção.

Como observado na Tabela 4.2, os valores de erros foram todos inferiores ao definido no sistema computacional, que para a engrenagem com as características analisadas, correspondem a 12 μm . Outro detalhe a ser observado na Tabela 4.2, é que os erros aumentam gradativamente com sua posição, isso se justifica pelo fato de existir uma maior quantidade de pontos de controle na parte inferior do perfil.

Tabela 4.2 – Coordenadas das curvas teórica e *NURBS* referente ao perfil evolvente da engrenagem cilíndrica de dentes retos: $m = 4 \text{ mm}$; $NP = 15$ e $\phi = 20^\circ$

Pontos	Curva teórica		Curva <i>NURBS</i>		Erro [μm]	Pesos [w_i]
	X [mm]	Y[mm]	X[mm]	Y[mm]		
Ponto 1	29,8781	3,3931	29,8781	3,3931	0	1
Ponto 2	29,9112	3,3958	29,9112	3,3953	0,5	1
Ponto 3	30,0109	3,3998	30,0109	3,3986	1,2	1
Ponto 4	30,1770	3,3988	30,1770	3,3973	1,5	1
Ponto 5	30,4094	3,3865	30,4092	3,3845	2,0	1
Ponto 6	30,7070	3,3569	30,7067	3,3543	2,6	1
Ponto 7	31,0687	3,3036	31,0682	3,3006	3,1	1
Ponto 8	31,4927	3,2207	31,4919	3,2171	3,6	1
Ponto 9	31,9769	3,1021	31,9758	3,0981	4,1	1
Ponto 10	32,5188	2,9422	32,5174	2,9377	4,7	1
Ponto 11	33,1153	2,7352	33,1135	2,7303	5,2	1
Ponto 12	33,7632	2,4757	33,7609	2,4704	5,7	1
Ponto 13	34,4586	2,1584	34,4553	2,1516	7,5	1
Ponto 14	35,1975	1,7785	35,1932	1,7708	8,9	1
Ponto 15	35,9754	1,3311	35,9754	1,3311	0	1

Legenda: NP – número de pontos de controle; Erro = $Y_{\text{teórico}} - Y_{\text{NURBS}}$

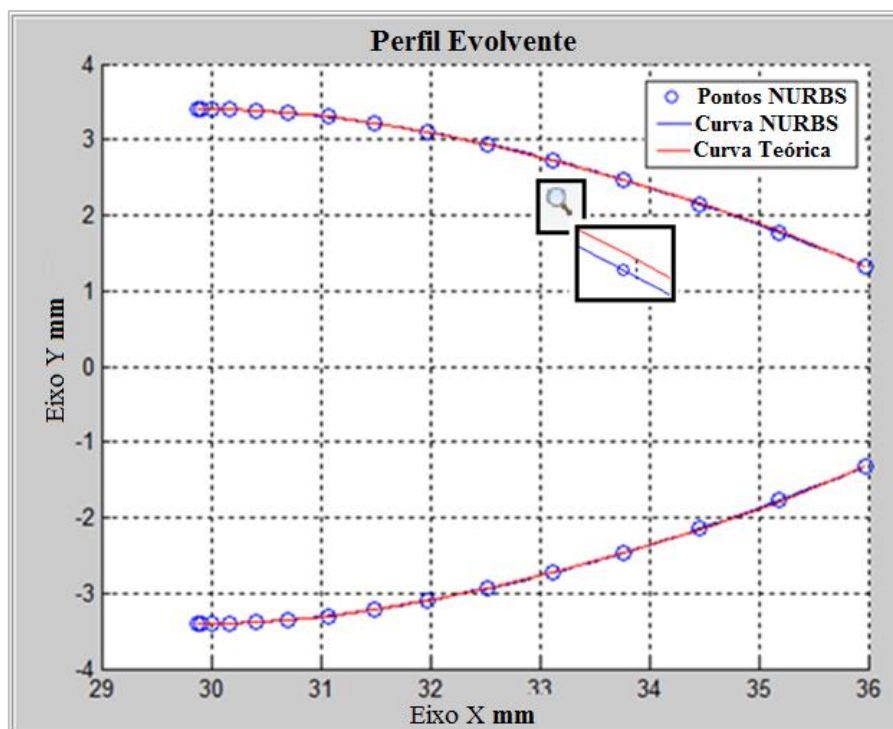


Figura 4.9 – Curvas teórica e *NURBS*: $m = 4$ mm; $NP = 15$ e $\phi = 20^\circ$

Neste trabalho, como o sensor utilizado para coleta de pontos coordenados será um *touch trigger* usado em MMC manual, em que o operador necessita de capturar ponto a ponto, o objetivo da estratégia de medição será minimizar a quantidade de pontos coletados e, conseqüentemente, o nível de incerteza causado pela intervenção do operador no processo de medição e aquisição de dados, o tempo de trabalho na inspeção de um lote de peças e diminuição do processamento computacional. Porém, com a diminuição dos pontos de controle, o erro definido anteriormente tende a aumentar, podendo exceder o valor estabelecido em projeto. Assim, necessita-se verificar uma quantidade de pontos ideal, que leve em consideração o erro e a exatidão geométrica da peça inspecionada, quando a mesma for reproduzida digitalmente.

Neste caso, tornou-se possível reduzir a quantidade de pontos coordenados e, novamente, gerar a curva *NURBS* calculando os valores de erros ponto a ponto. Para o momento foram retirados os pontos 2 e 3 da Tabela 4.2, verificado que os menores valores de erros foram constatados na base do perfil evolvente.

A Tabela 4.3 apresenta os resultados da curva *NURBS* para a nova configuração de 13 pontos de controle, em que se verifica um erro máximo de 8,9 μm no ponto 14. A Figura 4.10 ilustra o perfil traçado usando os dados da Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Coordenadas das curvas teórica e *NURBS* referente ao perfil evolvente da engrenagem cilíndrica de dentes retos: $m = 4$ mm; $NP = 13$ e $\phi = 20^\circ$

Pontos	Curva teórica		Curva <i>NURBS</i>		Erro [μ m]	Pesos [w_i]
	X [mm]	Y[mm]	X[mm]	Y[mm]		
Ponto 1	29,8781	3,3931	29,8781	3,3931	0	1
Ponto 2	PONTO ELIMINADO					
Ponto 3	PONTO ELIMINADO					
Ponto 4	30,1770	3,3988	30,1769	3,3947	4,1	1
Ponto 5	30,4094	3,3865	30,4092	3,3840	2,5	1
Ponto 6	30,7070	3,3569	30,7067	3,3543	2,6	1
Ponto 7	31,0687	3,3036	31,0682	3,3006	3,1	1
Ponto 8	31,4927	3,2207	31,4919	3,2171	3,6	1
Ponto 9	31,9769	3,1021	31,9758	3,0981	4,1	1
Ponto 10	32,5188	2,9422	32,5174	2,9377	4,7	1
Ponto 11	33,1153	2,7352	33,1135	2,7303	5,2	1
Ponto 12	33,7632	2,4757	33,7609	2,4704	5,7	1
Ponto 13	34,4586	2,1584	34,4553	2,1516	7,5	1
Ponto 14	35,1975	1,7785	35,1932	1,7708	8,9	1
Ponto 15	35,9754	1,3311	35,9754	1,3311	0	1

Legenda: NP – número de pontos de controle; Erro = $Y_{\text{teórico}} - Y_{\text{NURBS}}$

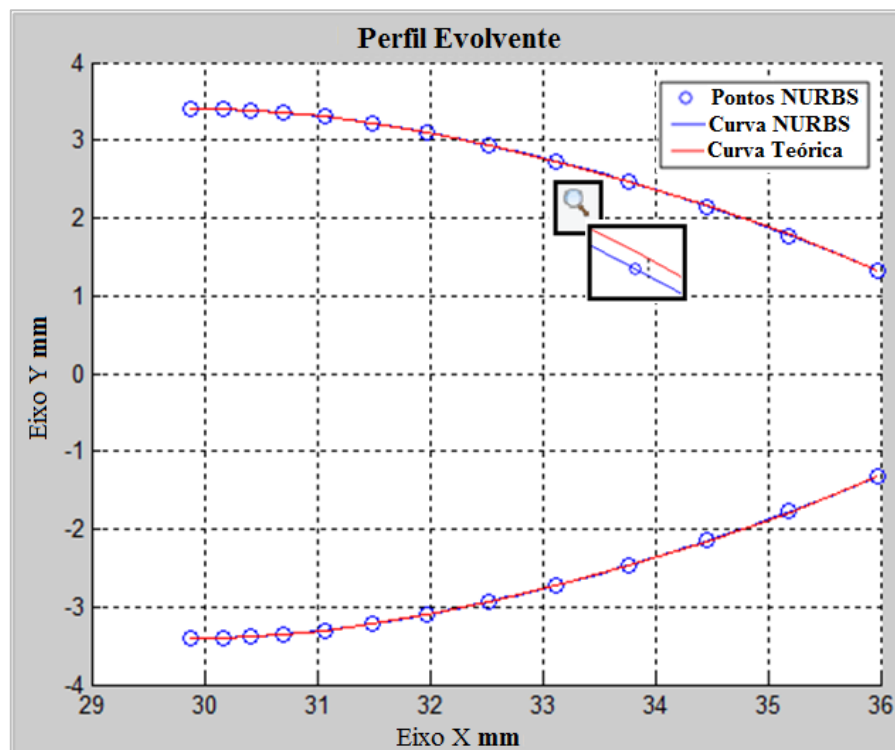


Figura 4.10 – Curvas teórica e *NURBS*: $m = 4$ mm; $NP = 13$ e $\phi = 20^\circ$

Como descrito no Capítulo III, às curvas *NURBS* são formadas por segmentos e possui um esquema de modificação local, em que a modificação de um ponto P_i na curva $Q(u)$ somente afetará um determinado intervalo, que são os pontos vizinhos mais próximos. Com base no contexto, os valores de erros apresentados na Tabela 4.3 são alterados em um determinado intervalo. A partir do ponto 6, com erro igual a $2,6 \mu\text{m}$, os valores se conservam, quando comparados com os dados apresentados na Tabela 4.2.

Uma vez que os erros para simulação com 13 pontos foram inferiores ao erro máximo definido, uma nova simulação foi realizada com 12 pontos de controle, retirando o ponto 5. A Tabela 4.4 e Figura 4.11 ilustram, respectivamente, os dados de simulação e o perfil evolvente da engrenagem.

Tabela 4.4 – Coordenadas das curvas teórica e *NURBS* referente ao perfil evolvente da engrenagem cilíndrica de dentes retos: $m = 4 \text{ mm}$; $NP = 12$ e $\phi = 20^\circ$

Pontos	Curva teórica		Curva <i>NURBS</i>		Erro [μm]	Pesos [w_i]
	X [mm]	Y[mm]	X[mm]	Y[mm]		
Pontos 1	29,8781	3,3931	29,8781	3,3931	0	1
Pontos 2	PONTO ELIMINADO					
Pontos 3	PONTO ELIMINADO					
Pontos 4	30,1770	3,3988	30,1767	3,3905	8,3	1
Pontos 5	PONTO ELIMINADO					
Pontos 6	30,7070	3,3569	30,7064	3,3510	5,9	1
Pontos 7	31,0687	3,3036	31,0682	3,3005	3,1	1
Pontos 8	31,4927	3,2207	31,4919	3,2171	3,6	1
Pontos 9	31,9769	3,1021	31,9758	3,0981	4,1	1
Pontos 10	32,5188	2,9422	32,5174	2,9377	4,7	1
Pontos 11	33,1153	2,7352	33,1135	2,7303	5,2	1
Pontos 12	33,7632	2,4757	33,7610	2,4704	5,7	1
Pontos 13	34,4586	2,1584	34,4553	2,1516	7,5	1
Pontos 14	35,1975	1,7785	35,1933	1,7707	8,9	1
Pontos 15	35,9754	1,3311	35,9754	1,3311	0	1

Legenda: NP – número de pontos de controle; Erro = $Y_{\text{teórico}} - Y_{\text{NURBS}}$

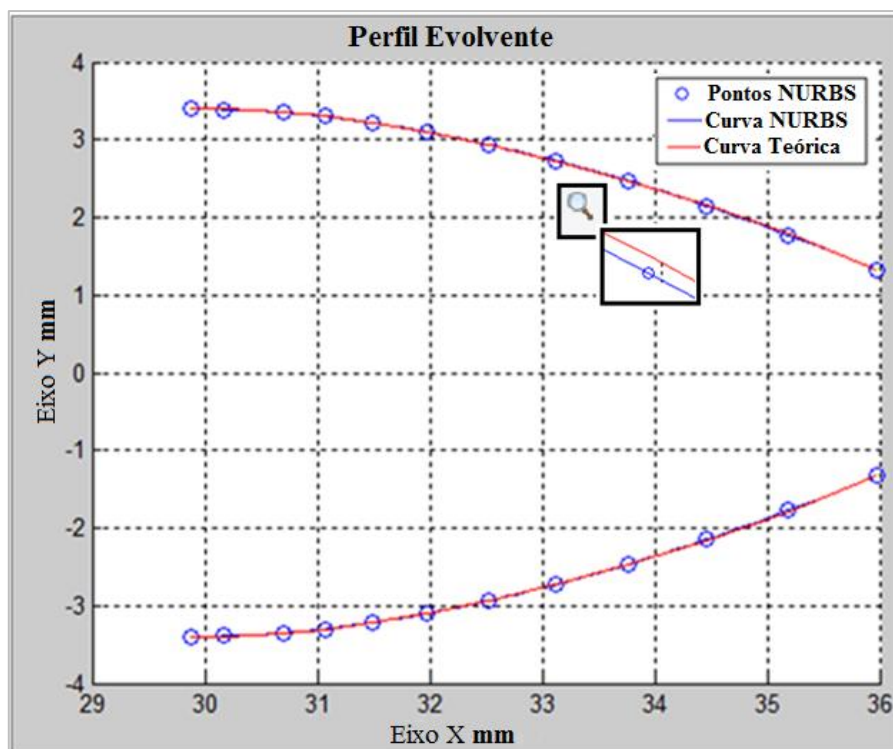


Figura 4.11 – Curvas teórica e *NURBS*: $m = 4$ mm; $NP = 12$ e $\phi = 20^\circ$

Ainda com erros inferiores a $12\ \mu\text{m}$, foi realizada uma simulação com 10 pontos de controle, sendo a *NURBS* aplicada novamente e os valores de erros calculados. A Tabela 4.5 apresenta os resultados para nova simulação e a Figura 4.12 o perfil evolvente com os 10 pontos de controle. Para esta simulação foi possível constatar erros elevados, bem acima do estabelecido, como: $14,2\ \mu\text{m}$ para o ponto 5; $14,4\ \mu\text{m}$ para o ponto 12; e $17,5\ \mu\text{m}$ para o ponto 14. Para esta simulação a melhor distribuição dos pontos ao longo do perfil evolvente foi analisada e utilizada, sendo assim, o ponto 5 foi reinserido na modelo *NURBS* como ponto de controle, e os pontos 4, 6 e 13 retirados.

Os valores de erros iguais a 0 (zero) do primeiro e último ponto referentes as tabelas apresentadas nessa seção, são justificados pela distribuição dos valores do vetor paramétrico de nós, sendo este responsável por gerar as funções *B-Splines*. O vetor paramétrico tem grande influência no processo de aproximação das curvas e, dependendo de sua estrutura, pode-se obter as curvas semi-fechadas ou fechadas. Neste trabalho foram usadas curvas semi-fechadas.

Tabela 4.5 – Coordenadas das curvas teórica e *NURBS* referente ao perfil evolvente da engrenagem cilíndrica de dentes retos: $m = 4 \text{ mm}$; $NP = 10$ e $\phi = 20^\circ$

Pontos	Curva teórica		Curva <i>NURBS</i>		Erro [μm]	Pesos [w_i]
	X [mm]	Y[mm]	X[mm]	Y[mm]		
Pontos 1	29,8781	3,3931	29,8781	3,3931	0	1
Pontos 2	PONTO ELIMINADO					
Pontos 3	PONTO ELIMINADO					
Pontos 4	PONTO ELIMINADO					
Pontos 5	30,4094	3,3865	30,4084	3,3724	14,2	1
Pontos 6	PONTO ELIMINADO					
Pontos 7	31,0687	3,3036	31,0676	3,2965	7,2	1
Pontos 8	31,4927	3,2207	31,4919	3,2171	3,6	1
Pontos 9	31,9769	3,1021	31,9758	3,0981	4,1	1
Pontos 10	32,5188	2,9422	32,5174	2,9377	4,7	1
Pontos 11	33,1153	2,7352	33,1135	2,7303	5,2	1
Pontos 12	33,7632	2,4757	33,7572	2,4626	14,4	1
Pontos 13	PONTO ELIMINADO					
Pontos 14	35,1975	1,7785	35,1894	1,7630	17,5	1
Pontos 15	35,9754	1,3311	35,9754	1,3311	0	1

Legenda: NP – número de pontos de controle; Erro = $Y_{\text{teórico}} - Y_{\text{NURBS}}$

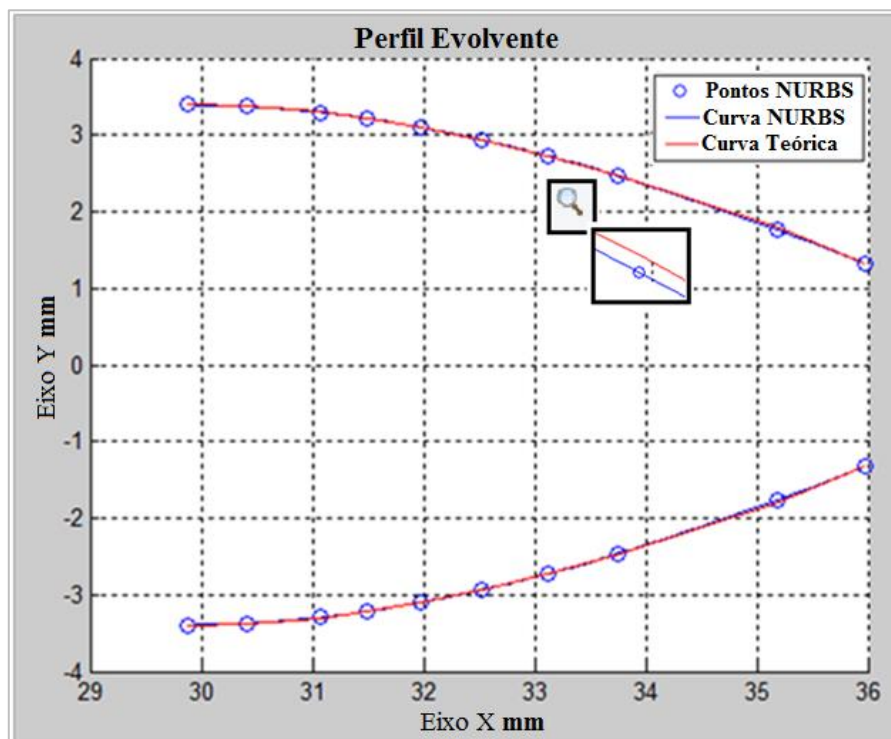


Figura 4.12 – Curvas teórica e *NURBS*: $m = 4 \text{ mm}$; $NP = 10$ e $\phi = 20^\circ$

Como já mencionado, para redução dos valores dos erros torna-se necessário usar uma maior quantidade de pontos, o que pode ser facilmente obtido com MMCs

CNC. Porém, para uma MMC manual esta não é a solução mais adequada, uma vez que não é prática a coleta de grande quantidade de pontos neste tipo de máquina. A quantidade de peças a serem inspecionadas, adicionado ao nível de experiência do operador, influencia negativamente o uso das MMCs manuais no trabalho de inspeção do perfil evolvente de engrenagens, justificando assim uma captura reduzida de pontos. Neste sentido, foi desenvolvida uma rotina em ambiente computacional para alteração automática dos valores de pesos w_i da função *NURBS*, podendo ser verificada no fluxograma da Figura 4.13.

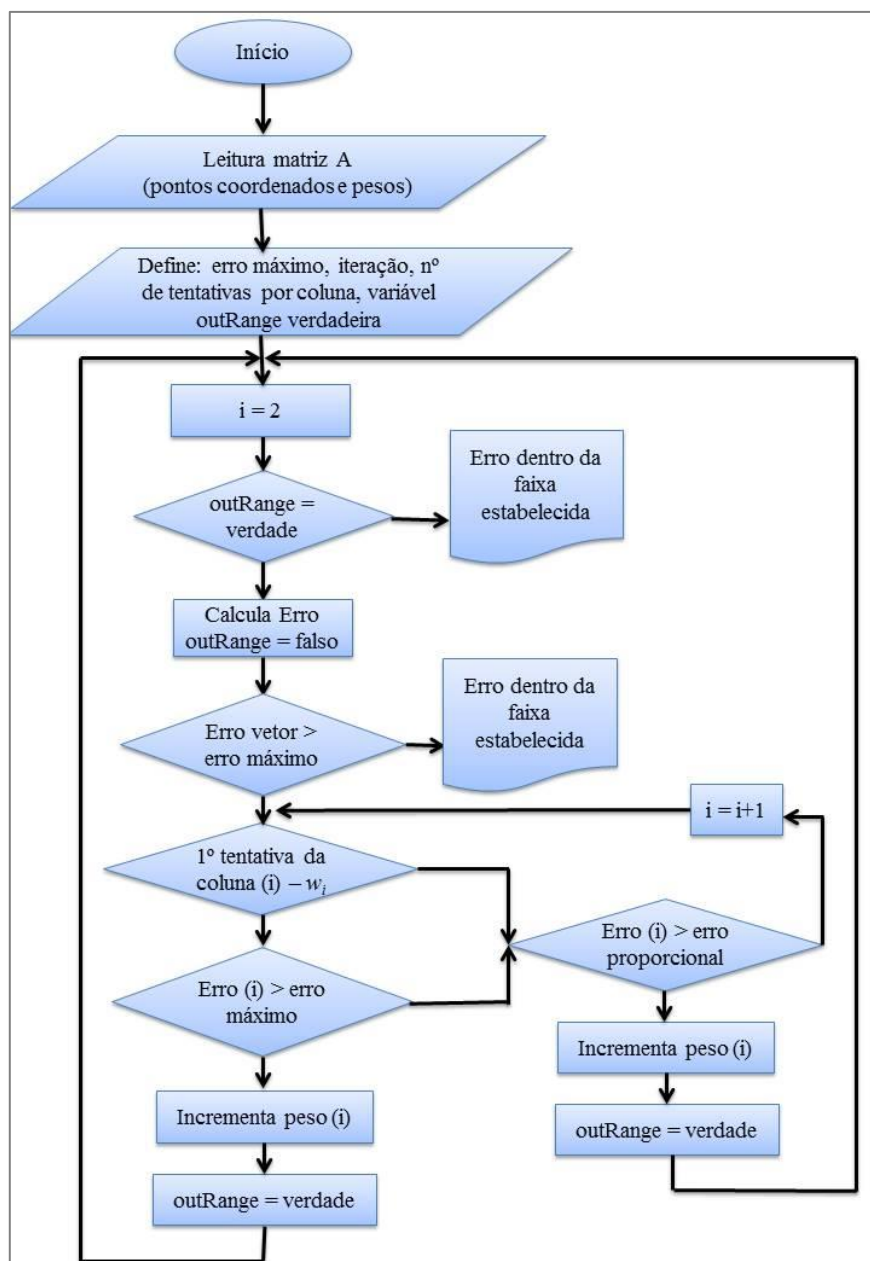


Figura 4.13 – Diagrama de fluxo referente à alteração dos pesos w_i da curva *NURBS*

A rotina apresentada na Figura 4.13 tenta ajustar os valores do parâmetro peso w_i , no sentido de manter os erros dos pontos de controle iguais ou abaixo do erro máximo estabelecido para cada engrenagem. O erro máximo é um valor flexível na programação desenvolvida, no qual o mesmo pode ser alterado em função do tipo de engrenagem, considerando a qualidade da mesma, segundo a norma ISO 1328. O grau de liberdade a mais, o peso w_i , pertencente à curva *NURBS* também justifica o uso desta ferramenta na pesquisa.

Com o objetivo de validar a metodologia apresentada no fluxograma da Figura 4.13, a mesma foi aplicada nos dados da Tabela 4.5, para o perfil da engrenagem com módulo 4 mm. A Tabela 4.6 ilustra os resultados da simulação com todos os erros inferiores a 12 μm , após 6 iterações, comprovando a eficácia do método. Para alcançar tais valores de erros 6 iterações foram necessárias.

Tabela 4.6 – Aplicação da metodologia de alteração do vetor peso para análise de erro do perfil evolvente da engrenagem com: $m = 4 \text{ mm}$; $NP = 10$; erro máximo = 12 μm
(Simulação)

Colunas Iterações		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Erro [μm]	0	14,2	7,2	3,6	4,1	4,7	5,2	14,4	17,5	0
	Peso w_i	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	Erro [μm]	0	5,6	9,9	3,6	4,1	4,7	5,2	19,5	7,0	0
	Peso w_i	1	3,625	1	1	1	1	1	1	3,625	1
3	Erro [μm]	0	3,5	11,0	3,6	4,1	4,7	5,2	21,6	4,4	0
	Peso w_i	1	6,25	1	1	1	1	1	1	6,25	1
4	Erro [μm]	0	5,9	5,7	5,2	4,1	4,7	7,4	11,3	7,3	0
	Peso w_i	1	6,25	3,25	1	1	1	1	3,25	6,25	1
5	Erro [μm]	0	4,4	6,4	5,2	4,1	4,7	7,4	12,4	5,5	0
	Peso w_i	1	8,875	3,25	1	1	1	1	3,25	8,875	1
6	Erro [μm]	0	5,5	4,4	5,9	4,1	4,7	8,4	8,5	6,9	0
	Peso w_i	1	8,875	5,5	1	1	1	1	5,5	8,875	1

Legenda: Cor verde – erro inferior ao erro máximo; Cor vermelha – erro superior ao erro máximo; Cor azul – peso modificado na coluna; Cor cinza – valor não alterado na coluna.

Com as simulações e análises de dados realizadas até o momento, tornou-se possível concluir que: para inspecionar uma engrenagem de módulo 4 mm e ângulo de pressão 20°, deve-se capturar entre 10 e 12 pontos de controle na superfície do perfil evolvente, a depender da habilidade do operador e condições de medição. O intervalo que define a quantidade de pontos a serem coletados no perfil foi determinado entre as simulações que apresentaram erros *NURBS* inferiores e superiores ao limite

estabelecido. Simulações com quantidade mínima de pontos também foram realizadas, porém resultados não satisfatórios foram encontrados.

Permanecer com valores de erros a certa distância/folga do erro máximo estabelecido no sistema computacional, usando dados oriundo de simulação, torna-se uma medida preventiva para os procedimentos experimentais futuros, tendo em vista a existência de incertezas de medição inerentes ao processo, podendo estas contribuir no processo de inspeção da peça.

A estratégia para inspeção do perfil evolvente desenvolvida para engrenagem de módulo 4 mm também foi aplicada para outros módulos, de 1 a 10 mm. A Tabela 4.7 apresenta a relação do número de pontos de controle a serem coletados versus os módulos das engrenagens.

Tabela 4.7 – Relação entre o número de pontos coletados versus módulo das engrenagens

Módulo em mm	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm
Quantidade de pontos a serem coletados	07 a 09 pontos	08 a 10 pontos	09 a 10 pontos	10 a 12 pontos	12 a 13 pontos
Módulo em mm	6 mm	7 mm	8 mm	9 mm	10 mm
Quantidade de pontos a serem coletados	13 a 14 pontos	15 a 16 pontos	17 a 18 pontos	19 a 20 pontos	20 a 21 pontos

4.4 ANÁLISE DOS DESVIOS TOTAL DE PERFIL SEGUNDO A ISO 1328 – *Dados de Simulação*

De acordo com a ISO 1328, a análise o Desvio Total de Perfil (F_α) busca uma avaliação quantitativa, no qual se verifica o quanto o perfil real atinge seus limites máximos e mínimos, conforme ilustrado na Figura 2.29a do Capítulo II. Com o erro de perfil evolvente proveniente do processo de fabricação, no engrenamento pinhão/corona as respectivas funções evolventes não se tangenciarão, implicando em variação das cargas nas superfícies das engrenagens com seu posterior e eventual colapso. Segundo a ISO 1328, para uma avaliação, o perfil da engrenagem precisa ser desenhado e avaliado.

Após a simulação dos pontos coordenados, a curva *NURBS* foi gerada e identificado nesta os pontos correspondentes àqueles que foram simulados. Ao passo

seguinte, gerou-se um perfil evolvente teórico, no sentido de compará-lo com o perfil *NURBS* e determinar o Desvio Total de Perfil (F_a).

A Figura 4.14 ilustra a análise do desvio para a engrenagem de módulo 4 mm, em que são esboçadas as curvas: *NURBS* e seus respectivos pontos, na cor azul; e as curvas teóricas, na cor vermelha. Os deslocamentos das curvas teóricas foram realizados apenas no eixo Y, com o objetivo de conservar a maior quantidade de parâmetros possíveis durante a comparação. Outro ponto a ser ressaltado e já mencionado no item 2.6.2 do Capítulo II, é que devido as variações do processo de fabricação, deve-se desconsiderar as medições realizadas nas regiões de *Fillet* e *Tip Round*, pelo fato das mesmas se afastarem do perfil evolvente. Sendo assim, para efeito de análise dos desvios de perfis, desconsiderou-se o primeiro e último ponto da curva *NURBS*.

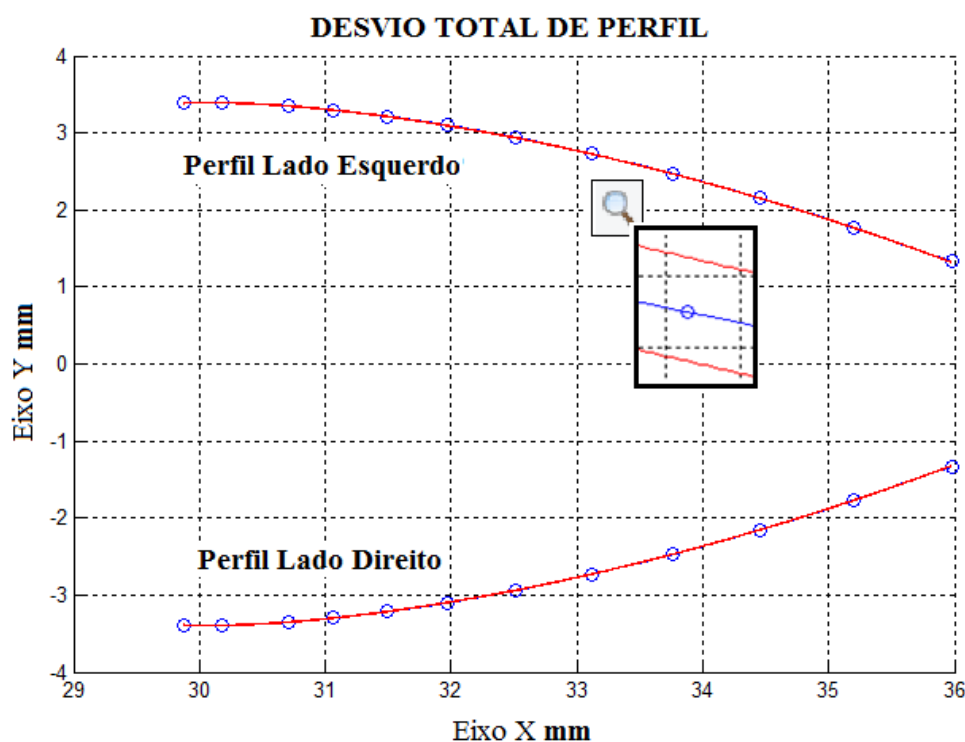


Figura 4.14 – Análise do Desvio Total de Perfil (F_a): engrenagem módulo 4 mm

Nesta seção foram analisados os desvios e perfil das engrenagens simuladas, para módulos variando de 1 a 10 mm. Os valores dos desvios são mostrados na Tabela 4.7. Com a estratégia de medição definida, tornou-se possível alcançar valores de desvio de perfil bastante pequenos, variando de 4,22 μm para engrenagem com módulo 1 mm a 9,18 μm para engrenagem com módulo 9 mm.

Os valores de desvio de perfil dos lados esquerdo e direito da Tabela 4.8 são iguais, pois em ambiente de simulação as curvas evolventes são construídas a partir de um mesmo banco de dados, gerando um espelhamento do desenho.

Com base nos resultados de simulação apresentados na Tabela 4.8, é possível classificar as engrenagens quanto aos graus de qualidade, segundo a norma ISO 1328, como pode ser observado na Tabela 4.9.

Tabela 4.8 – Valores de Desvio Total de Perfil (F_α) para as engrenagens com os módulos variando de 1 a 10 mm

	m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8	m9	m10
Perfil Lado Esquerdo (Desvio em μm)	4,22	7,09	6,02	8,38	7,43	6,93	8,32	7,91	9,18	6,7
Perfil Lado Direito (Desvio em μm)	4,22	7,09	6,02	8,38	7,43	6,93	8,32	7,91	9,18	6,7

Tabela 4.9 – Classificação das engrenagens quanto aos graus de qualidade segundo a norma ISO 1328

	m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8	m9	m10
Grau de Qualidade (Desvio de Perfil - F_α)	5	6	5	5	5	4	5	4	5	4

Para uma análise prática e mais rápida dos dados coletados, como: apresentação dos valores de erros da curva *NURBS*, ajuste dos valores de pesos w_i , Desvio Total de Perfil (F_α) de perfil, gráficos, entre outras informações, desenvolveu-se uma interface gráfica em programa computacional, objetivando facilitar a interação com o usuário metrologista.

4.5 INTERFACE GRÁFICA SIENG – MMC

Para fins de aplicações industriais de toda metodologia desenvolvida de inspeção do perfil evolvente e análise das curvas *NURBS*, com dados oriundos de simulação ou MMC manual, foi criada uma plataforma em ambiente computacional Matlab[®] - GUI (*Graphical User Interface*), nomeada neste trabalho de SIENG – MMC (Sistema para Inspeção de Engrenagens usando MMC), no sentido de orientar o operador da máquina nos procedimentos de inspeção e utilização do sistema desenvolvido. A plataforma

SIENG – MMC armazena o código computacional e as informações pertinentes à apresentação do resultado final das medições. O funcionamento automático desta plataforma é dado pelo preenchimento e seleção das informações de dados de entrada que serão apresentadas/solicitadas na tela.

Na geração da interface GUI são criados dois arquivos, um arquivo de figura com a extensão **.fig**, que contém as informações pertinentes ao funcionamento da plataforma, botões, caixas para inserção de textos, gráficos; e um arquivo com o sufixo **.m**, contendo a função principal da GUI e suas sub-funções. Para cada objeto inserido na plataforma é gerada uma sub-função, em que nesta pode-se determinar o tipo de ação do elemento por meio de linhas de programação, como por exemplo, a ação de um botão. As telas gráficas desenvolvidas neste trabalho serão apresentadas na sequência de funcionamento.

Ao executar o *software* computacional Matlab[®] GUI e abrir a interface inicial da SIENG – MMC será apresentada a tela ilustrada na Figura 4.15, tendo continuidade pelo acesso ao botão Iniciar Medições. Outras opções a serem acessadas na plataforma inicial da GUI são: Instruções de Uso e Fechar, que correspondem, respectivamente a: o roteiro para captura e importação dos dados ao sistema de medição, que consiste em cinco etapas; e tecla para finalizar do sistema.

Ao acessar o botão Instruções de Uso será apresentada a tela ilustrada na Figura 4.16. Nesta são apresentadas cinco etapas para utilização do sistema de medição: 1. Fixação da Engrenagem na MMC; 2. Conexão do Cabo Serial/USB da MMC para o Computador; 3. Inicialização da MMC; 4. Execução das Medições com Base nas Estratégias; 5. Execução do *Download* dos dados de medição. Para cada um dos passos descritos tem-se um botão que, ao acessá-lo, uma figura ilustrativa da ação a ser executada aparecerá na tela, orientando melhor o operador. Abaixo dos botões constará um texto que descreverá a ação do mesmo. A seta vermelha indicada na Figura 4.16 corresponde ao *menu* que está sendo acessado, que neste caso é: Fixação da Engrenagem na MMC.



Figura 4.15 – Tela inicial da interface SIENG – MMC

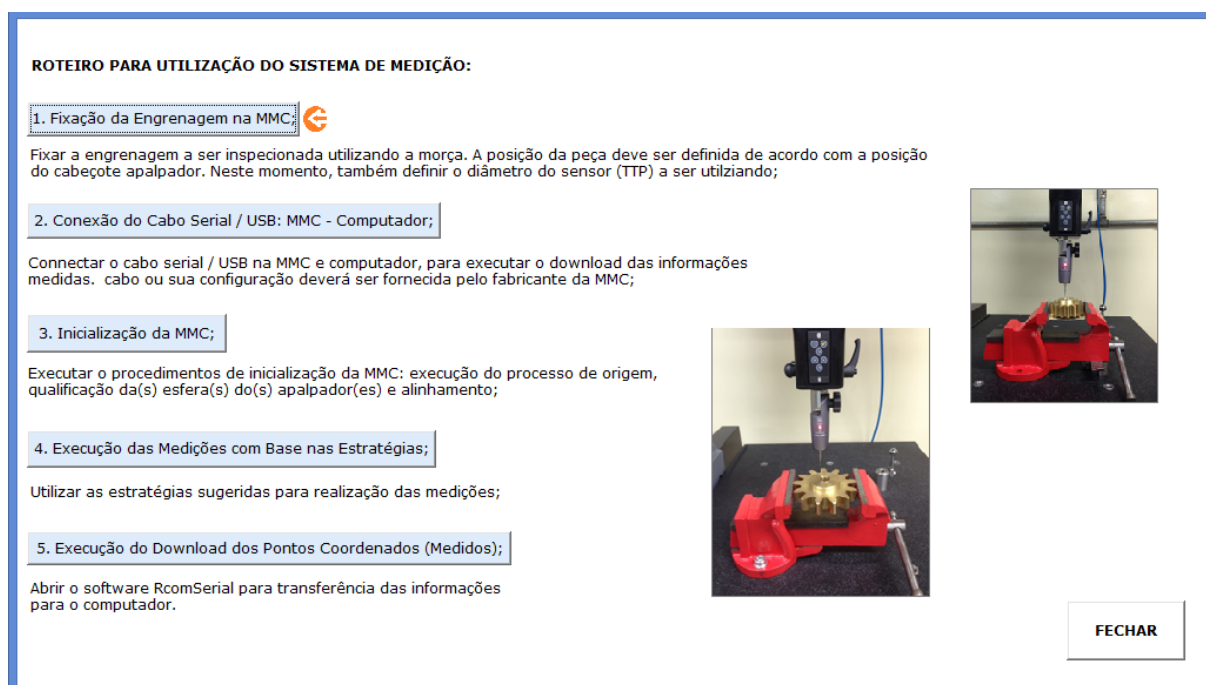


Figura 4.16 – Tela de instruções para os operadores da SIENG – MMC

A Figura 4.17 apresenta a tela para definição de parâmetros pertinentes ao processamento do sistema computacional, que é aberta ao clicar no botão Iniciar Medições, da Figura 4.15. Nesta tela é necessário informar:

1. Se os dados coletados são oriundos de Simulação ou de MMC (seta vermelha na tela), pois geralmente as informações das máquinas manuais são armazenadas em

arquivo com sufixo **.txt** numa configuração particular, enquanto os dados de simulação são gravados em arquivo Excel (**.xls**);

2. O módulo da engrenagem que se deseja inspecionar, podendo variar de 1 a 10 mm (seta verde da tela);

3. O número de dentes da peça, para que seja gerado um perfil teórico correspondente ao que está sendo medido (seta preta da tela);

Ainda com relação a Figura 4.17, ao acessar o botão Ferramentas (seta marrom da tela), será exibida a plataforma na qual constará a relação existente entre o número da ferramenta de usinagem (fresa) e o número de dentes da engrenagem.

Uma vez inserida todas as informações solicitadas pelo *software*, pode-se pressionar o botão Carregar Plataforma (seta azul da tela), confirmando as informações que foram inseridas.

Figura 4.17 – Tela para definição de parâmetros na SIENG – MMC

Após preencher as informações de entrada na tela da Figura 4.17, a SIENG – MMC realiza o processamento abrindo a plataforma correspondente àqueles dados. Na Figura 4.18 é ilustrada o painel desenvolvido para análise do perfil evolvente de engrenagens com módulo 4 mm. Nesta última, informações do módulo selecionado e a

quantidade de pontos coordenados que devem ser capturados na superfície da peça são apresentadas (seta azul da tela).

Continuando a análise da tela ilustrada na Figura 4.18, torna-se necessário inserir dados e pressionar determinados botões para que as informações sejam processadas e os resultados apresentados em suas respectivas caixas de texto. Para esta etapa, ações que devem ser tomadas, respeitando a ordem da numeração que segue:

1. Digitar a quantidade de pontos que foram coletados durante a inspeção do perfil, uma vez que nesta tela consta a informação do intervalo de pontos de controle possíveis de serem capturados, para o módulo em questão. Cada intervalo foi definido durante os procedimentos de simulação, pois operadores mais experientes podem optar pelo número mínimo de pontos e, conseqüentemente, reduzir o tempo de medição (seta laranja da tela);

2. Selecionar os arquivos do perfil lateral esquerdo e direito do dente da engrenagem que se pretende analisar, sendo os nomes dos arquivos exibidos nas respectivas caixas de texto. Nestes arquivos constarão as coordenadas capturadas durante o procedimento de medição (seta verde da tela);

3. Pressionar o botão Calcular Erro (seta cinza da tela). Após este procedimento as informações serão processadas e as respostas desta operação serão exibidas nas caixas de texto que constam na tela. Apontado na Figura 4.18, os referidos espaços exibirão os resultados referente ao erro da curva *NURBS*, em μm , e os valores do parâmetro peso do modelo matemático (seta marrom da tela);

4. Para erros maiores do que os definidos na programação, ajustes na curva *NURBS* poderão ser realizados acessando o botão Ajustar Pesos. Anteriormente a esta ação o operador poderá selecionar o arquivo a ser alterado, Arquivo 1 ou Arquivo 2, que correspondem, respectivamente, aos perfis lateral esquerdo e direito do dente da engrenagem (seta amarela da tela). A referida operação é realizada separadamente, visto que o metrologista poderá pecar na inspeção de apenas um dos dois perfis do dente da engrenagem. Essa metodologia foi definida visando um tempo reduzido de processamento. Os novos valores de pesos (w_i) calculados serão atualizados nas respectivas caixas de texto;

5. Após todos os ajustes pertinentes, deve-se clicar no botão Comparação, da plataforma da Figura 4.18. Ao acessá-lo, uma rotina de programação será executada calculando Desvio Total de Perfil (F_a) para ambos os lados inspecionados, exibidos na

tela como Desvio de Perfil 1 e Desvio de Perfil 2, correspondendo ao lado esquerdo e direito do dente (seta de cor preta da tela).

As Figuras 4.19 e 4.20 ilustram, respectivamente: a tela da interface SIENG – MMC apresentando os resultados de erro da curva *NURBS* juntamente com o desenho gráfico do perfil, usando a *NURBS*; e os valores de desvios de perfil da engrenagem com os gráficos pertinentes a estes resultados. A partir dos dados fornecidos pelo sistema computacional, o profissional poderá aprovar ou descartar a peça fabricada, com base no projeto fornecido pela empresa.

Para aquisição e boa operação da plataforma SIENG – MMC, torna-se necessário fornecer um treinamento aos profissionais que a utilizarão, indo desde os procedimentos inicialização da máquina, como por exemplo, a definição do sistema de coordenadas máquina-peça, inspeção da peça e *download* dos dados, até a prática de operacionalização da plataforma.

INFORMAÇÕES:

Módulo selecionado: $m = 4 \text{ mm}$;

Inspeção do perfil $m = 4 \text{ mm}$: Operador, capturar de 10 a 12 pontos coordenados;

Digite a quantidade de pontos que serão coletados:

Arquivo 1:

Arquivo 2:

Ajustar Pesos: ☐ Arquivo 1 ☐ Arquivo 2

Comparação: ☐

Calcular Erro

DESVIO DE PERFIL 1:

DESVIO DE PERFIL 2:

Erro (micro m)	Pesos
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0

Fechar

Figura 4.18 – Tela da SIENG – MMC para análise do perfil evolvente de engrenagens com de módulo igual a 4 mm

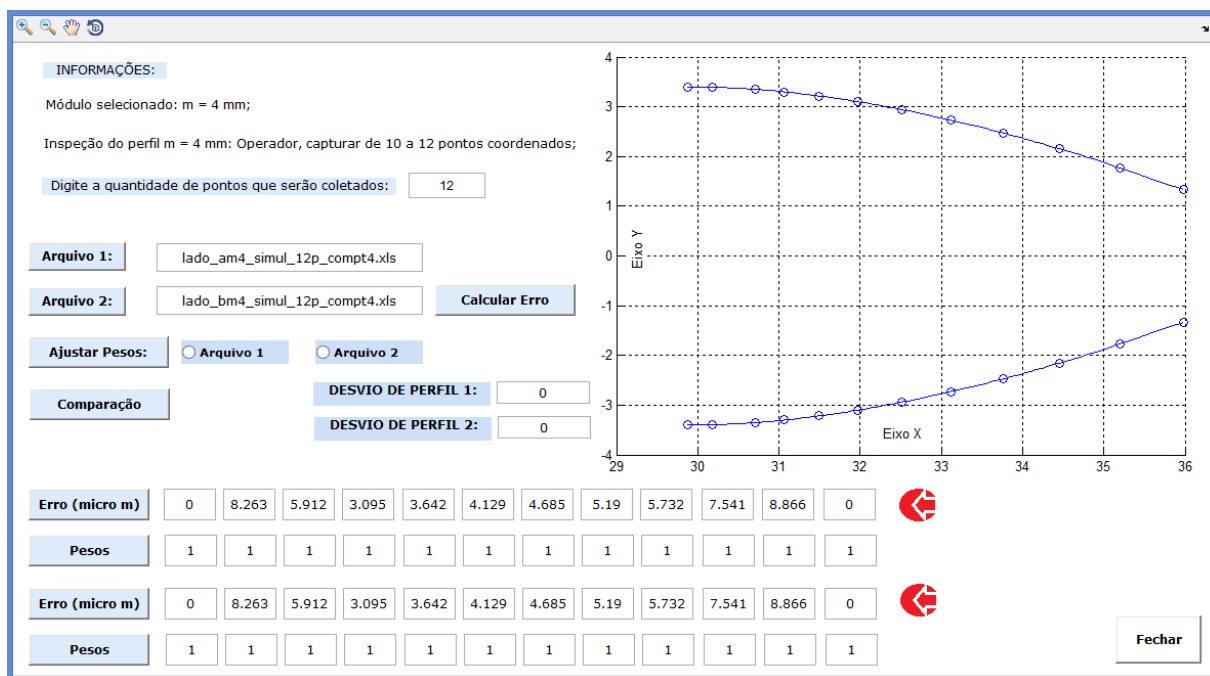


Figura 4.19 – Tela da SIENG – MMC ilustrando os resultados dos erros *NURBS* para engrenagem de módulo 4 mm

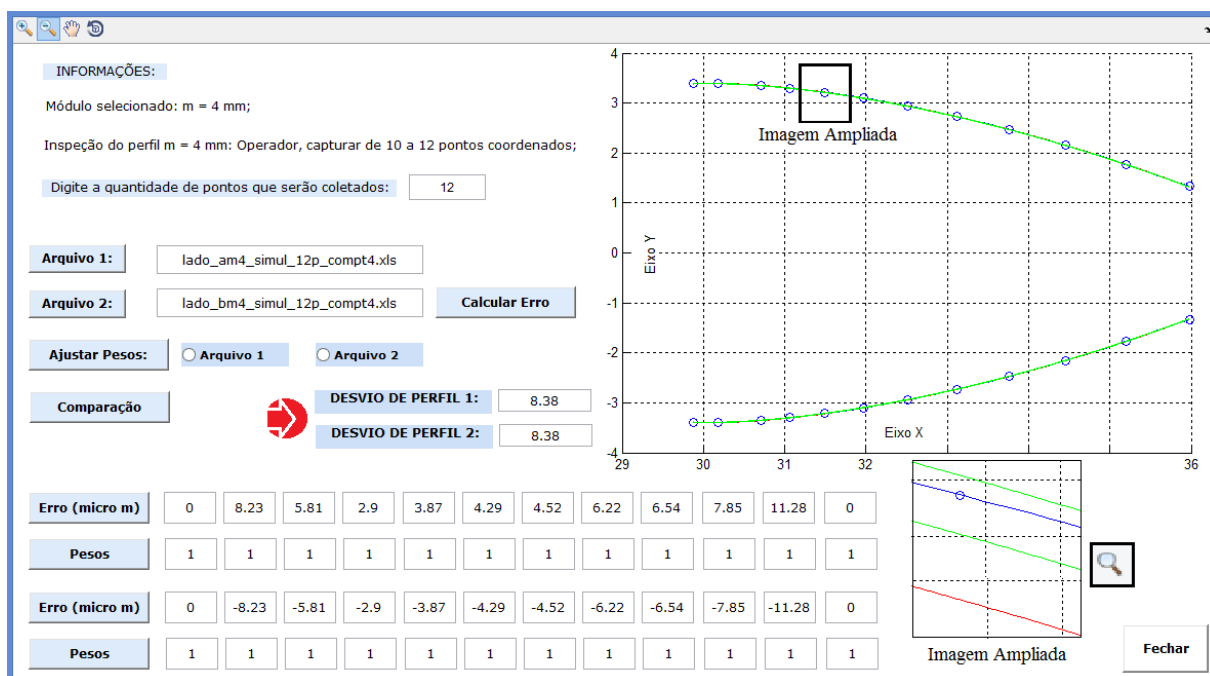


Figura 4.20 – Tela da SIENG – MMC ilustrando os resultados de desvio de perfil (F_α) para engrenagem de módulo 4 mm

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das informações dos pontos coordenados simulados no *software* computacional Matlab[®] e fazendo o uso do modelo matemático *NURBS*, foram traçadas estratégias para inspeção e digitalização do perfil evolvente de engrenagens cilíndricas de dentes retos. Para realização destes procedimentos, apresentou-se a metodologia para geração de curvas utilizando a ferramenta *NURBS*, mais especificamente a geração do perfil evolvente, além da metodologia para definição das estratégias de medição de perfis evolventes com módulos de 1 a 10 mm. Como ponto de partida para as análises, foi selecionado um perfil evolvente ideal com as seguintes características: $m = 4$ mm, $Z = 16$ e ângulo de pressão = 20° , simulando pontos coletados por uma MMC. De posse destes dados da curva, a evolvente *NURBS* foi plotada e comparada com o modelo ideal, para só então ser calculado o erro. Análises previamente realizadas levaram a definir os valores de Erro Máximo da curva *NURBS*, que é considerado parte de erro do sistema, a partir do módulo da engrenagem. Após os procedimentos de comparação e ajuste para a peça com as características supracitadas (engrenagem m4), que relaciona a quantidade de pontos com o erro aceitável, o mesmo foi aplicado para os demais módulos. A metodologia para alteração automática do parâmetro peso w_i das curvas *NURBS* foi descrita e apresentada em forma de diagrama de fluxo. Além disso, uma demonstração da alteração automática do parâmetro peso w_i e correção dos valores de erros foram exibidas, visando validar o método desenvolvido neste trabalho. Também foi apresentada uma análise dos desvios total de perfil ($F\alpha$) de acordo com a Norma ISO 1328, a partir dos dados simulados. Por fim, apresentada a interface SIENG – MMC desenvolvida com o objetivo de orientar o metrologista na operação de inspeção e análise de dados.

CAPÍTULO V

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS, RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 INTRODUÇÃO

Medições de peças mecânicas realizadas em ambiente industrial, sob condições bem menos controladas do que as encontradas em laboratórios de metrologia, diferença entre operadores, características do mensurando e outros aspectos, são fatores de influência que podem levar a incerteza do processo de medição.

Dentre os vários sistemas de medição que podem ser utilizados para inspeção do perfil evolvente de engrenagens cilíndricas, como por exemplo, as máquinas de medição dedicada, o que mais se encontra nas indústrias brasileiras, de acordo com Silva (2011), são as MMCs que utilizam medição por contato. A utilização de MMCs manuais que utilizam sensores TTP (*Touch Trigger Probes*) para obtenção de curvas evolventes requer boa habilidade do operador e uma estratégia de medição, para nortear a coleta de pontos coordenados. Apesar de se ter uma maior coleta de dados quanto se é utilizado um cabeçote que permite o escaneamento do perfil da engrenagem (*laser* ou por contato), grande parte das indústrias que realizam o controle dimensional de suas peças mecânicas não possuem estes equipamentos em função do custo ser elevado.

Segundo Souza *apud* Gemaque (2004), *softwares* dos mais variados têm sido desenvolvidos e fazem das MMCs uma forte concorrente para medições de superfícies complexas e engrenagens, podendo citar como exemplo o *GearPak*. Ainda de acordo com este autor, as vantagens de se utilizar uma MMC no controle dimensional e geométrico de engrenagens são as seguintes: flexibilidade e agilidade da máquina; fornecem incertezas de medição compatíveis com algumas classes de engrenagens; e máquina não dedicada somente à inspeção de engrenagens, servindo para medição de outras peças com geometrias complexas.

Com a finalidade de avaliar e validar a metodologia para inspeção de perfis evolventes de engrenagens, a partir dos pontos coordenados capturados sobre a superfície da peça, procedimentos experimentais foram planejados e executados. Por meio dos resultados destas medições, a estratégia para alteração automática do parâmetro peso w_i também foi aplicada em casos específicos, nos quais os valores de erros excederam aos definidos em programação. As estratégias apresentadas no Capítulo IV tiveram resultados satisfatórios, porém utilizando dados oriundos de simulações computacionais. Nesta seção, para as análises dos dados e apresentação dos resultados, utilizou-se a plataforma SIENG – MMC.

Para os procedimentos experimentais, engrenagens cilíndricas de dentes retos foram usinadas. Na preparação dos blanques um torno mecânico universal de marca NARDINI 500 ES foi utilizado, e no processo de fresagem usou-se uma Fresadora-Ferramenteira Diplommat 3001. O processo é ilustrado na Figura 5.1. Este primeiro trabalho foi realizado no Laboratório de Tornearia do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), Campus João Pessoa.



Figura 5.1 – Processo para fabricação de engrenagens

Para confecção de engrenagens, também se pode contar com a colaboração de uma empresa nacional, que tem sua sede na cidade de Recife, PE, e filiais em João Pessoa (PB), Natal (RN) e São Luís (MA). A empresa colaboradora atua a mais de 24 anos no mercado nas áreas de usinagem e caldeiraria, possuindo como um de seus instrumentos de controle de qualidade uma Máquina de Medição por Coordenadas manual, exatamente igual ao modelo utilizada neste trabalho de tese, na qual é conhecida na empresa como Medidor Tridimensional TESA, ilustrado na Figura 5.2. Segundo o supervisor da área de controle de qualidade, a empresa não emite certificado

de desvios de perfil de engrenagens cilíndricas justamente por possuírem uma MMC manual, podendo controlar/inspecionar numa peça apenas valores de diâmetro externo e do furo de centro.

De acordo com Brito (1999), professor da Fundação de Ensino Superior de São João Del Rei, do Departamento de Engenharia Mecânica, em um de seus trabalhos de consultoria necessitou-se de engrenagens para utilização em sistemas de precisão, porém, das cinco empresas contatadas para confecção de tais peças, apenas uma delas fornecia o certificado de desvios de engrenagens.



Figura 5.2 – Máquina tridimensional *TESA* pertencente à empresa colaboradora

Inicialmente, para realização dos testes experimentais três engrenagens foram utilizadas, as quais são mostradas na Figura 5.3. A Tabela 5.1 apresenta as principais características destas engrenagens. Objetivando avaliar o Desvio Total de Perfil da evolvente destas engrenagens, comparações entre os perfis evolventes teóricos e medidos foram realizadas, de acordo com a norma ISO 1328. Convém ressaltar que a engrenagem A foi gentilmente cedida por Silva (2011), e as engrenagens B e C foram fabricadas pela empresa colaboradora.

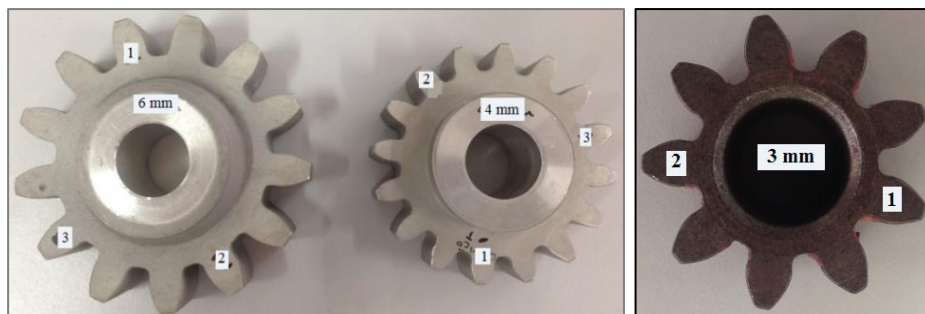


Figura 5.3 – Engrenagens utilizadas nos testes experimentais

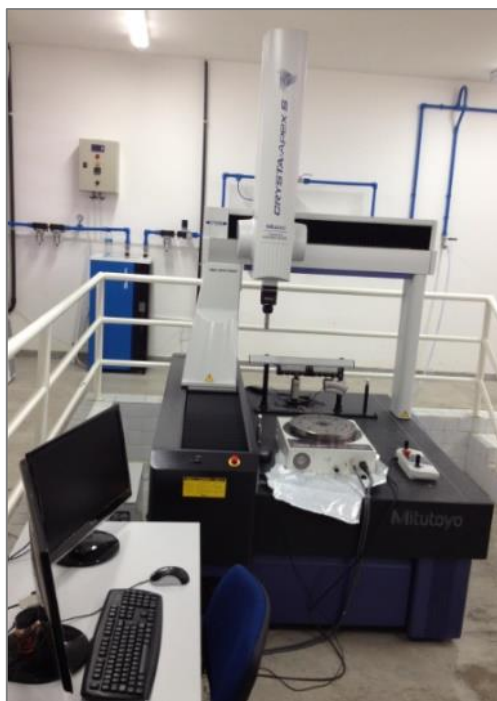
Tabela 5.1 – Características das engrenagens utilizadas

Especificações / Peças	Módulo (m)	Número de dentes (Z)	Ângulo de Pressão (ϕ)	Material
Engrenagem A	3 mm	9	25°	Aço
Engrenagem B	4 mm	16	20°	Alumínio
Engrenagem C	6 mm	13	20°	Alumínio

Tendo em vista a não disponibilidade dos certificados de Desvios Total de Perfil (F_α) das engrenagens pelos fabricantes, serão apresentados no próximo item os procedimentos realizados para processo de qualificação das engrenagens, no qual foi realizado no Laboratório de Engenharia de Precisão (LEP), da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Após a qualificação, as engrenagens foram inspecionadas utilizando uma MMC manual, do Instituto Federal da Paraíba (IFPB).

5.2 QUALIFICAÇÃO DAS ENGRELAGENS

Uma vez que os certificados de desvios não acompanharam as engrenagens A, B e C, estas foram qualificadas com base no Desvio Total de Perfil (F_α), utilizando uma Máquina de Medição por Coordenadas *Crysta-Apex S 7106* CNC, equipada com o sensor apalpador SP25M, como pode ser vista na Figura 5.4a. Sensores do tipo visão de máquina e *laser* também integram a máquina supracitada. A Figura 5.4b ilustra uma imagem mais detalhada dos sensores.



(a)



(b)

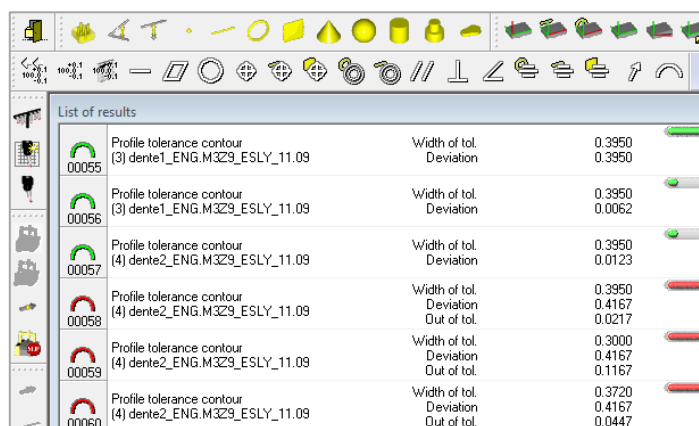
Figura 5.4 – (a) MMC *Crysta-Apex S 7106 CNC* (b) Sensores: *touch trigger*, tipo visão de máquina e *laser*

A MMC apresentada na Figura 5.4a é de alta exatidão e o sensor SP25M permite fazer um escaneamento contínuo do perfil evolvente de todos os dentes da engrenagem, de forma automatizada e rápida. O *software* da MMC CNC possibilita a comparação de um arquivo CAD, que contém o perfil teórico da evolvente, com o perfil medido, sendo possível determinar, segundo a ISO 1328, o dente que apresentou o maior valor de desvio de perfil.

5.2.1 Inspeção e qualificação das engrenagens

Anteriormente a execução dos procedimentos de inspeção do perfil e qualificação das engrenagens, independente da máquina de medição a ser utilizada, torna-se necessário seguir os protocolos de inicialização da MMC. Em MMCs automáticas, a qualificação de uma esfera e/ou posicionamento do sensor é realizada apenas uma vez, tendo em vista que tais informações são armazenadas em sua memória, caso este que não acontece nas máquinas manuais.

Seguindo necessariamente a ordem de acionamento da MMC automática e execução do *software* computacional MCOSMOS deu-se início os procedimentos. De acordo com Lima Jr. (2007), o MCOSMOS integra todos os sistemas computacionais em um único sistema, no qual o programa genérico é o principal e os demais são os módulos dentro deste, em que todos utilizam os mesmos sistemas de coordenadas e banco de dados. A Figura 5.5 ilustra o *menu* do referido *software* computacional utilizado na *Crysta-Apex S 7106*, do Laboratório de Engenharia de Precisão.



List of results			
00055	Profile tolerance contour (3) dente1_ENG.M329_ESLY_11.09	Width of tol. Deviation	0.3950 0.3950
00056	Profile tolerance contour (3) dente1_ENG.M329_ESLY_11.09	Width of tol. Deviation	0.3950 0.0062
00057	Profile tolerance contour (4) dente2_ENG.M329_ESLY_11.09	Width of tol. Deviation	0.3950 0.0123
00058	Profile tolerance contour (4) dente2_ENG.M329_ESLY_11.09	Width of tol. Deviation Out of tol.	0.3950 0.4167 0.0217
00059	Profile tolerance contour (4) dente2_ENG.M329_ESLY_11.09	Width of tol. Deviation Out of tol.	0.3000 0.4167 0.1167
00060	Profile tolerance contour (4) dente2_ENG.M329_ESLY_11.09	Width of tol. Deviation Out of tol.	0.3720 0.4167 0.0447

Figura 5.5 – Menu do *software* MCOSMOS da MMC *Crysta-Apex S 7106*

Para tarefa de inspeção, as engrenagens foram fixadas sobre uma base cilíndrica, na qual a mesma encontrava-se em cima da mesa metrológica da MMC. A Figura 5.6 ilustra uma engrenagem a ser inspecionada.

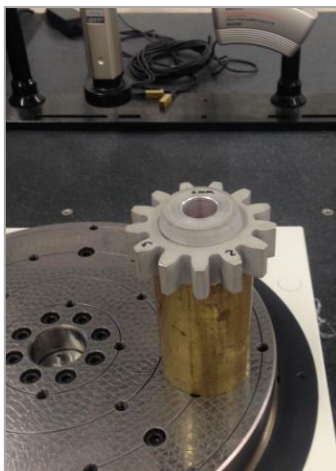


Figura 5.6 – Engrenagem posicionada para inspeção usando a MMC CNC

Como padrão, a MMC *Crysta-Apex S 7106* CNC define o plano e a origem do sistema de coordenadas na extremidade superior esquerda da máquina, porém é possível reposiciona-los e defini-los na engrenagem. Neste sentido foi determinado:

1. **O plano:** para alinhamento MMC com peça, capturando quatro pontos na superfície da engrenagem;
2. **A origem:** deslocada para furo central da engrenagem, capturando quatro pontos no interior do referido furo;

A Figura 5.7 indica aproximadamente o local em que os pontos foram coletados, sendo tais pontos na cor azul e verde para definição do plano e origem, respectivamente.

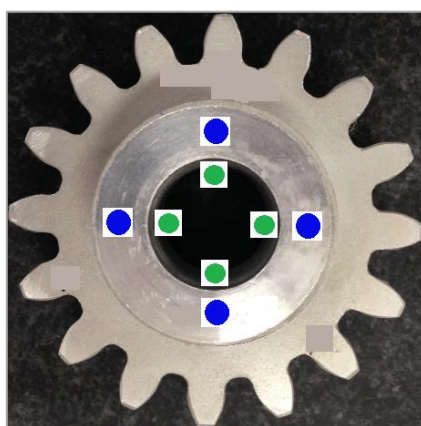


Figura 5.7 – Aquisição dos pontos coordenados para definição do plano e origem da MMC

Destaca-se que durante os procedimentos experimentais foi necessário desenvolver uma estratégia para realização do alinhamento do sistema de coordenadas da máquina com o sistema de coordenadas da peça, no sentido de garantir coerência nos

resultados de avaliação dos desvios de perfil. Tal procedimento foi elaborado tendo em vista a comparação dos contornos das peças inspecionadas com os seus respectivos desenhos CAD, considerados como teóricos, nos quais necessitavam ser ajustados de maneira a existir uma sobreposição dos desenhos. Sendo assim, além de transladar a origem do sistema de coordenadas para o furo central da engrenagem, se fez necessário posicionar o eixo horizontal (X) passando no eixo de simetria longitudinal de um dos dentes da engrenagem, como pode ser observado na Figura 5.8. Esse procedimento pode ser alcançado pelo seguinte algoritmo:

1. Capturar dois pontos no lado esquerdo do perfil evolvente do dente para criação de uma primeira linha. Na Figura 5.9a é possível observar os pontos e linha representados na cor azul. A Figura 5.9b ilustra a tela do *software* MCOSMOS sendo fiel as atividades de medição. Os referidos pontos capturados já têm suas coordenadas predefinidas a depender do módulo da engrenagem;

2. Capturar mais dois pontos no lado direito do dente para criação de mais uma linha, sendo estes elementos representados na Figura 5.9a na cor verde. Percebe-se que as linhas criadas se interceptam em um determinado ponto, no qual corresponde a aproximadamente o centro do perfil;

3. Na interseção das linhas, criar um ponto, determinado na Figura 5.9a de ponto de interseção e, logo após, traçar uma linha entre a origem do sistema de coordenadas e este novo ponto criado;

4. Definir a linha descrita no item 3 como o eixo X da máquina e, automaticamente, cria-se uma nova linha vertical perpendicular a qual será o eixo Y do sistema de coordenadas.

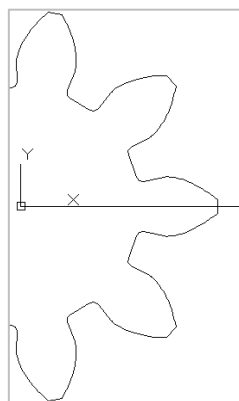


Figura 5.8 – Posicionamento do coordenada horizontal X no eixo de simetria longitudinal de um dos dentes da engrenagem

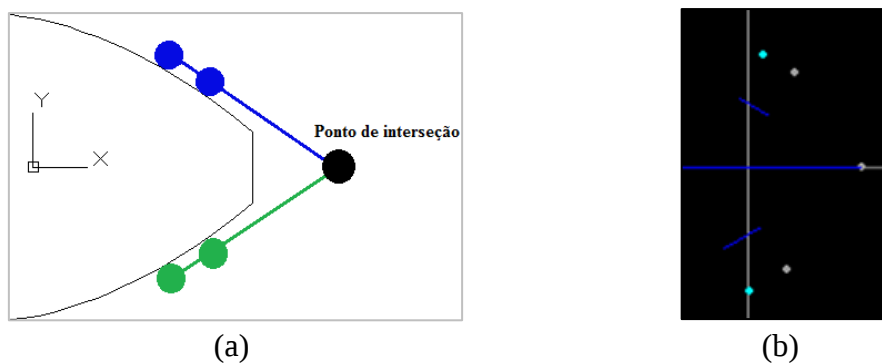


Figura 5.9 – (a) Captura dos pontos para criação das linhas e do ponto de interseção (b) tela do MCOSMOS identificando as atividades de máquina

O algoritmo descrito foi criado no sentido de ajustar/sobrepor os dois desenhos a serem comparados: o contorno das engrenagens e os respectivos desenhos CAD, pois estes desenhos CAD tinham o sistema de coordenadas definidos desta forma.

Efetivado os procedimentos descritos, foi realizado o escaneamento contínuo de todos os dentes das engrenagens A, B e C, para geração dos contornos medidos, ou contornos reais, utilizando o sensor SP25M da *Renishaw*, com esfera de rubi de diâmetro 3 mm. A Figura 5.10a e 5.10b ilustram, respectivamente, o escaneamento da engrenagem e a digitalização do procedimento na tela do MCOSMOS.

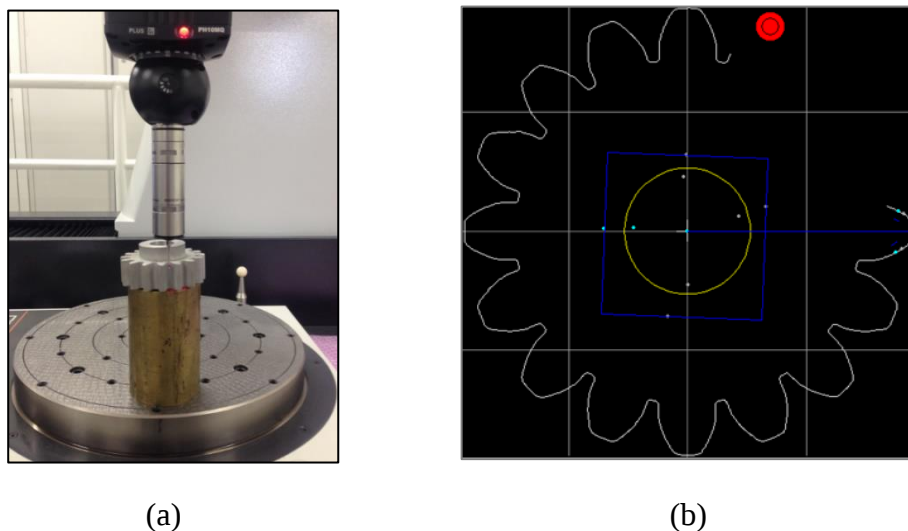


Figura 5.10 – (a) Escaneamento da engrenagem usando o SP25M (b) digitalização da peça no *software* MCOSMOS

Para qualificar as engrenagens de acordo com a ISO 1328, desenhos no *software* computacional CAD *Solid Edge* foram elaborados, com o objetivo de criar os contornos evolventes teóricos e realizar as comparações. O *software* possui uma biblioteca de peças padrão para o desenho de engrenagens, em que o mesmo solicita parâmetros como: diâmetro primitivo, diâmetro de base, diâmetro interno, diâmetro externo, ângulo de pressão e módulo. A Figura 5.11 ilustra alguns dos parâmetros solicitados. Os desenhos foram salvos em extensão **.dxf**, possíveis de serem importados à MMC *Crysta-Apex*. As Figuras 5.12b e 5.12c apresentam os desenhos CAD das engrenagens B e C fabricadas. A engrenagem A, não foi possível de ser desenhada no *software Solid Edge*, pois a mesma tem número de dentes inferior ao que se é possível fabricar com ferramentas convencionais, apresentando na tela do *software* CAD a informação de que não é possível processar os dados de entrada. Para as ferramentas de fabricação de nº 1, fresa de menor número é possível confeccionar engrenagens com o número de dentes variando entre 12 a 13.

Vale (2006) apresenta em sua apostila da disciplina de Desenho de Máquinas, utilizada em aulas da Universidade Federal da Paraíba, uma metodologia para o traçado do desenho de dentes de engrenagens, no qual o método é válido para peças com qualquer ângulo de pressão e número de dentes. No método descrito pelo autor, não é necessário traçar duas evolventes, uma para direita e outra para esquerda, basta fazer um gabarito ou cópia espelhada do primeiro desenho, utilizando o valor de espessuras dos dentes. Por este método a engrenagem A foi desenhada usando o *software* AutoCad, podendo ser vista na Figura 5.12a.

Partindo da necessidade de comparar apenas os perfis dos dentes das engrenagens, antes de importar os arquivos para o *software* da MMC, no sentido de “descongestioná-los”, os desenhos foram editados, excluindo todo conteúdo abaixo do diâmetro de base, parte não interessada às análises, como ilustrado nas Figuras 5.13a, 5.13b e 5.13c.

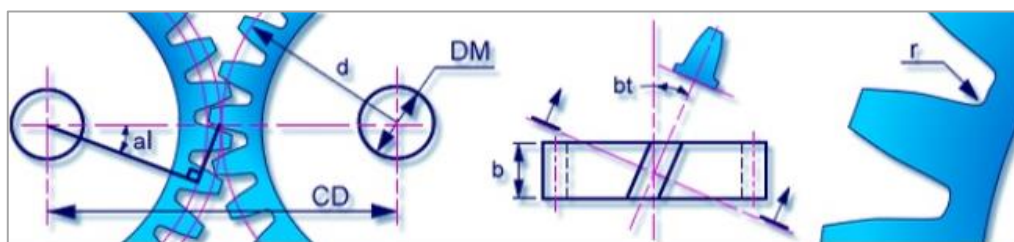


Figura 5.11 – Parâmetros solicitados para criação do desenho da engrenagem usando o *software Solid Edge*

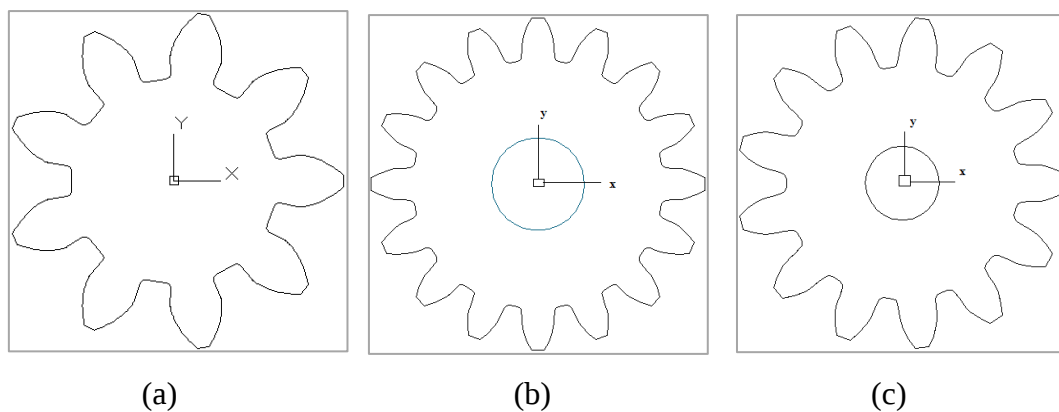


Figura 5.12 – Desenhos CAD das engrenagens (a) engrenagem A (b) engrenagem B (c) engrenagem C

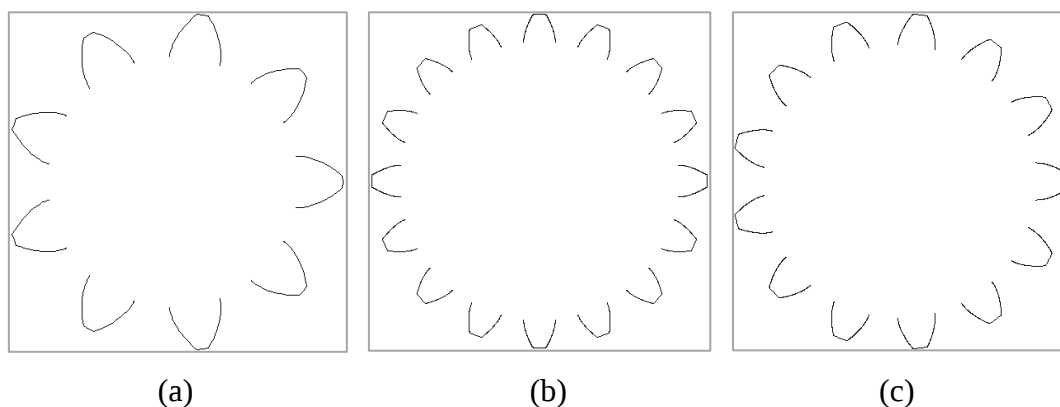


Figura 5.13 – Desenhos CAD dos perfis evolventes das engrenagens (a) engrenagem A (b) engrenagem B (c) engrenagem C

Diante dos contornos dos perfis teóricos e dos perfis medidos, importados na tela do MCOSMOS através do *menu profile tolerance contour*, Figura 5.14a, em que o mesmo solicita para comparação os arquivos armazenadas em memórias pré-definidas, foram realizada as análises para qualificação das engrenagens. Os valores de Desvio Total de perfil (F_a) foram rastreados e identificados ajustando os limites tolerância no *software*, sendo estes limites apresentados na Figura 5.14b pelas linhas de cor verde. A linha de cor azul e traços de cor amarela da Figura 5.14b correspondem, respectivamente: ao perfil teórico e as distâncias pontuais entre o perfil teórico e o perfil medido.

Os procedimentos de qualificação descritos até o momento foram aplicados para a análise de todas as engrenagens.

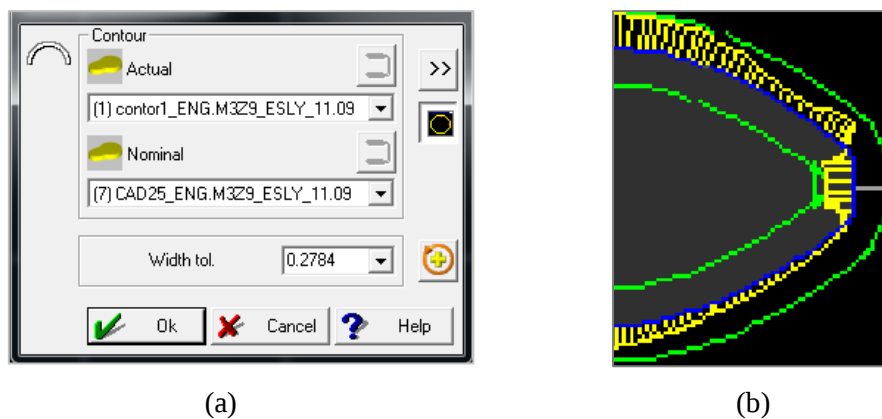


Figura 5.14 – (a) *Menu Profile Tolerance Contour* (b) tela do MCOSMOS com os limites tolerâncias e contornos dos perfis teórico e medido

Como o objetivo desta pesquisa é a aplicação de MMCs manuais para determinação do erro de perfil evolvente de engrenagens segundo a norma ISO 1328, foram considerados três dentes de cada peça analisada, com maiores valores de desvio de perfil, apresentados na Tabela 5.2.

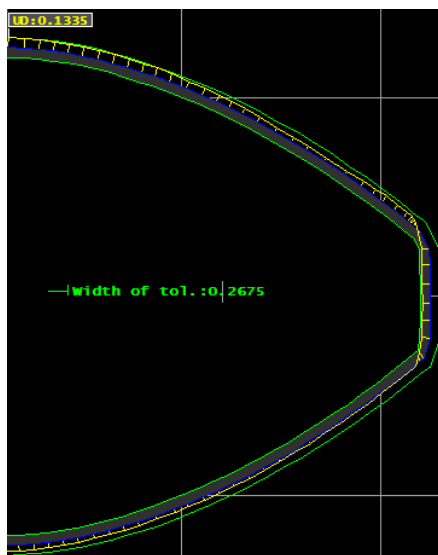
Tabela 5.2 – Qualificação das engrenagens: valores de Desvio Total de Perfil (F_{α})

Engrenagem A	$F_{\alpha D1}$	$F_{\alpha D2}$	$F_{\alpha D3}$
	133,75 μm	125,4 μm	139,2 μm
Engrenagem B	$F_{\alpha D1}$	$F_{\alpha D2}$	$F_{\alpha D3}$
	293,4 μm	319,7 μm	174,5 μm
Engrenagem C	$F_{\alpha D1}$	$F_{\alpha D2}$	$F_{\alpha D3}$
	513,1 μm	617,4 μm	608,0 μm

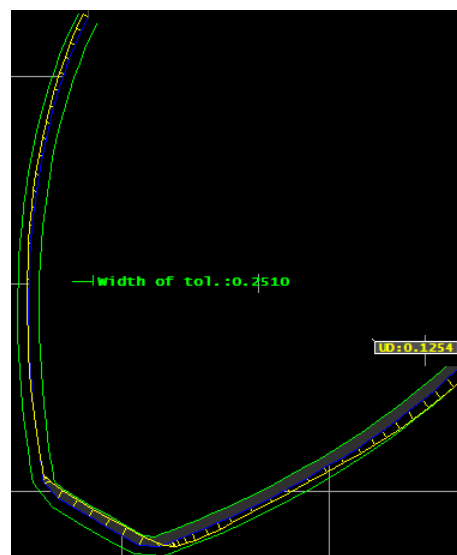
Legenda: $F_{\alpha Dn}$ – Desvio Total de Perfil do dente n; (n = 1, 2 e 3)

É importante destacar que nenhuma das engrenagens inspecionadas foram classificadas na norma ISO 1328, pois os erros de perfil foram superiores aos limites estabelecidos pelo grau de qualidade 12. De acordo com os dados da Tabela 5.2, dentre as três engrenagens inspecionadas, a que apresentou melhores resultados foi à engrenagem A, cedida por Silva (2011). Pelos valores de desvios encontrados, acredita-se que tal peça foi fabricada dentro dos graus de qualidade da norma, porém por já ter sido usada e substituída, a mesma sofreu desgastes inerentes ao processo de transmissão de movimento.

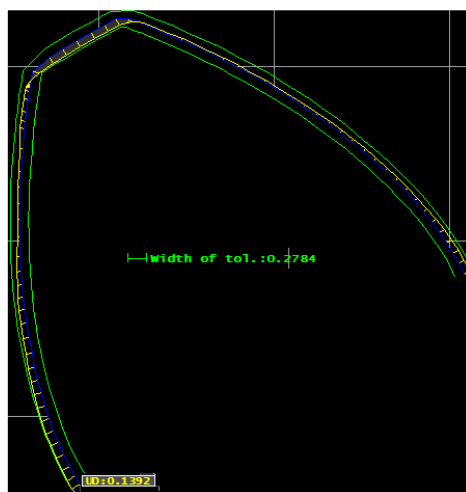
As Figuras 5.15a, 5.15b e 5.15c ilustram a análise de Desvio Total de Perfil (F_α) na tela do *software* da MMC Crysta-Apex S 7106, para os três dentes inspecionados referentes à engrenagem A.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.15 – Definição dos valores de Desvio Total de Perfil da engrenagem A (a) $F_\alpha = 133,75 \mu\text{m}$ para o dente 1 (b) $F_\alpha = 125,4 \mu\text{m}$ para o dente 2 (c) $F_\alpha = 139,2 \mu\text{m}$ para o dente 3

5.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS USANDO MMC MANUAL E NURBS

Após qualificar as três engrenagens A, B e C, e determinado os erros de perfil evolvente, estas foram inspecionadas utilizando uma MMC manual modelo *Micro-Hite 3D*, do Laboratório de Metrologia do IFPB, Campus Cajazeiras, na qual a mesma é equipada com os seguintes acessórios:

1. Cabeçote manual, ajustado por um parafuso;
2. Sensor Apalpador 3D *touch trigger* – TESASTAR-i, com esferas de rubi de diâmetros 2, 3 e 5 mm;
3. Mesa metrológica;
4. Unidade de controle integrada a MMC.

A Figura 5.16 ilustra a MMC *Micro-Hite 3D* com seus respectivos acessórios, nos quais são representados na figura pelos correspondentes números de citação do parágrafo anterior. A Figura 5.17 ilustra o sensor *touch trigger* e as ponteiros disponíveis em laboratório.

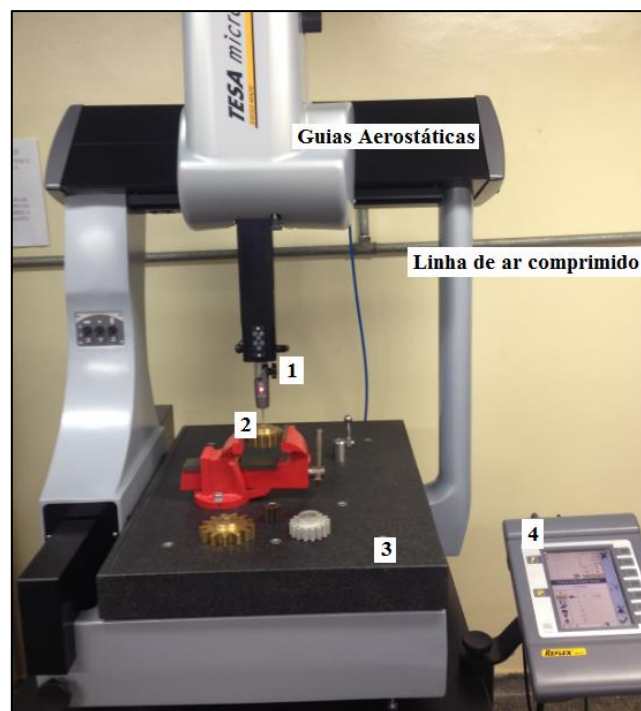


Figura 5.16 – Máquina de Medição por Coordenadas modelo *Micro-Hite 3D*



Figura 5.17 – Sensor *touch trigger* e ponteiros disponíveis para inspeção

Para transmissão das informações do sistema de controle MMC para o computador pessoal foi necessário confeccionar um cabo serial DB9, uma vez que o mesmo não constava como acessório da máquina. As configurações do cabo serial foram disponibilizadas pela empresa fabricante e são apresentadas na Tabela 5.3. O *software* utilizado para leitura dos dados via comunicação serial RS232 foi o RComSerial, na versão 1.2 e está disponível gratuitamente na internet. As Figuras 5.18a e 5.18b ilustram o cabo DB9 e o *software* citado.

Tabela 5.3 – Configuração do cabo serial DB9 para MMC manual *Micro-Hite 3D*

Configuração do cabo serial DB9	
Lado A	Lado B
Número no conector – cor do condutor	Número no conector – cor do condutor
1 - Off	1 - Off
2 - Amarelo	2 - Verde
3 - Verde	3 – Amarelo
4 - Laranja	4 – Azul
5 - Cinza	5 - Cinza
6 - Azul	6 – Laranja
7 - Vermelho	7 – Preto
8 - Preto	8 – Vermelho
9 – Off	9 - Off

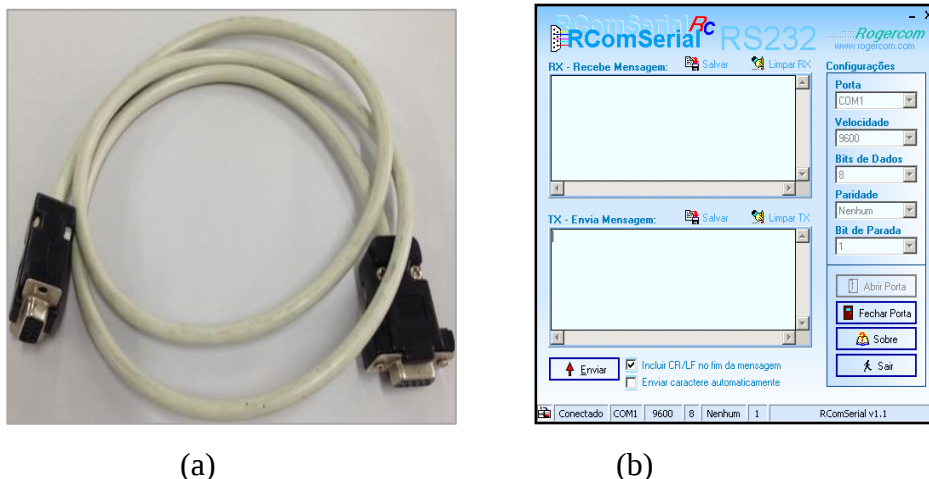


Figura 5.18 – (a) Cabo serial DB9 (b) *software* RComSerial versão 1.2

Anteriormente à apresentação dos testes de inspeção dos perfis evolventes usando o modelo *NURBS* e a MMC manual, serão expostos os procedimentos pertinentes à inicialização da máquina para medição de engrenagens, além da maneira correta do contato sensor-peça e a influência dos diâmetros das esferas na medição.

5.3.1 Inicialização da MMC *Micro-Hite* 3D e Influência do Contato Sensor-Peça no Procedimento de Inspeção de perfil evolvente

Para dar início às medições usando a MMC manual, procedimentos de inicialização foram necessários, como: execução do processo de origem, qualificação da(s) esfera(s) do(s) apalpador(es) e alinhamento dos sistemas de coordenadas. Diferentemente das MMCs automáticas, a qualificação das esferas em máquinas manuais devem ser realizadas sempre que a MMC for acionada, a esfera substituída ou cabeçote rotacionado.

Para execução do processo de origem e qualificação da esfera usada no apalpador, o operador deve seguir as instruções que constam na tela do sistema de controle da MMC *Micro-Hite* 3D. As Figuras 5.19 e 5.20 ilustram, respectivamente: a solicitação e execução do processo origem; a efetivação da qualificação da esfera do apalpador usando a esfera padrão da MMC e a tela com um resumo das informações do sensor.

Segundo Gemaque (2004), uma qualificação insatisfatória da esfera do apalpador certamente influenciará nos resultados das medições. Sugere-se, portanto, verificar o erro de forma obtido, admitindo que o mesmo não deva ser maior do que a

parcela constante do erro especificado para a MMC, que para o caso da utilizada neste trabalho é de $3\mu\text{m}$.

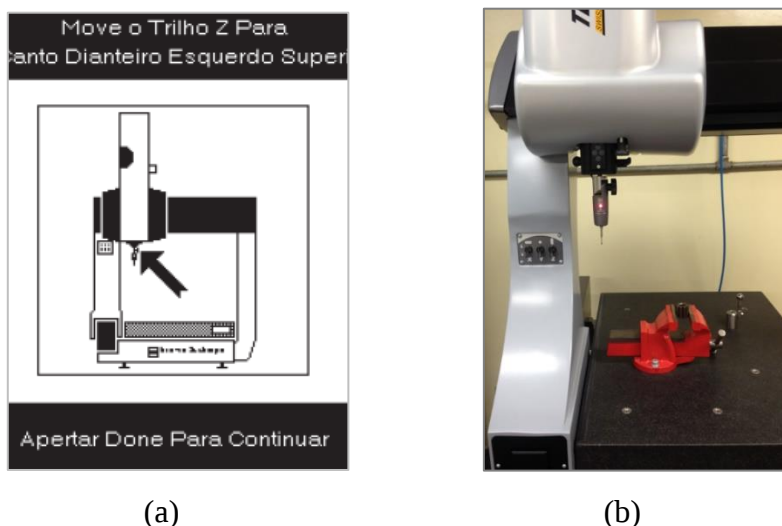


Figura 5.19 – Execução do processo de origem (a) solicitação na tela do sistema de controle da MMC (b) execução na MMC *Micro-Hite 3D*

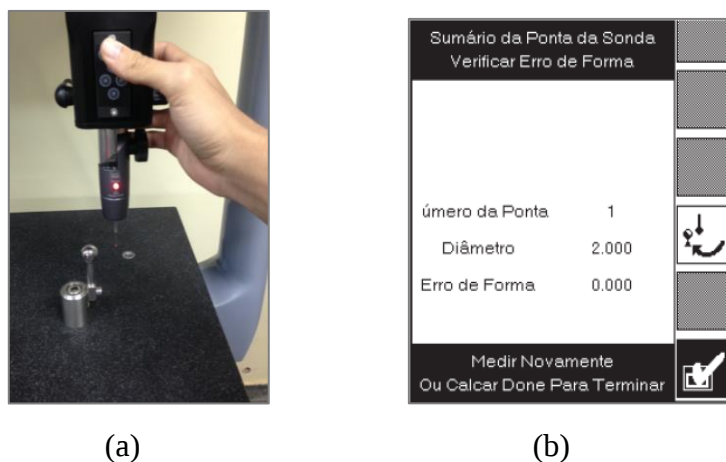


Figura 5.20 – (a) Qualificação da esfera do apalpador *touch trigger* (b) características do sensor

Existem dois tipos de sistemas de coordenadas na medição usando MMC, o sistema de coordenadas da máquina e o sistema de coordenadas da peça, em que estes necessitam ser relacionados. De acordo com Tesa (2004), antes da introdução de *softwares* para medição de coordenadas, as peças eram fisicamente alinhadas paralelamente aos eixos da MMC, de maneira que os referidos sistemas de coordenadas

ficassem paralelos entre si. Quando a peça era redonda ou curva, em vez de quadrada ou retangular, a tarefa de medição era quase impossível.

Com os *softwares* atuais das MMCs torna-se possível medir algumas referências da peça, estabelecer seu Sistema de Coordenadas e relacioná-lo matematicamente ao sistema de coordenadas da máquina. O processo de relacionamento dos dois sistemas de coordenadas é chamado de alinhamento, ilustrado na Figura 5.21.

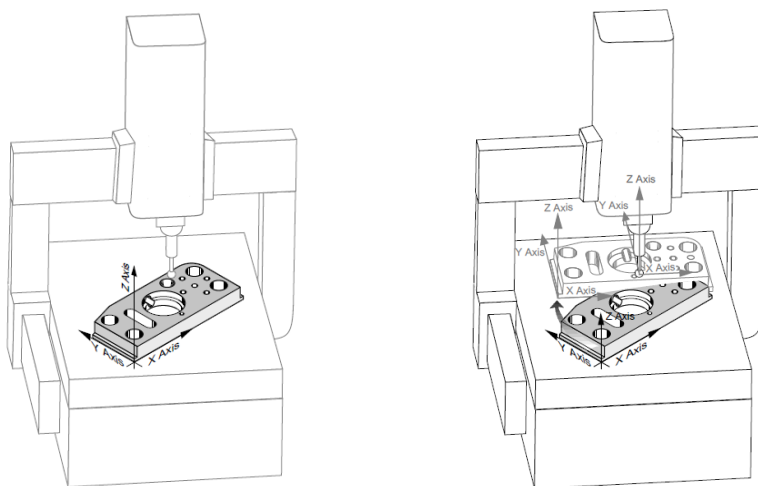


Figura 5.21 – Alinhamento dos sistemas de coordenadas da máquina e da peça

No sentido de manter a fidelidade aos procedimentos de inicialização já apresentados para MMC automática, o plano e origem foram determinados, respectivamente, na superfície da engrenagem e no furo de centro desta peça, coletando quatro pontos para ambos os casos. Para realização dos procedimentos de medição, as peças foram fixadas em um torno de bancada, em que o mesmo encontrava-se sobre a mesa metrológica. A Figura 5.22 ilustra a peça pronta para ser inspecionada.



Figura 5.22 – Engrenagem posicionada para inspeção na MMC manual

A metodologia aplicada no procedimento de qualificação das engrenagens, em que posiciona a coordenada horizontal X no eixo de simetria longitudinal de um dos dentes da peça, também foi aplicada nesta fase experimental.

Devido a limitações do *software* da MMC manual *Micro-Hite 3D* usada neste trabalho, e a ausência de informações em seu manual, seguem abaixo os passos para definição da localização do eixo X. As informações foram repassadas pelo setor técnico da empresa fabricante da máquina e serão descritas acompanhadas de capturas da tela de controle da MMC, no sentido de facilitar o entendimento:

1. Após a criação do plano, definido no *software* como variável A, Figura 5.23a, e concepção da origem no centro da peça, armazenado como variável C, Figura 5.23b, devem-se iniciar os procedimentos para criação das duas linhas, sendo estas geradas pela captura de dois pontos nos lados esquerdo e direito do dente da engrenagem. Como citado, pontos de contato têm suas coordenadas pré-definidas e estas dependem do módulo da engrenagem;

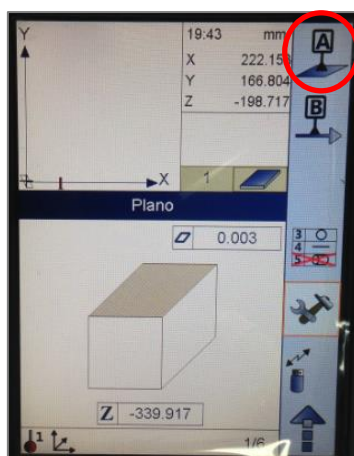
2. Com as linhas já armazenadas na memória da MMC, torna-se possível acessar o *menu*: construções – relações – relacionar, e relacionar as duas linhas, como ilustram as Figuras 5.24a e 5.24b, na qual a máquina determina um ponto na intersecção entre elas. Para o armazenamento do ponto criado na memória do *software*, o mesmo deve ser definido como variável C. Torna-se importante destacar que a origem, descrita no item 1, já tinha sido definida nesta variável, mas esse artifício foi necessário para o armazenamento do ponto de intersecção entre as duas linhas na memória da máquina;

3. Uma vez armazenado o ponto de intersecção, deve-se novamente criar um círculo no furo de centro da engrenagem e novamente defini-lo com C, sendo este voltando a ser origem do sistema de coordenadas;

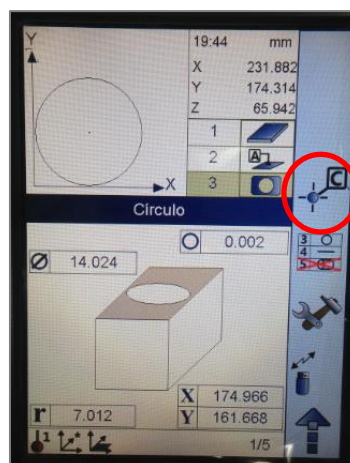
4. Após tais procedimentos, cria-se uma linha entre a origem do sistema de coordenadas e o ponto descrito no item 2. A Figura 5.25a e 5.25b ilustra o *menu* e a linha construída;

5. A linha do item 4 deve ser definida como B, coordenada horizontal X, em que automaticamente o eixo vertical perpendicular Y é criado.

O algoritmo descrito foi aplicado para todos os procedimentos de inspeções das engrenagens, no sentido de se ter uma coerência durante as comparações dos perfis teóricos projetados no *software* CAD e os medidos.

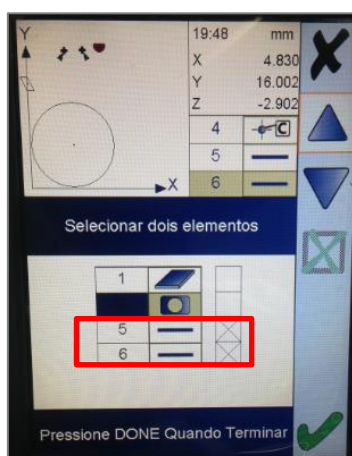


(a)

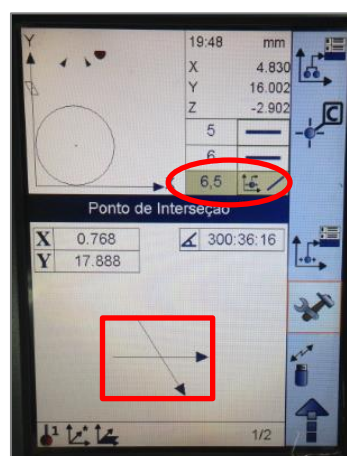


(b)

Figura 5.23 – (a) Definição do plano na variável A (b) definição da origem na variável C

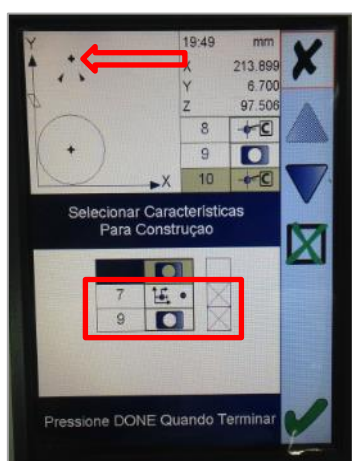


(a)

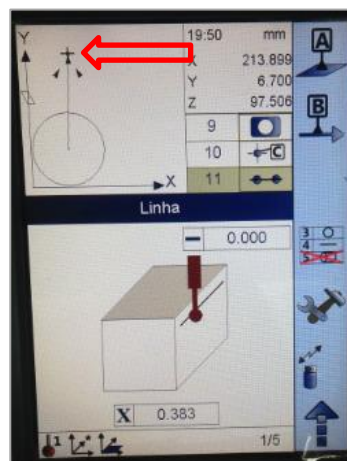


(b)

Figura 5.24 – (a) Seleção das duas linhas criadas (b) ponto de interseção entre as duas linhas



(a)



(b)

Figura 5.25 – (a) Menu para construção da linha entre a origem e ponto de interseção entre as duas retas, coordenada X (b) linhas construída e apresentada na tela da unidade de controle

No que concerne às medições com sensores ponto a ponto, de acordo com os fabricantes de MMCs, medições com *touch trigger probes* devem ser realizadas de forma perpendicular à superfície da peça sempre que possível, uma vez que estas máquinas são projetadas para proporcionar bons resultados nestas condições. Alguns fabricantes permitem uma tolerância de $\pm 20^\circ$ da perpendicular, conforme ilustrado na Figura 5.26.

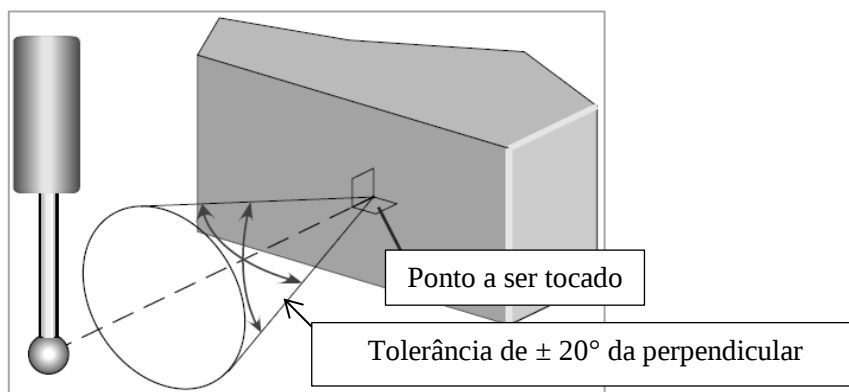


Figura 5.26 – Toque sensor-peça admitindo tolerância de 20° da perpendicular

Para o sucesso e aquisição de bons resultados durante os procedimentos de inspeções do perfil evolvente das engrenagens, tais orientações devem ser seguidas tendo em vista a compensação correta do raio da esfera utilizada na realização das medições, em outras palavras: “torna-se importante deixar claro para MMC manual, em qual eixo de coordenada deve ser compensado o raio da esfera do sensor”, pois o centro da esfera de rubi, no ato da qualificação do sensor, é o centro de medição, como pode ser ilustrado na Figura 5.27.

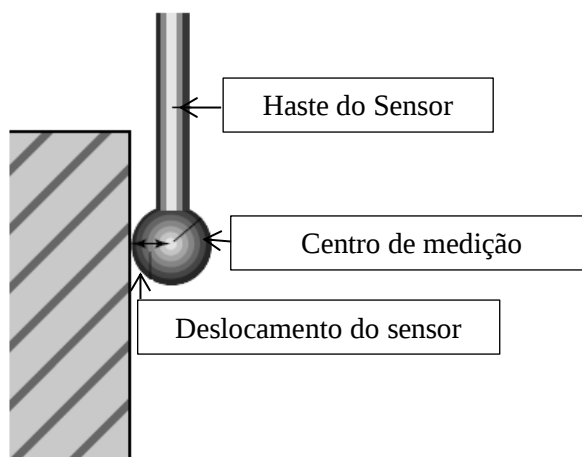


Figura 5.27 – Origem do sistema de coordenadas localizado no centro da esfera de medição

Para inspeção do perfil evolvente de engrenagens usando MMC manual e sensor *touch trigger*, torna-se mínima a possibilidade de o operador alcançar a superfície do dente de forma totalmente perpendicular, uma vez que há leveza de deslocamento dos eixos da máquina, e a utilização da tecnologia dos mancais aerostáticos, além da complexidade de inspeção da forma a ser medida. De modo a facilitar a execução de inspeção, no momento do toque sensor-peça, o deslocamento do sensor foi realizado usando o ajuste fino da MMC, movendo-o apenas na direção X, na direção de compensação do raio da esfera.

Para o caso descrito no parágrafo anterior, o erro de compensação existirá e se somará aos erros inerentes as medições por coordenadas. De acordo com a Figura 5.28, destacam-se três pontos de aquisições de dados em regiões distintas do perfil, exemplificados pelas esferas de cores vermelhas. Como pode ser observado na referida figura, tem-se as coordenadas compensadas fornecidas pela máquina (X_m , Y_m) e as reais coordenadas do contato sensor-peça (X_c , Y_c). Então, quanto mais acentuada a curva, maior a intensidade do erro de compensação, seguindo a ordem de numeração da Figura 5.28: esfera 1; esfera 2 e esfera 3. O referido erro pode ser diminuído com a utilização de ponteiros com esferas menores.

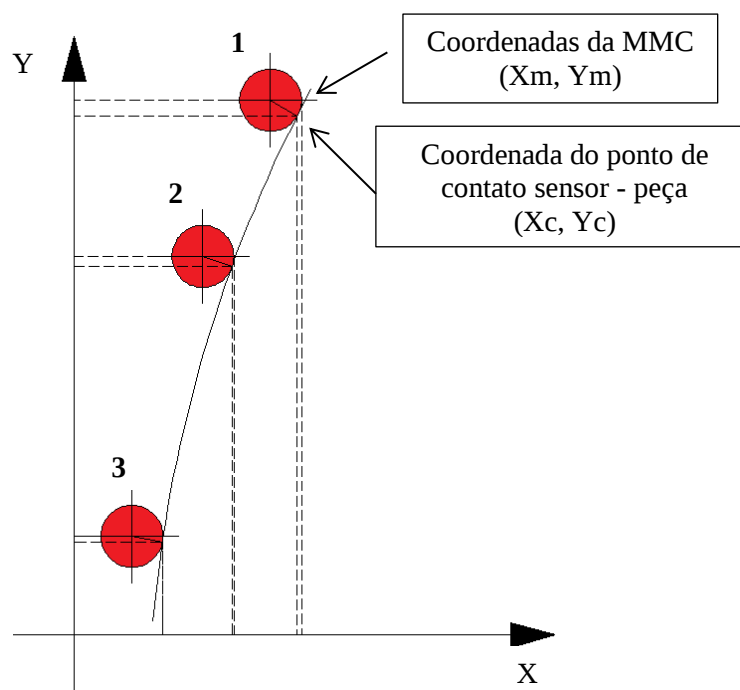


Figura 5.28 – Erros de compensação do raio da esfera na inspeção de perfil evolvente

Com o intuito de minimizar o erro apresentado, tornando-o o mais desprezível possível, utilizou-se a menor esfera de rubi disponível no Laboratório de Metrologia do IFPB, com diâmetro 2 mm.

Com o objetivo de confirmar as informações teóricas expostas neste item, testes foram realizados com as esferas de 2 e 3 mm durante o procedimento de medição para determinação do Desvio Total de Perfil (F_a). Por meio dos valores coletados tornou-se possível comprovar melhores resultados utilizando a esfera de 2 mm.

5.3.2 Teste Experimental para Determinação do Perfil Evolvente de Engrenagens, Usando NURBS e a Metodologia Proposta

Com as engrenagens qualificadas, iniciaram-se os testes experimentais para definição do Desvio Total de Perfil (F_a), no sentido de validar as metodologias e resultados de simulações computacionais apresentados no Capítulo IV.

Para as engrenagens usadas nesse procedimento, foram analisados os dentes que passaram pelo processo de qualificação da MMC automática.

Inicialmente foi inspecionada a engrenagem A. A Figura 5.29 ilustra a engrenagem fixada no torno de bancada sobre a mesa metrológica. Um termômetro de globo foi utilizado para verificação da temperatura ambiente no momento das medições. A descrição dos testes experimentais e análise dos resultados realizados para a engrenagem A será detalhada, tendo em vista que esta servirá com base para apresentação dos resultados das demais engrenagens.



Figura 5.29 – Engrenagem A fixada no torno de bancada, para inspeção

Usando o apalpador *touch trigger*, com esfera de diâmetro 2 mm e material rubi, foram coletados 10 pontos coordenados sobre superfícies de cada um dos lados (esquerdo e direito) dos três dentes, na região do perfil evolvente, totalizando 20 pontos por dente inspecionado. Estes pontos foram àqueles obtidos no processo de simulação do Capítulo IV. As informações das coordenadas são armazenadas no sistema de controle da MMC e descarregadas no computador pessoal via comunicação serial.

Com os valores das coordenadas dos pontos coletados, utilizando o sistema computacional SIENG-MMC, foi gerada a curva *NURBS* para obtenção dos valores de erros relacionados ao primeiro dente, dente 1. O erro é definido como a diferença entre o valor da coordenada do ponto medido e o valor da coordenada definida pelo método *NURBS*. A curva e pontos de controle são mostrados na Figura 5.30. A Tabela 5.4 ilustra os valores de erros dos pontos relacionados aos lados esquerdo e direito da peça. Com o objetivo de analisar a metodologia de alteração do parâmetro peso w_i para valores oriundos de procedimentos práticos, no qual está envolvida a habilidade do operador e outras fontes de desvios, a tabela citada neste parágrafo apresentam os erros com e sem o ajuste dos pesos.

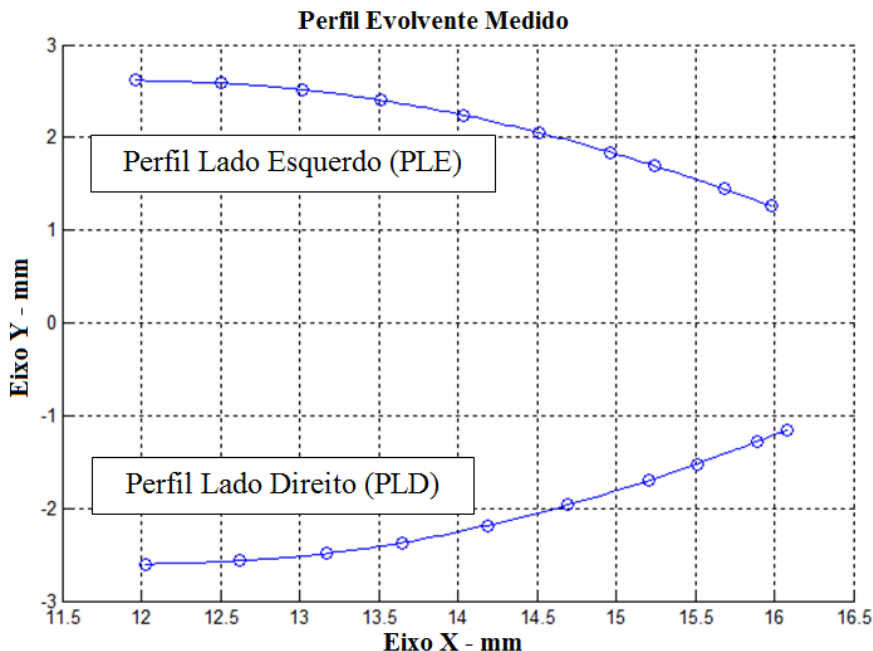


Figura 5.30 – Curva *NURBS* e pontos de controle referente à: engrenagem A e dente 1

Os mesmos procedimentos e análises foram realizados para os dentes 2 e 3 da engrenagem A. As Figuras 5.31 e 5.32 ilustram os desenhos dos perfis evolventes e pontos coordenados de tais dentes. A Tabela 5.5 apresenta os resultados dos erros para o

dente 2, referentes aos lados esquerdo e direito, com e sem ajuste do parâmetro peso w_i . Sob as mesmas configurações são apresentados na Tabela 5.6 os resultados para o dente 3.

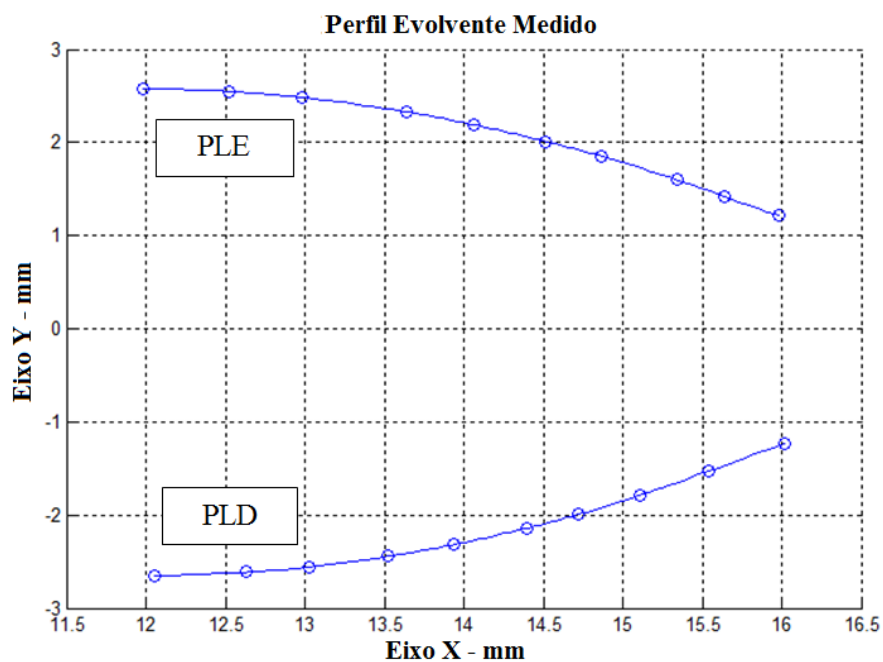


Figura 5.31 – Curva *NURBS* e pontos de controle referente à: engrenagem A e dente 2

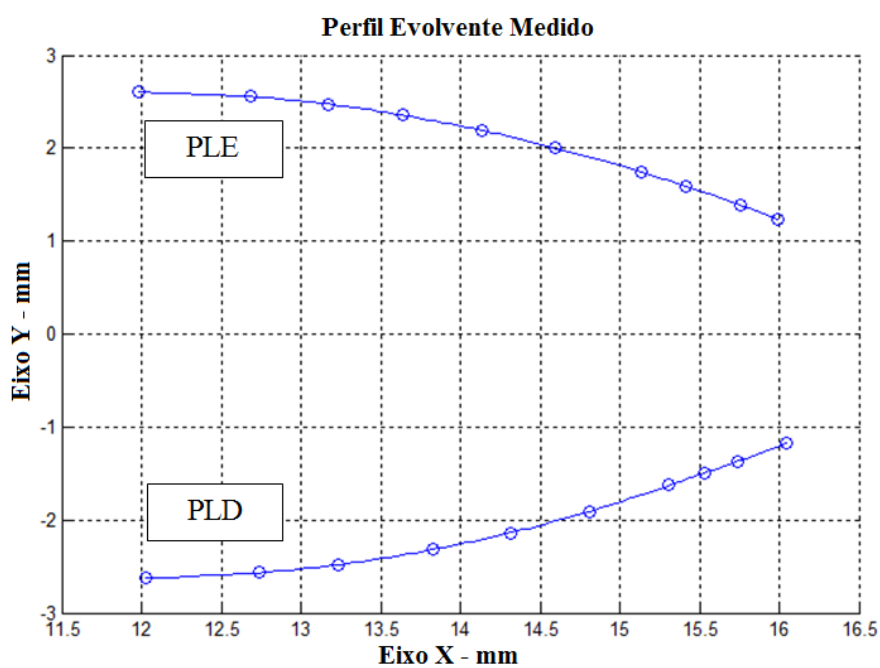


Figura 5.32 – Curva *NURBS* e pontos de controle referente à: engrenagem A e dente 3

Tabela 5.4 – Erros *NURBS* do perfil evolvente: engrenagem A e dente 1

LADO ESQ.	Sem ajuste do parâmetro peso w_i										
	Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Erros (μm)	0	13,925	9,068	9,018	6,795	6,111	5,396	0,836	1,948	0
	Pesos w_i	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Com ajuste do parâmetro peso w_i										
	Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Erros (μm)	0	7,213	7,464	7,502	9,682	8,735	4,52	0,695	1,037	0
	Pesos w_i	1	6,4	5,8	3,1	1	1	3,1	5,8	6,4	1
LADO DIRT.	Sem ajuste do parâmetro peso w_i										
	Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Erros (μm)	0	11,322	10,608	6,08	6,591	5,616	2,505	2,962	3,419	0
	Pesos w_i	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Com ajuste do parâmetro peso w_i										
	Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Erros (μm)	0	6,936	6,931	8,751	6,591	5,616	3,592	1,971	2,161	0
	Pesos w_i	1	3,7	3,4	1	1	1	1	3,4	3,7	1

Tabela 5.5 – Erros *NURBS* do perfil evolvente: engrenagem A e dente 2

LADO ESQ.	Sem ajuste do parâmetro peso w_i										
	Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Erros (μm)	0	10,823	7,01	5,121	6,122	3,652	3,847	6,527	1,333	0
	Pesos w_i	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Com ajuste do parâmetro peso w_i										
	Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Erros (μm)	0	4,139	9,501	5,121	6,122	3,652	3,847	8,911	0,511	0
	Pesos w_i	1	3,7	1	1	1	1	1	1	3,7	1
LADO DIRT.	Sem ajuste do parâmetro peso w_i										
	Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Erros (μm)	0	12,503	10,449	8,173	4,32	2,644	5,763	3,898	1,667	0
	Pesos w_i	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Com ajuste do parâmetro peso w_i										
	Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Erros (μm)	0	6,298	8,621	6,73	6,107	3,748	4,755	3,217	0,77	0
	Pesos w_i	1	6,4	5,8	3,1	1	1	3,1	5,8	6,4	1

Tabela 5.6 – Erros *NURBS* do perfil evolvente: engrenagem A e dente 3

LADO ESQ.	Sem ajuste do parâmetro peso w_i										
	Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Erros (μm)	0	13,804	12,15	6,553	7,352	8,876	1,129	0,402	2,191	0
	Pesos w_i	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Com ajuste do parâmetro peso w_i										
	Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Erros (μm)	0	8,326	7,928	9,445	7,352	8,876	1,611	0,249	1,415	0
	Pesos w_i	1	3,7	3,4	1	1	1	1	3,4	3,7	1
LADO DIRT.	Sem ajuste do parâmetro peso w_i										
	Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Erros (μm)	0	15,463	8,454	4,597	5,771	6,768	3,054	2,62	3,07	0
	Pesos w_i	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Com ajuste do parâmetro peso w_i										
	Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Erros (μm)	0	9,605	5,522	6,622	5,771	6,768	4,362	1,752	1,924	0
	Pesos w_i	1	3,7	3,4	1	1	1	1	3,4	3,7	1

Para os valores expostos nas Tabelas de 5.4 à 5.6, torna-se possível perceber que para os três dentes analisados existiram valores de erros que, ainda sem o ajuste do parâmetro peso w_i , excederam o limite definido, tanto do lado esquerdo quando do lado direito do dente. Destaca-se que os valores que constam nas tabelas citadas no início deste paragrafo faz referencia ao erro da curva *NURBS*. Os valores de Desvio Total de Perfil (F_α) serão posteriormente apresentados.

Neste momento, o caso mais crítico de valor de erro registrado se refere ao ponto 2, dente 3 e lado direito da engrenagem A na Tabela 5.6, em que consta 15,463 μm . Para os dentes 1 e 2 também foram notados erros acima do estabelecido que são, respectivamente: 13,925 μm na Tabela 5.4 e 12,503 μm na Tabela 5.5. De acordo com as tabelas referentes à engrenagem A, torna-se possível identificar que os maiores erros se encontram em uma das extremidades de aquisição dos pontos, em que se refere à parte inferior do perfil evolvente, a mais próxima do diâmetro de base. Para situações como esta, o código de alteração de erros e pesos w_i tem seus melhores resultados, comprovados em simulação.

Aplicando a metodologia para alteração do parâmetro peso w_i nos resultados desta primeira peça, foram obtidos valores de erros abaixo do limite definido, comprovando a eficiência do código desenvolvido nesta pesquisa. Os resultados podem ser vistos nas Tabelas de 5.4 à 5.6.

Os mesmos procedimentos experimentais e análise de dados empregados a engrenagem A, também foram aplicadas as engrenagens de módulo 4 mm (engrenagem B) e 6 mm (engrenagem C), sendo esta última apresentada nas Figura 5.33.



Figura 5.33 – Engrenagem C posicionada para inspeção do perfil evolvente

As Figuras 5.34, 5.35, 5.36 e 5.37, 5.38, 5.39 ilustram os desenhos dos perfis evolventes dos três dentes inspecionados, para as engrenagens B e C, respectivamente, destacando seus pontos de controle.

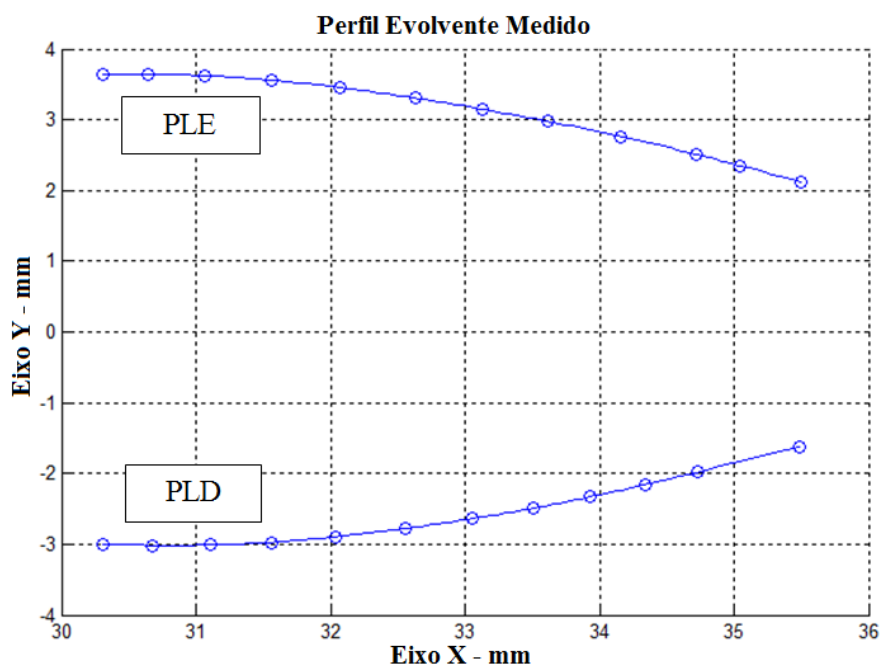


Figura 5.34 – Curva *NURBS* e pontos de controle referente à: engrenagem B e dente 1

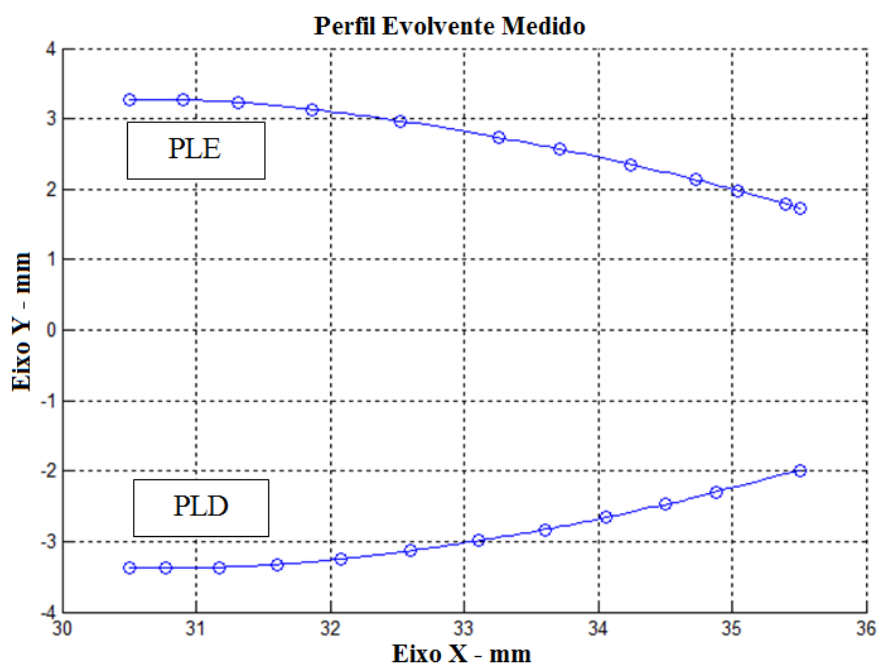


Figura 5.35 – Curva *NURBS* e pontos de controle referente à: engrenagem B e dente 2

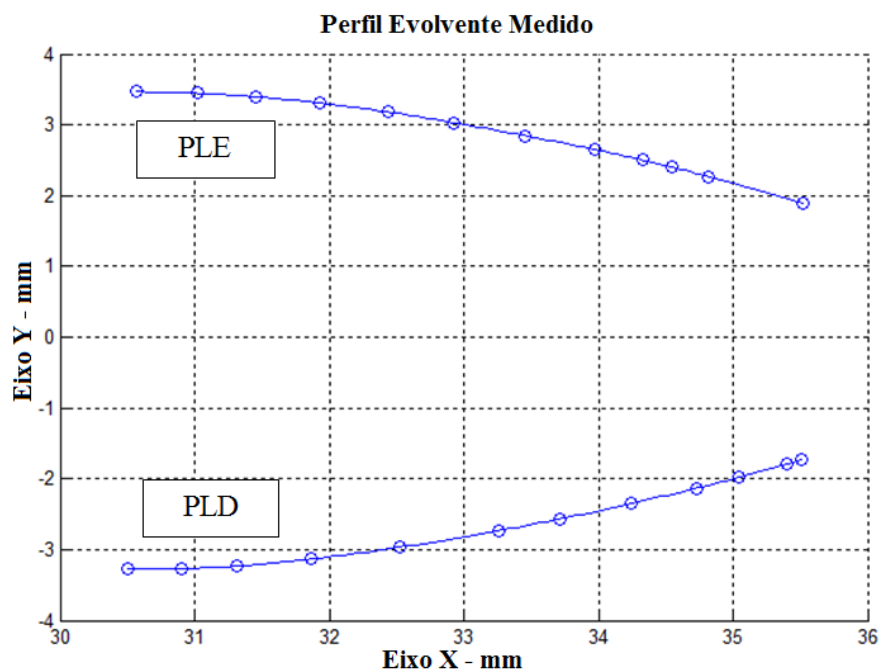


Figura 5.36 – Curva *NURBS* e pontos de controle referente à: engrenagem B e dente 3

As Tabelas de 5.7 a 5.12 apresentam os resultados de erros *NURBS*, dos perfis laterais esquerdo e direito, com e sem ajuste do parâmetro peso w_i , dos três dentes inspecionados em cada peça. É importante destacar que para engrenagens com módulos 4 e 6 mm, o erro máximo estabelecido no sistema computacional é de 12 μm .

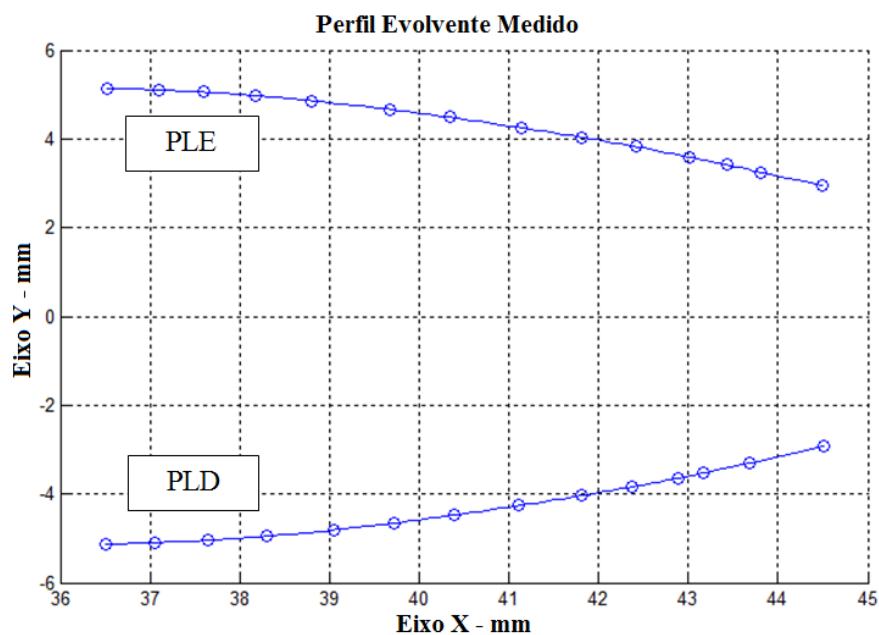


Figura 5.37 – Curva *NURBS* e pontos de controle referente à: engrenagem C e dente 1

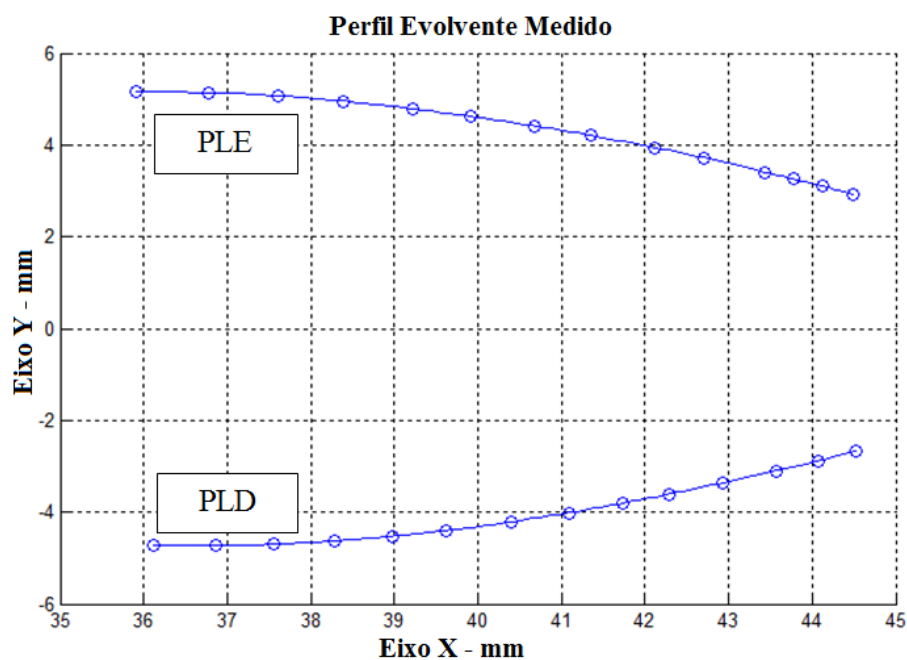


Figura 5.38 – Curva *NURBS* e pontos de controle referente à: engrenagem C e dente 2

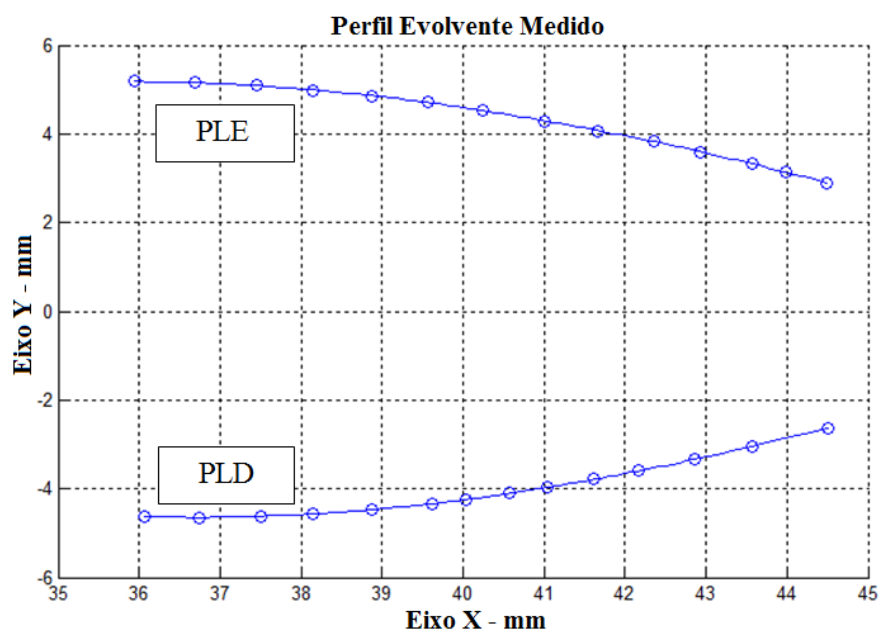


Figura 5.39 – Curva *NURBS* e pontos de controle referente à: engrenagem C e dente 3

Tabela 5.7 – Erros *NURBS* do perfil evolvente: engrenagem B e dente 1

LADO ESQ.	Sem ajuste do parâmetro peso w_i												
	Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Erros (μm)	0	3,907	6,999	7,165	4,165	5,107	2,171	5,334	1,269	4,103	1,94	0
	Pesos w_i	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Com ajuste do parâmetro peso w_i												
	Não necessário!												
LADO DIRT.	Sem ajuste do parâmetro peso w_i												
	Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Erros (μm)	0	5,765	8,774	5,858	5,546	4,289	3,109	2,177	5,119	4,381	2,538	0
	Pesos w_i	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Com ajuste do parâmetro peso w_i												
	Não necessário!												

Tabela 5.8 – Erros *NURBS* do perfil evolvente: engrenagem B e dente 2

LADO ESQ.	Sem ajuste do parâmetro peso w_i												
	Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Erros (μm)	0	4,171	6,3	6,278	4,297	4,165	4,247	3,148	4,276	1,452	5,313	0
	Pesos w_i	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Com ajuste do parâmetro peso w_i Não necessário!												
LADO DIRT.	Sem ajuste do parâmetro peso w_i												
	Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Erros (μm)	0	5,716	11,017	5,885	8,855	3,191	2,985	4,406	2,575	1,96	0,95	0
	Pesos w_i	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Com ajuste do parâmetro peso w_i Não necessário!												

Tabela 5.9 – Erros *NURBS* do perfil evolvente: engrenagem B e dente 3

LADO ESQ.	Sem ajuste do parâmetro peso w_i												
	Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Erros (μm)	0	5,769	11,287	5,867	8,835	3,281	3,04	4,274	2,548	2,147	0,902	0
	Pesos w_i	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Com ajuste do parâmetro peso w_i												
	Não necessário!												
LADO DIRT.	Sem ajuste do parâmetro peso w_i												
	Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Erros (μm)	0	7,93	7,307	4,172	4,827	2,889	2,737	2,496	1,856	0,783	4,578	0
	Pesos w_i	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Com ajuste do parâmetro peso w_i												
	Não necessário!												

Tabela 5.10 – Erros *NURBS* do perfil evolvente: engrenagem C e dente 1

LADO ESQ.	Sem ajuste do parâmetro peso w_i														
	Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Erros (μm)	0	1,481	6,671	6,846	3,603	5,209	2,44	1,946	3,442	1,746	4,067	0,176	2,008	0
	Pesos w_i	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Com ajuste do parâmetro peso w_i Não necessário!														
LADO DIRT.	Sem ajuste do parâmetro peso w_i														
	Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Erros (μm)	0	2,877	3,878	8,535	0,1	7,275	4,496	0,892	2,53	5,344	1,958	2,511	1,465	0
	Pesos w_i	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Com ajuste do parâmetro peso w_i Não necessário!														

Tabela 5.11 – Erros *NURBS* do perfil evolvente: engrenagem C e dente 2

[illegible]

Tabela 5.12 – Erros *NURBS* do perfil evolvente: engrenagem C e dente 3

LADO ESQ.	Sem ajuste do parâmetro peso w_i														
	Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Erros (μm)	0	18,16	0,657	8,014	5,589	3,145	4,347	0,354	3,58	1,407	4,423	3,182	5,749	0
	Pesos w_i	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Com ajuste do parâmetro peso w_i														
	Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Erros (μm)	0	6,844	1,084	8,014	5,589	3,145	4,347	0,354	3,58	1,407	4,423	4,402	2,15	0
	Pesos w_i	1	3,8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3,8	1
LADO DIRT.	Sem ajuste do parâmetro peso w_i														
	Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Erros (μm)	0	8,854	9,687	2,847	5,084	7,44	0,948	5,229	1,525	3,862	4,437	1,657	0,146	0
	Pesos w_i	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Com ajuste do parâmetro peso w_i														
	Não necessário!														

Por meio dos erros *NURBS* registrados nas Tabelas de 5.7 a 5.9 nos quais se referem à engrenagem B, tornou-se possível constatar que todos os valores calculados foram inferiores aos 12 μm estabelecido, sem a necessidade de ajustar os pesos w_i da função. Os maiores erros calculados e encontrados para aquela engrenagem foram iguais a 11,017 μm e 11,287 μm , que nesta ordem fazem referência ao ponto 3, dente 2, lado direito, na Tabela 5.8, e ao ponto 3, dente 3, lado esquerdo, na Tabela 5.9. Estes valores foram os que mais se aproximaram do limite definido.

Para engrenagem de módulo 4 mm, a quantidade de pontos coordenados sugerida a ser coletada na superfície do perfil evolvente está entre os números 10 e 12. Em casos como o da engrenagem B, uma menor quantidade de pontos poderia ser capturada, tendo em vista que não precisou ajustar os pesos da função para se obter valores de erros iguais ou inferiores a 12 μm . Porém, alguns fatores podem ser levados em consideração antes de definir tal quantidade como: experiência do operador na medição por coordenadas, principalmente com MMC manual; e a quantidade de inspeções que se deseja executar para o tempo disponível. De acordo com a teoria apresentada neste trabalho, se a menor quantidade de pontos fosse capturada, por exemplo: 10 pontos, erros maiores teriam sido alcançados e, em casos específicos, a estratégia de alteração e ajuste do parâmetro peso w_i teria que ser utilizada.

Analisando os resultados da engrenagem C, em alguns casos também não foi necessário utilizar o código para ajuste dos pesos w_i . Entretanto, nas Tabelas 5.11 e 5.12 erros foram apontados como superiores ao limite, no qual o caso mais crítico registrado se refere ao ponto 2, dente 3, lado esquerdo, na Tabela 5.12, com valor de 18,16 μm . Para os últimos casos citados, a metodologia de alteração dos pesos foi aplicada, obtendo o sucesso desejado.

5.3.3 Determinação do Desvio Total de Perfil (F_a) das engrenagens

Após o ajuste das curvas *NURBS*, deu-se início a análise de Desvio Total de Perfil (F_a), tendo como referência a norma ISO 1328. As Figuras 5.40, 5.41, 5.42; 5.43, 5.44, 5.45 e 5.46, 5.47 e 5.48 ilustram as análises dos perfis evolventes dos três dentes de cada uma das engrenagens, seguindo a ordem de apresentação que vem sendo empregada até o presente momento, engrenagem A, B e C. Para as figuras citadas, são esboçadas as duas curvas: curva *NURBS* e seus pontos de controle, na cor azul, gerada a partir dos dados coletados usando a MMC, e as curvas evolventes teóricas, na cor

vermelha, definidas pelas Equações 2.6 e 2.7. Aplicando a norma ISO 1328 é possível, por considerar a curva evolvente teórica de tal forma a englobar todos os pontos da curva evolvente obtidos através da *NURBS*, determinar o Desvio Total de Perfil (F_α).

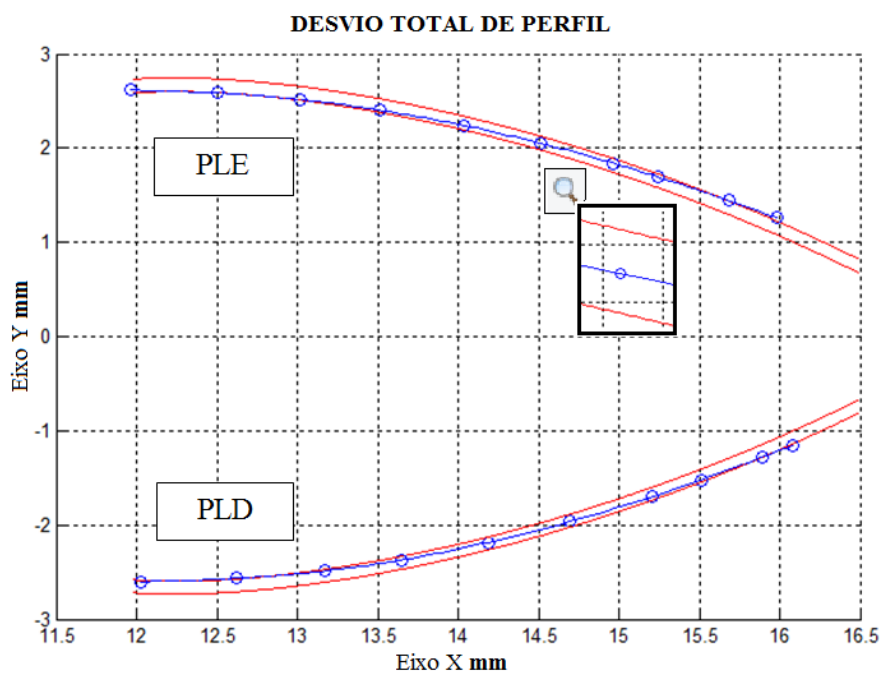


Figura 5.40 – Análise do Desvio Total de Perfil (F_α): engrenagem A e dente 1

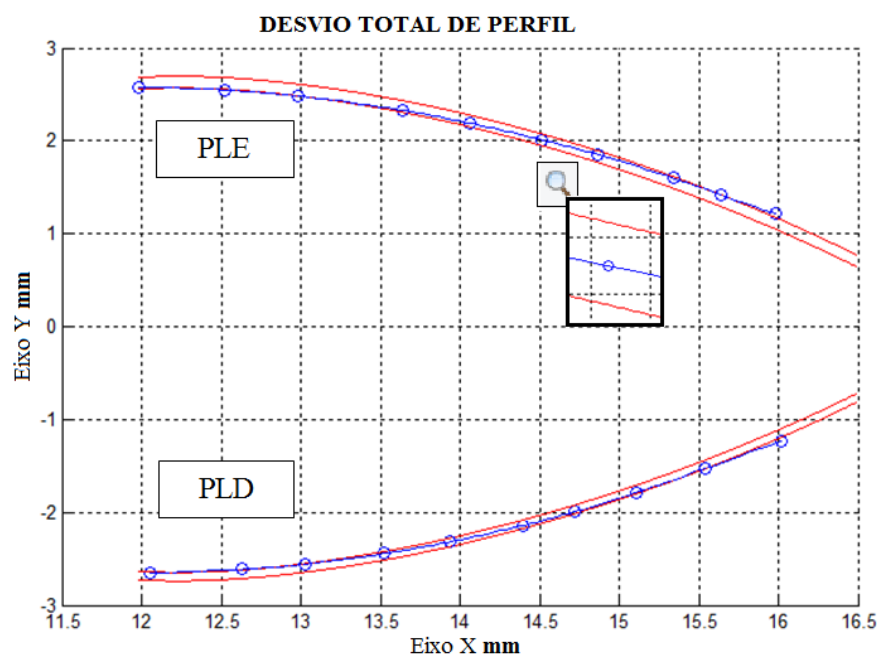


Figura 5.41 – Análise do Desvio Total de Perfil (F_α): engrenagem A e dente 2

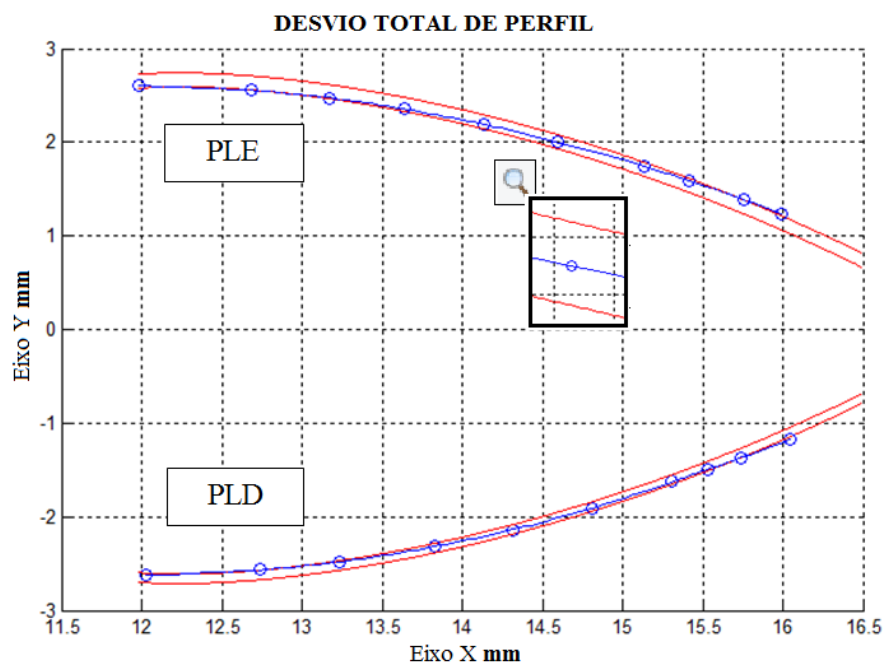


Figura 5.42 – Análise do Desvio Total de Perfil (F_α): engrenagem A e dente 3

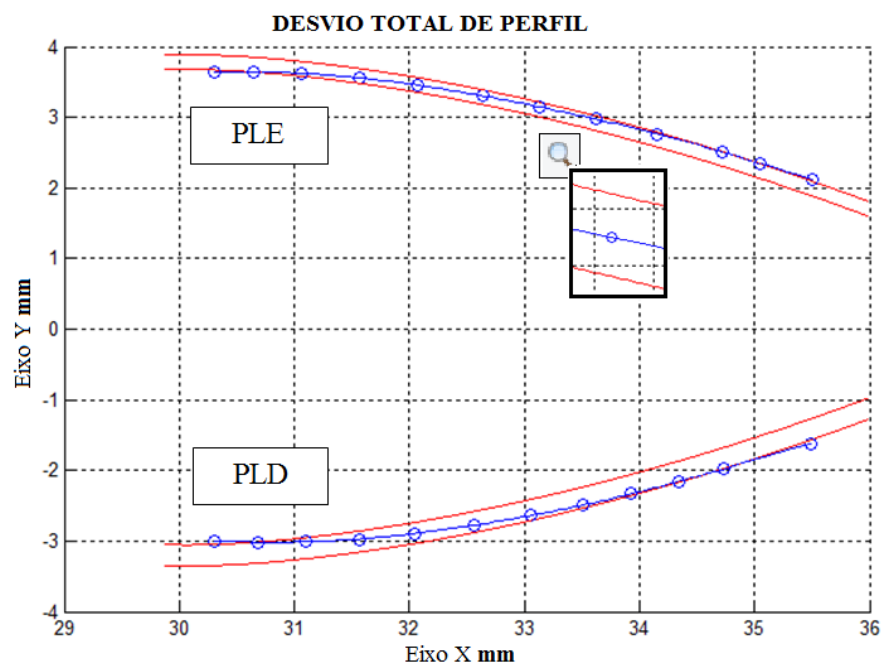


Figura 5.43 – Análise do Desvio Total de Perfil (F_α): engrenagem B e dente 1

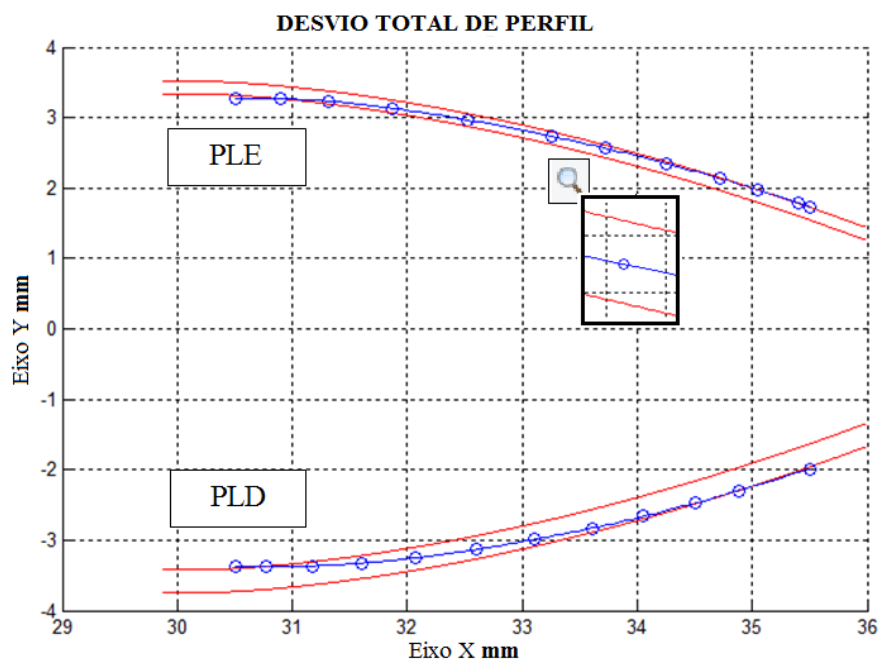


Figura 5.44 – Análise do Desvio Total de Perfil (F_α): engrenagem B e dente 2

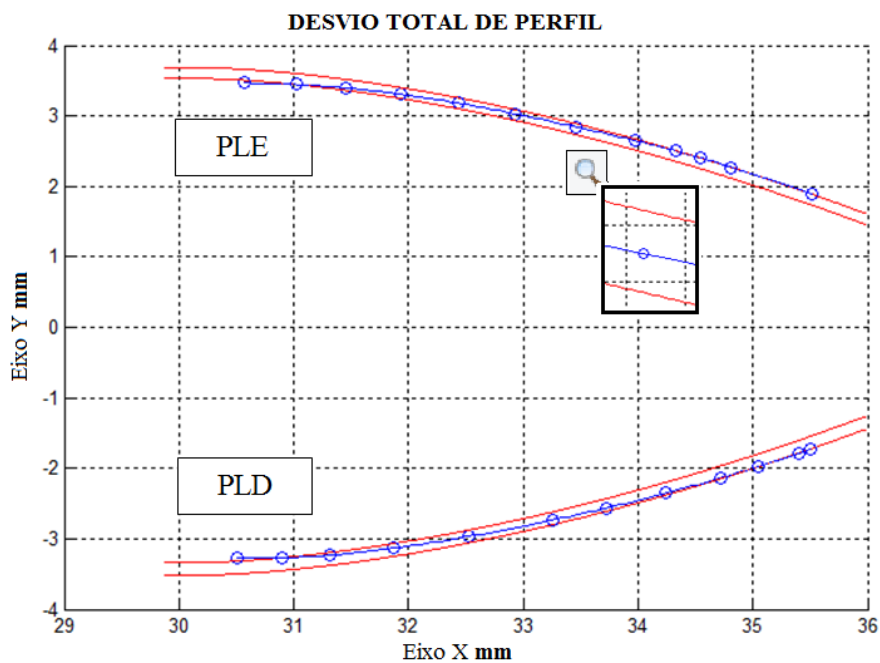


Figura 5.45 – Análise do Desvio Total de Perfil (F_α): engrenagem B e dente 3

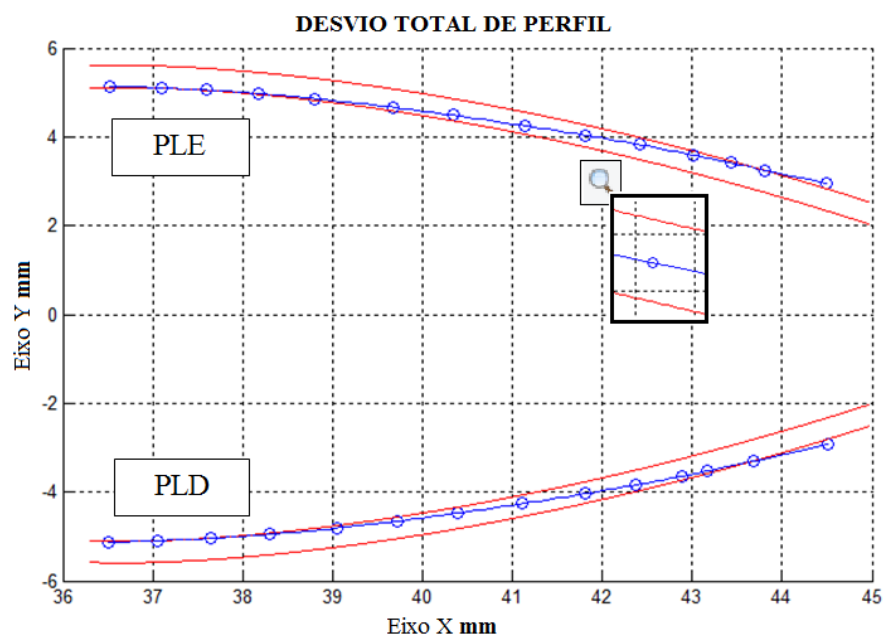


Figura 5.46 – Análise do Desvio Total de Perfil (F_α): engrenagem C e dente 1

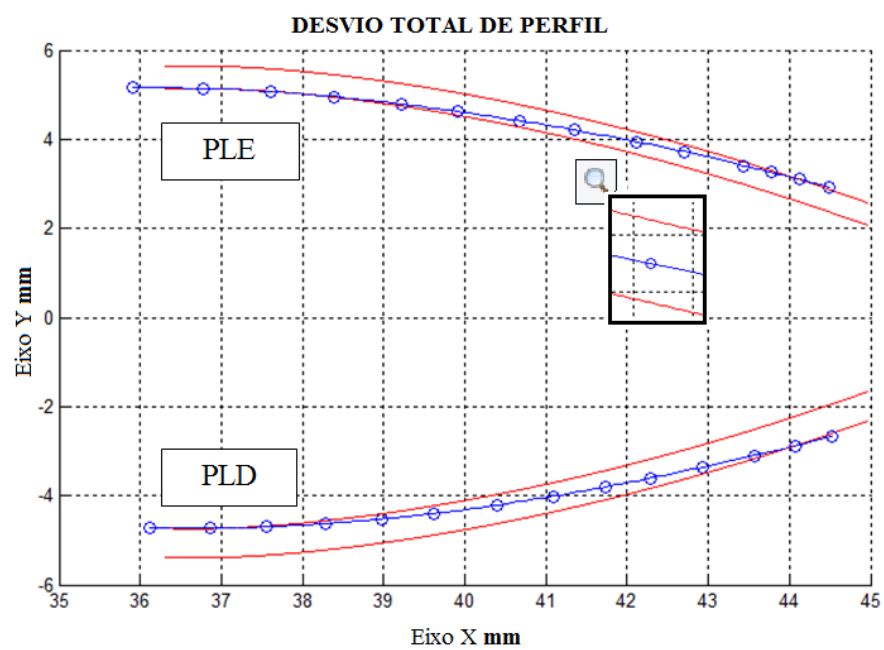


Figura 5.47 – Análise do Desvio Total de Perfil (F_α): engrenagem C e dente 2

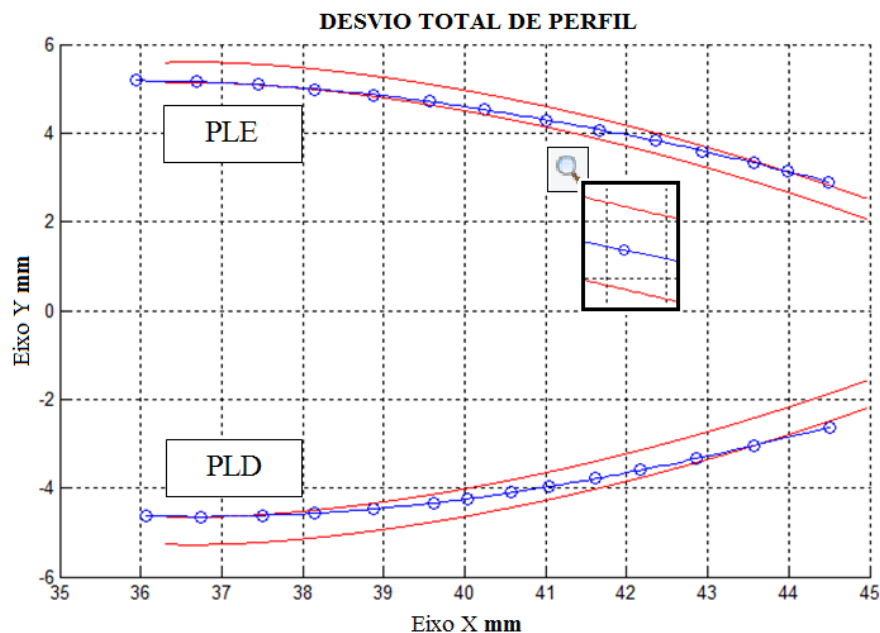


Figura 5.48 – Análise do Desvio Total de Perfil (F_α): engrenagem C e dente 3

A Tabela 5.13 contém os valores de desvio de perfil dos lados esquerdos e direitos, em μm , para os três dentes das engrenagens analisadas. O maior valor de desvio encontrado no dente, ou seja, o caso mais crítico registrado na Tabela 5.13 deve ser considerado como do DESVIO TOTAL DE PERFIL (F_α).

Tabela 5.13 – Valores de Desvio Total de Perfil (F_α) das peças usinadas

Engrenagem A	$F_{\alpha D1}$ (LE)	$F_{\alpha D2}$ (LE)	$F_{\alpha D3}$ (LE)
	136,68 μm	98,25 μm	101,56 μm
	$F_{\alpha D1}$ (LD)	$F_{\alpha D2}$ (LD)	$F_{\alpha D3}$ (LD)
	145,59 μm	126,45 μm	149,74 μm
Engrenagem B	$F_{\alpha D1}$ (LE)	$F_{\alpha D2}$ (LE)	$F_{\alpha D3}$ (LE)
	299,21 μm	327,51 μm	181,82 μm
	$F_{\alpha D1}$ (LD)	$F_{\alpha D2}$ (LD)	$F_{\alpha D3}$ (LD)
	209,03 μm	181,34 μm	155,65 μm
Engrenagem C	$F_{\alpha D1}$ (LE)	$F_{\alpha D2}$ (LE)	$F_{\alpha D3}$ (LE)
	497,93 μm	656,57 μm	622,24 μm
	$F_{\alpha D1}$ (LD)	$F_{\alpha D2}$ (LD)	$F_{\alpha D3}$ (LD)
	483,05 μm	503,82 μm	462,1 μm

Legenda: $F_{\alpha Dn}$ – Desvio Total de Perfil do dente n; LE-Lado Esquerdo e LD-Lado Direito;

De acordo com os dados apresentados na Tabela 5.13, nenhuma das engrenagens fabricadas e avaliadas neste procedimento experimental se enquadrou nos graus de qualidade definidos pela norma ISO 1328, nos quais variam de 0 a 12, que nesta ordem crescente aumenta também os desvios. No entanto, os valores registrados na Tabela 5.13 estão coerentes com os números de Desvio Total de Perfil (F_α) apresentados na Tabela 5.2, que se refere aos obtidos na qualificação das mesmas engrenagens utilizando a Máquina de Medição por Coordenadas automática *Crysta-Apex S 7106*, do Laboratório de Engenharia de Precisão.

Na Tabela 5.14 consta uma comparação dos resultados de Desvio Total de Perfil (F_α), obtidos pelas duas MMCs automática e manual, apresentando também a diferença entre tais valores. Nesta comparação é possível perceber que valores alcançados pelo MMC manual, fazendo o uso das metodologias de aquisição de pontos, construção da curva *NURBS* e ajuste do parâmetro peso w_i , foram bem próximos aos apresentados pelo processo de qualificação, não excedendo, na maioria dos casos, os Limites de Tolerância para Migração dos Graus de Qualidade (LTMGQ).

O Limite de Tolerância para Migração dos Graus de Qualidade é considerado como sendo a faixa de valores dentro do qual o Desvio Total de Perfil (F_α) pode variar, sem exceder o limiar em que leva a engrenagem para uma classificação de grau qualidade superior. Por exemplo, de acordo com a Figura 5.49, para uma peça com módulo superior a 6 mm e inferior ou igual a 10 mm, o limite de tolerância para migração do grau de qualidade 11 para o 12 é aproximadamente 38,99 μm .

Sendo assim, o LTMGQ consta como uma linha da Tabela 5.14, sendo considerados para todos os casos de análise realizada neste trabalho de tese, os limites entre os graus de qualidade 11 e 12. Os desvios associados aos referidos graus são valores menores do que os encontrados nos testes experimentais, porém mais próximos daqueles que as peças se enquadraram, de acordo com a ISO 1328.

Tabela 5.14 – Comparação dos valores de Desvio Total de Perfil (F_a): MMC CNC e manual

Engrenagem A	F_{aD1} – Crysta Apex	F_{aD2} – Crysta Apex	F_{aD3} – Crysta Apex
	133,75 μm	125,4 μm	139,2 μm
	F_{aD1} - Tesa	F_{aD2} - Tesa	F_{aD3} - Tesa
	145,59 μm	126,45 μm	149,74 μm
	Diferença	Diferença	Diferença
	11,84 μm	1,05 μm	10,54 μm
	LTMGQ valor aproximado		
	26,0 μm - Referência ISO 1328		
Engrenagem B	F_{aD1} – Crysta Apex	F_{aD2} – Crysta Apex	F_{aD3} – Crysta Apex
	293,4 μm	319,7 μm	174,5 μm
	F_{aD1} - Tesa	F_{aD2} - Tesa	F_{aD3} - Tesa
	299,21	327,51 μm	181,82 μm
	Diferença	Diferença	Diferença
	5,81 μm	7,81 μm	7,32 μm
	LTMGQ valor aproximado		
	32,0 μm - Referência ISO 1328		
Engrenagem C	F_{aD1} – Crysta Apex	F_{aD2} – Crysta Apex	F_{aD3} – Crysta Apex
	513,1 μm	617,4 μm	608,0 μm
	F_{aD1} - Tesa	F_{aD2} - Tesa	F_{aD3} - Tesa
	497,93 μm	656,57 μm	622,24 μm
	Diferença	Diferença	Diferença
	15,17 μm	39,17 μm	14,24 μm
	LTMGQ valor aproximado		
	32,0 μm - Referência ISO 1328		

Legenda: F_{aDn} – Desvio Total de Perfil do dente n;

Módulo M (mm)	Grau de Qualidade												LTMGQ = 38,99 μm
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	F_a (μm)												
$6 < m \leq 10$	2,0	2,9	4,1	6,0	8,0	12,0	16,0	23,0	33,0	46,0	65,0	92,0	131,0

Figura 5.49 – Limite de tolerância para migração dos graus de qualidade

Analisando os resultados apresentados na Tabela 5.14 é possível perceber que, em apenas um único caso, existiu a diferença acima do que foi definido como o LTMGQ, com valor destacado na tabela citada na cor azul. O exposto faz referência aos resultados de inspeção da engrenagem C, em que o Desvio Total de Perfil (F_α) do dente 2, obtido usando a MMC CNC, foi igual a 617,4 μm , enquanto este mesmo parâmetro usando a MMC manual foi de 656,57 μm . Para este caso se registrou uma diferença de 39,17 μm , uma vez que o LTMGQ permitido foi de aproximadamente 31,99 μm . Fato este podendo ser justificado por: levar em consideração os graus de qualidade 11 e 12, últimos definidos pela norma ISO 1328, em que trabalham com erros de até 108 μm , uma vez que os erros encontrados foram maiores do que tais; ou uma atuação de alguma fonte de incerteza durante a aquisição dos dados.

Torna-se importante ressaltar que a metodologia foi eficaz e que todas as engrenagens apresentaram, com o modelo *NURBS* e a MMC manual, valores de erros na mesma ordem de grandeza que os resultados obtidos com a MMC CNC, mostrando que é possível inspecionar o perfil evolvente de engrenagens usando máquinas manuais e *softwares* limitados instalados no sistema de controle.

Neste caso, com grau de liberdade a mais (o peso - w_i), não encontrado em outros modelos matemáticos semelhantes para construção de curvas, como por exemplo: *Bézier* e *B-Splines*; tornou-se possível através deste parâmetro aproximar a maioria dos valores coletados usando *Micro-Hite* 3D dos verdadeiros valores de Desvio Total de Perfil (F_α), validando o que tem sido desenvolvido neste trabalho de tese.

Testes de repetibilidade e reprodutibilidade com operadores distintos foram realizados, e serão apresentados nos itens que seguem.

5.3.4 Teste de Repetibilidade na Inspeção do Perfil Evolvente, usando *NURBS* e a metodologia proposta

Denomina-se repetibilidade a faixa de valores dentro da qual o erro aleatório de uma determinada inspeção é esperado para uma dada probabilidade. No entanto, as medições para estimar o referido parâmetro devem ser efetuadas sob as mesmas condições, sendo esta denominada de condições de repetibilidade, incluindo: mesmo procedimento de medição, mesmo operador, mesmo instrumento de medição, mesmo local e repetição em curto período de tempo (Nóbrega, 2011). Para a realização do teste

de repetibilidade na inspeção do perfil evolvente, utilizou-se a teoria de *William Sealey Gosset*, conhecida como distribuição *t* de *Student*.

No ensaio metrológico foi usada uma engrenagem de módulo 4 mm e 16 dentes, que para sua inspeção 12 pontos coordenados devem ser capturados. A Figura 5.50 ilustra a peça fixada no torno de bancada para inicialização das medições.



Figura 5.50 – Engrenagem para realização do teste de repetibilidade

No intuito de estimar a repetibilidade, foram realizadas 20 operações de medições consecutivas no perfil, com 12 pontos cada, totalizando 240 pontos coletados. Para cada ponto coordenado tem-se um valor de erro.

Assim, foram registrados os conjuntos dos primeiros pontos (PT1s), dos segundos pontos (PT2s), e sucessivamente, conforme ilustrado na Figura 5.51. Após este registro, o referido parâmetro foi analisado e calculado levando em consideração os valores dos pontos no sentido horizontal.

Com a finalidade de determinar a faixa dentro da qual o erro aleatório (parcela imprevisível) é esperado, a repetibilidade do conjunto foi calculada para uma probabilidade (faixa de abrangência) de 95,45%, sendo esta determinada pelo produto do desvio-padrão (σ) com o respectivo coeficiente *t* de *Student*.

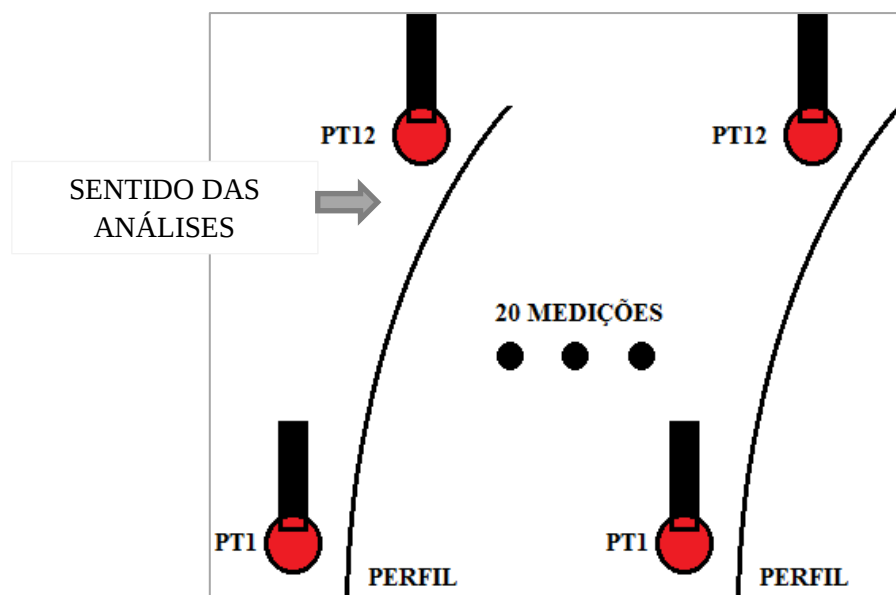


Figura 5.51 – Captura dos pontos coordenados e sentido das análises de dados

A Tabela 5.15 apresenta os valores de erros (em μm) da curva *NURBS* para as 20 medições executadas, sem alteração dos parâmetros pesos. É importante destacar que os erros das medições referentes aos pontos **PT1** e **PT12** não constam na tabela citada, tendo em vista seus valores nulos, devido modelo semi-fechado da curva *NURBS* adotada. As células da tabela que estão destacadas na cor azul (total de 21) indicam os valores de erros que excederam o limite estabelecido na programação, que para engrenagem em questão foi definido 12 μm .

Com o objetivo de analisar a eficiência da metodologia de alteração dos pesos w_i para os presentes dados, já tendo sido aplicada para dados oriundos de simulações, a Tabela 5.16 apresenta os resultados de erros da curva *NURBS* com os pesos w_i ajustados, no sentido de obter melhores resultados.

Como é possível observar na Tabela 5.16, dentre todos os valores que excederam o limite do erro máximo, apenas para um dos casos não foi possível de ser otimizado, são os pontos PT4 e PT5 da quarta medição realizada, com números iguais a 14,251 μm e 13,641 μm , respectivamente. Isso se justifica pela tentativa de ajuste do valor de erro igual a 23 μm referente à quarta medição do PT3, Tabela 5.15, sendo este último valor elevado justificado por uma coleta de ponto que sofreu influência(s) de fonte(s) externa(s) de erros, como por exemplo, vibrações, velocidade elevada de apalpação, entre outras possibilidades.

Tabela 5.15 – Erros *NURBS* para 20 as medições executadas no teste de repetibilidade:sem alteração do parâmetro peso w_i

QM	PC	PT2	PT3	PT4	PT5	PT6	PT7	PT8	PT9	PT10	PT11
		Erro da curva <i>NURBS</i> - μm									
1		6,982	6,578	4,128	7,55	12,224	2,429	1,406	0,066	4,573	7,701
2		5,543	9,578	6,765	7,568	6,723	3,967	0,668	0,408	9,515	11,866
3		2,648	8,509	2,608	10,155	12,975	2,743	1,871	1,397	7,078	11,24
4		7,051	23,638	11,719	9,607	10,201	2,168	1,343	0,421	11,426	12,734
5		6,54	9,329	5,248	9,517	6,946	3,104	1,341	0,533	11,63	12,167
6		8,861	8,417	7,866	6,887	4,112	3,336	0,931	0,222	11,172	12,989
7		3,791	10,131	7,597	7,898	9,356	2,333	1,471	0,468	11,379	11,922
8		7,685	7,551	5,523	7,194	7,866	2,149	1,375	0,541	8,553	10,589
9		9,935	7,348	8,885	6,578	6,165	2,557	0,999	0,369	9,13	12,124
10		11,666	12,984	12,098	3,965	0,902	1,977	2,386	1,626	9,696	10,63
11		5,551	12,358	5,137	7,542	7,536	2,562	1,565	0,937	8,947	12,359
12		7,685	7,551	5,523	7,194	7,866	3,24	0,644	0,306	9,938	12,515
13		1,65	6,67	3,925	10,921	15,811	2,647	0,487	0,247	9,249	10,706
14		4,586	9,961	5,829	7,715	9,224	1,414	2,391	0,671	7,978	14,312
15		10,116	13,018	4,692	5,754	2,595	4,235	0,78	0,817	9,18	14,728
16		5,543	9,578	6,765	7,568	6,723	3,967	0,668	0,408	9,515	11,866
17		10,799	12,832	10,32	2,001	3,735	1,575	2,311	1,67	9,953	11,698
18		9,234	16,07	11,941	3,367	0,403	2,975	0,687	0,217	8,644	12,684
19		5,949	8,079	9,503	8,203	7,054	2,767	1,459	0,161	7,258	15,588
20		10,409	12,045	7,436	5,587	3,748	1,967	1,201	0,325	8,221	9,48

Legenda: QM–Quantidade de medições executadas; PC–Pontos coletados;

Tabela 5.16 – Erros *NURBS* para 20 as medições executadas no teste de repetibilidade:com alteração do parâmetro peso w_i

QM	PC	PT2	PT3	PT4	PT5	PT6	PT7	PT8	PT9	PT10	PT11
		Erro da curva <i>NURBS</i> - μm									
1		6,982	6,578	4,13	10,179	8,443	1,668	1,916	0,068	4,573	7,701
2		5,543	9,578	6,765	7,568	6,723	3,967	0,668	0,408	9,515	11,866
3		2,648	8,509	3,636	7,777	11,271	2,374	1,435	1,926	7,085	11,24
4		4,172	10,405	14,251	13,641	10,201	2,169	1,925	0,392	4,973	7,69
5		3,965	5,972	7,669	9,527	6,946	3,104	1,341	0,749	7,289	7,891
6		5,43	5,428	11,39	6,887	4,112	3,336	0,931	0,329	7,017	8,486
7		3,791	10,131	7,597	7,898	9,356	2,333	1,471	0,468	11,379	11,922
8		7,685	7,551	5,523	7,194	7,866	2,149	1,375	0,541	8,553	10,589
9		6,377	7,3	5,91	9,393	6,167	2,558	1,437	0,239	9,045	7,895
10		8,795	9,061	9,693	5,551	0,936	1,977	3,4	1,254	6,741	8,265
11		3,203	7,897	7,52	7,552	7,536	2,562	1,565	1,332	5,62	7,793
12		4,737	4,839	8,064	7,206	7,866	3,24	0,644	0,443	6,25	7,906
13		1,65	6,67	5,497	9,936	11,107	1,829	0,452	0,321	9,283	10,706
14		2,696	6,381	8,486	7,718	9,224	1,414	2,391	0,945	5,012	9,088
15		6,429	8,328	6,804	5,754	2,595	4,235	0,78	1,162	5,77	9,278
16		5,543	9,578	6,765	7,568	6,723	3,967	0,668	0,408	9,515	11,866
17		8,233	8,934	8,261	3,068	3,857	1,576	3,295	1,293	6,919	9,125
18		5,238	10,374	10,685	4,76	0,721	2,977	1,002	0,174	5,535	7,595
19		2,275	11,065	9,505	8,203	7,054	2,767	1,459	0,161	9,793	5,913
20		6,334	7,712	10,77	5,587	3,748	1,967	1,202	0,482	5,174	5,933

Tendo como referência os pontos PT2s de cada uma das 20 medições realizadas, e usando os resultados com valores pesos ajustados, serão apresentados os cálculos para estimar: desvio padrão, repetibilidade, limites de controle (LSC – Limite Superior de Controle e LIC – Limite Inferior de Controle). Segue abaixo as seguintes relações:

- **Desvio Padrão:** Equação 5.1

$$u = \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}{n-1}} \quad (5.1)$$

Sendo: σ – desvio-padrão da amostra; I_i – i-ésima indicação; $\bar{I}$ – média das indicações; n – quantidade de medições.

A incerteza padrão (u) corresponde à medida da intensidade da componente aleatória, e quando calculada a partir de um conjunto de medições repetidas, esta corresponde ao desvio padrão das amostras. Sendo assim, o desvio padrão para esta amostra das 20 indicações de valores dos PT2, com média igual a 5,086 μm , corresponde a:

$$\sigma_{\text{pt2}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{20} (I_i - 5,086)^2}{20-1}} = 2,031 \mu\text{m}$$

- **Repetibilidade:** Equação 5.2

$$R_e = \pm t \cdot u \quad (5.2)$$

Sendo: R_e – repetibilidade; t – coeficiente *t de Student*; u – incerteza padrão.

O coeficiente *t de Student* foi obtido a partir da Tabela A.1, localizada no apêndice A desta tese, como 2,133. Logo, a repetibilidade é calculada da seguinte forma:

$$R_{e(\text{pt2})} = \pm 2,133 \cdot 0,002031 = \pm 0,004332 \text{ mm} = \pm 4,332 \mu\text{m}$$

- **Limites de Controle:** Equações 5.3 e 5.4

Determinada a repetibilidade do sistema de medição sob condições definidas, foram calculados os limites superior e inferior de controle (LSC e LIC), utilizando as Equações 5.3 e 5.4:

$$LSC = M + R_e \quad (5.3)$$

$$LSC = 5,0863 + 4,332 = 9,418 \mu\text{m}$$

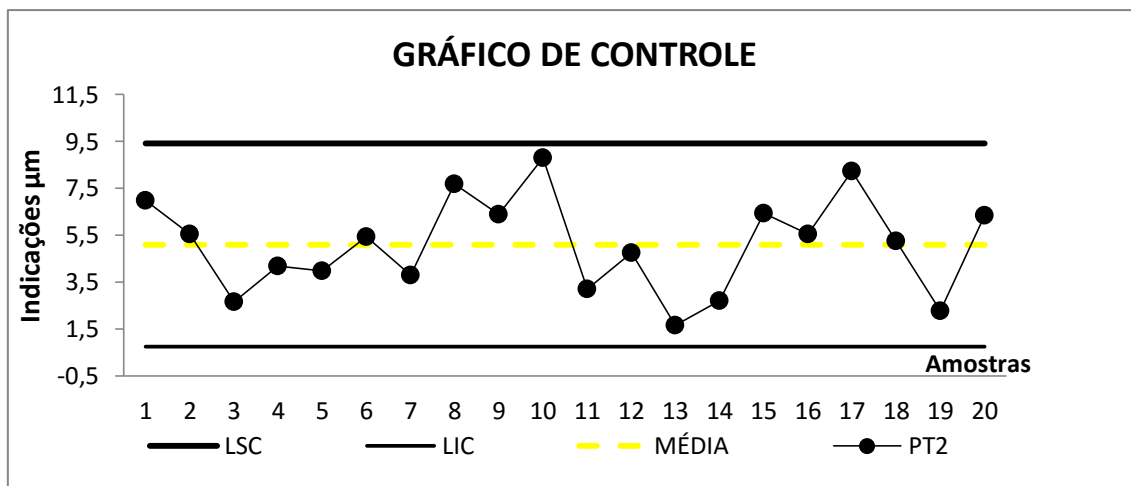
$$LIC = M - R_e \quad (5.4)$$

$$LIC = 5,0863 - 4,332 = 0,754 \mu\text{m}$$

Sendo: M – média das indicações; LSC – limite superior de controle; LIC – limite inferior de controle.

Diante dos valores calculados tornou-se possível construir o gráfico da Figura 5.52, no qual este esboça tanto os limites de controle e média das indicações (LSC e LIC) quanto o comportamento dos erros das 20 medições consecutivas do segundo ponto (PT2) em cada inspeção do perfil. De fato, verifica-se que os níveis de dispersões das indicações estão contidos dentro dessa faixa, para uma probabilidade de 95,45 %.

Ainda de acordo com o gráfico da Figura 5.52 é possível verificar a consistência dos resultados dos erros de medições, fazendo o uso da metodologia de aquisição de uma quantidade mínima de pontos coordenados usando a MMC manual, sensor *touch trigger* e do modelo matemático *NURBS*, representado diretamente pela variabilidade dos resultados das indicações. Como pode ser observado, apesar do limite superior de controle ser de 9,418 μm , as medições não excederam 8,80 μm . Esta mesma análise pode ser feita para o limite inferior de controle garantindo assim, uma boa repetibilidade dos valores de erro da curva *NURBS* e, conseqüentemente, da estratégia desenvolvida.



Dados: Amostra=20; LSC = 9,418 μm ; LIC = 0,754 μm ; Média = 5,086 μm ; Repetibilidade = 4,332 μm

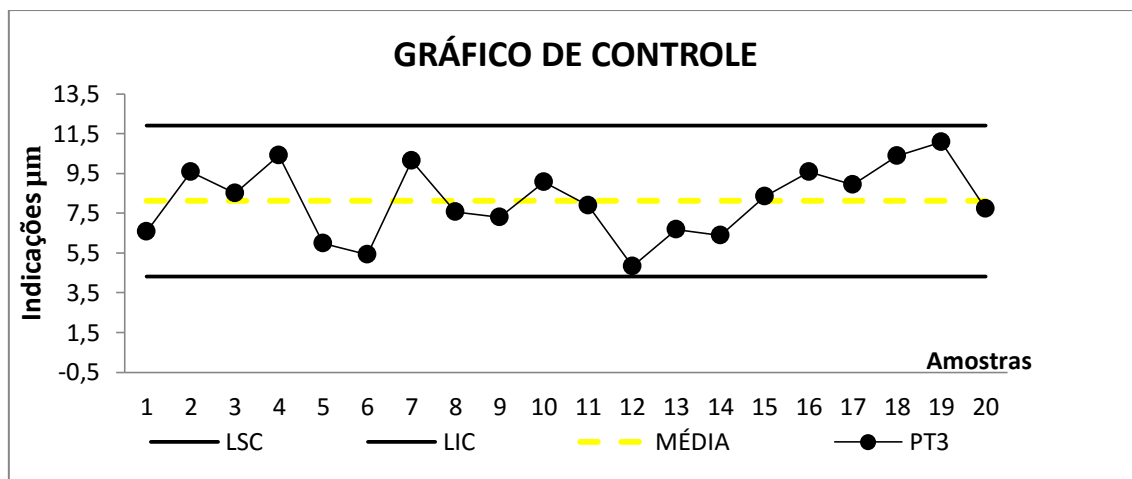
Figura 5.52 – Gráfico de controle para o PT2 – repetibilidade para 95,45%

Como mencionado no início desta seção, para inspeções de engrenagens com módulo de 4 mm é necessário coletar 12 pontos na superfície do perfil evolvente, porém até o presente momento as atenções foram voltadas apenas para a variação dos resultados de erros do conjunto de pontos PT2s. Levando em consideração que o procedimento de análise foi aplicado para os demais pontos coletados, a Tabela 5.17 apresenta os valores relacionados a tais.

Tabela 5.17 – Parâmetros para construção dos gráficos de controle dos valores de erros da curva *NURBS*

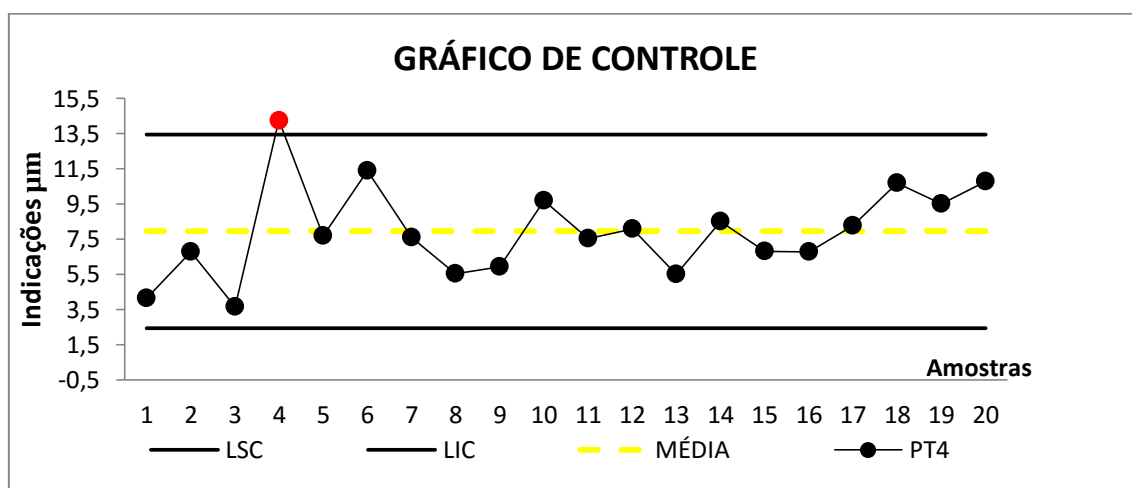
Pontos Coordenados	PT3	PT4	PT5	PT6	PT7	PT8	PT9	PT10	PT11
Parâmetros para construção dos gráficos de controle									
Média das Indicações	8,114 μm	7,946 μm	7,648 μm	6,622 μm	2,608 μm	1,467 μm	0,654 μm	7,252 μm	8,937 μm
Incerteza Padrão (<i>u</i>)	1,782 μm	2,581 μm	2,260 μm	3,096 μm	0,827 μm	0,808 μm	0,498 μm	1,970 μm	1,859 μm
Repetibilidade 95,45 %	3,801 μm	5,506 μm	4,821 μm	6,603 μm	1,764 μm	1,723 μm	1,062 μm	4,202 μm	3,965 μm
LSC	11,916 μm	13,452 μm	12,469 μm	13,227 μm	4,373 μm	3,192 μm	1,717 μm	11,454 μm	12,902 μm
LIC	4,312 μm	2,44 μm	2,827 μm	0,019 μm	0,843 μm	- 0,256 μm	- 0,407 μm	3,05 μm	4,972 μm

De acordo com os dados da Tabela 5.17, foi possível construir os gráficos de controle para os demais valores de erros *NURBS*, dos nove restantes conjuntos de pontos coletados (PT3, PT4,..., PT11). Os gráficos estão representados pelas Figuras 5.53 até a 5.61.



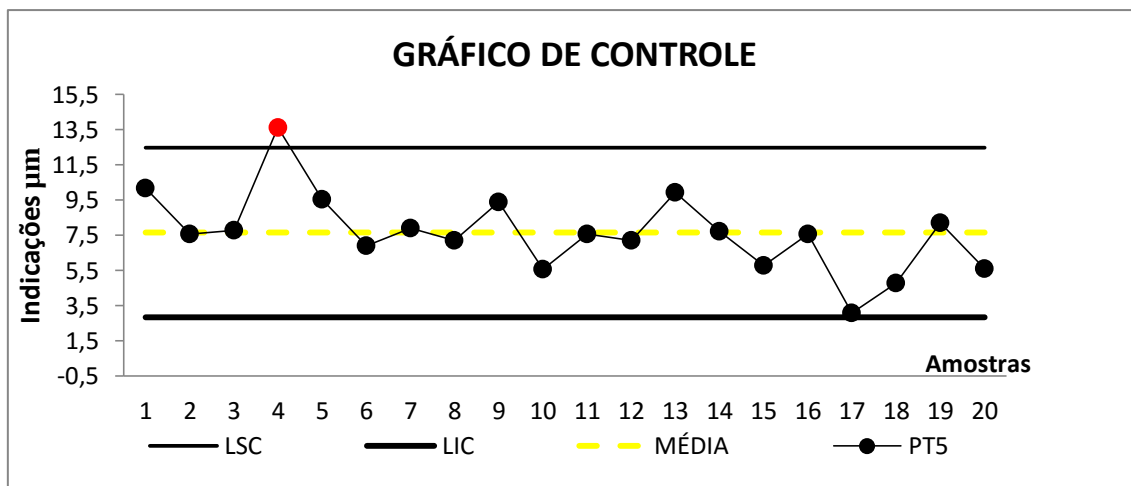
Dados: Amostra=20; LSC = 11,916 μm ; LIC = 4,312 μm ; Média = 8,114 μm ; Repetibilidade = 3,801 μm

Figura 5.53 – Gráfico de controle para o PT3 – repetibilidade para 95,45%



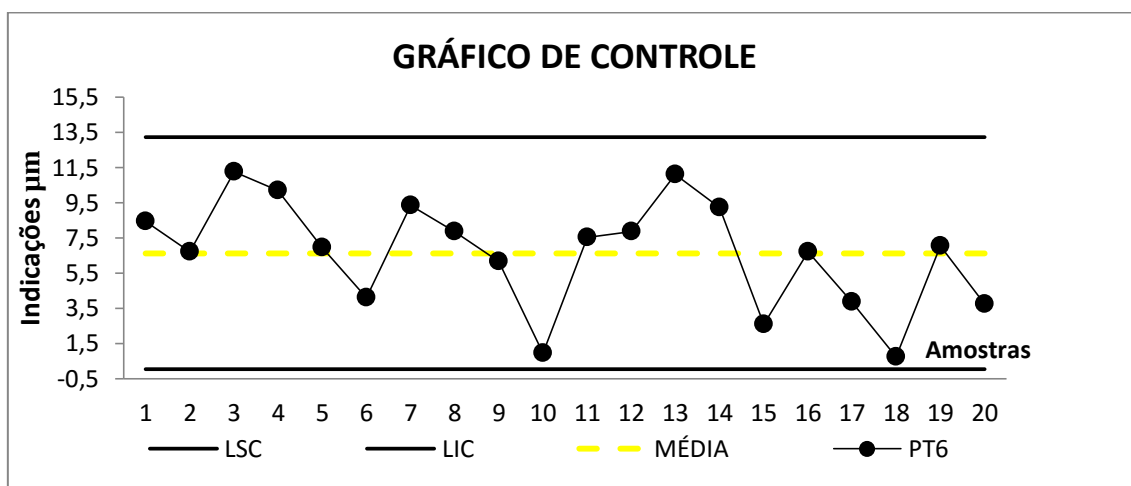
Dados: Amostra=20; LSC = 13,452 μm ; LIC = 2,44 μm ; Média = 7,946 μm ; Repetibilidade = 5,506 μm

Figura 5.54 – Gráfico de controle para o PT4 – repetibilidade para 95,45%



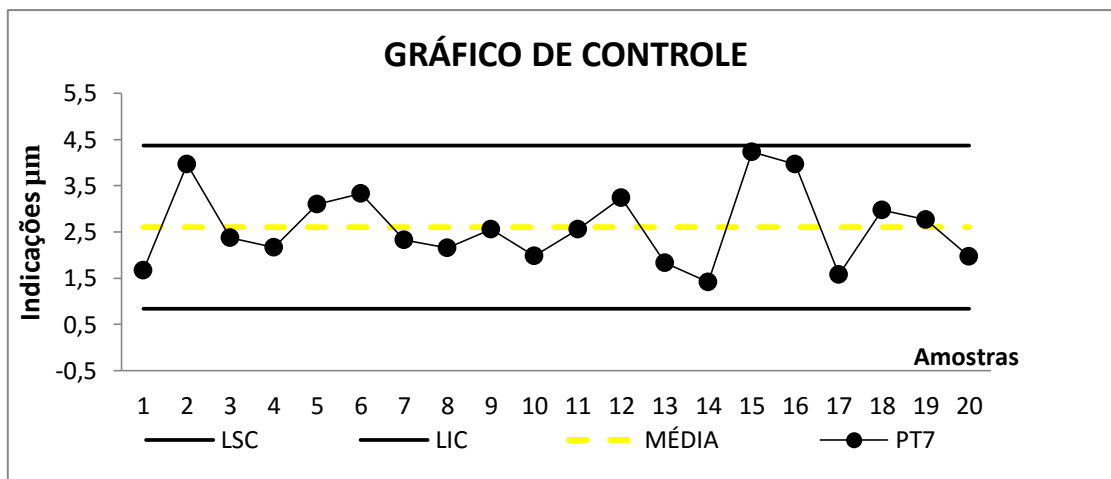
Dados: Amostra=20; LSC = 12,469 μm ; LIC = 2,827 μm ; Média = 7,648 μm ; Repetibilidade = 4,821 μm

Figura 5.55 – Gráfico de controle para o PT5 – repetibilidade para 95,45%



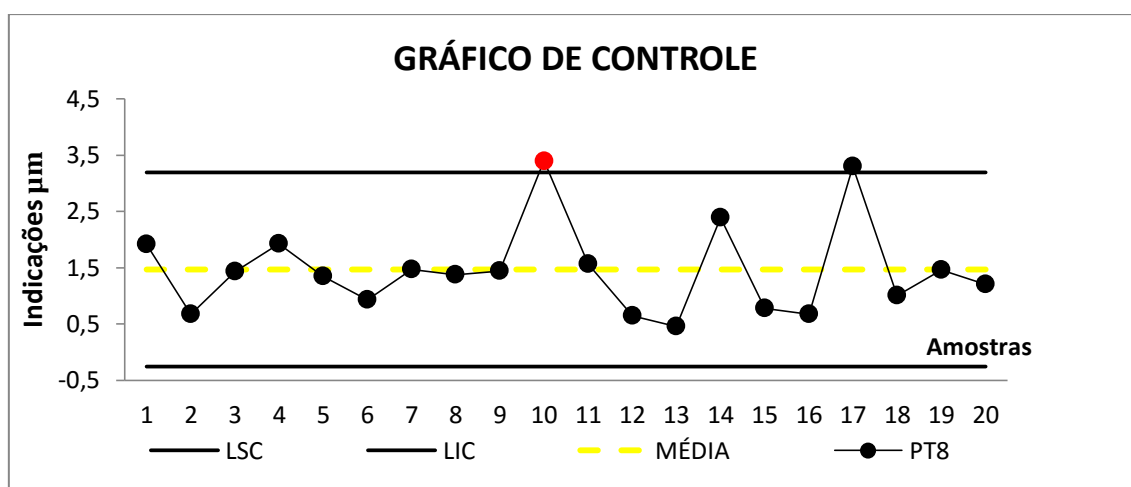
Dados: Amostra=20; LSC = 13,227 μm ; LIC = 0,019 μm ; Média = 6,622 μm ; Repetibilidade = 6,603 μm

Figura 5.56 – Gráfico de controle para o PT6 – repetibilidade para 95,45%



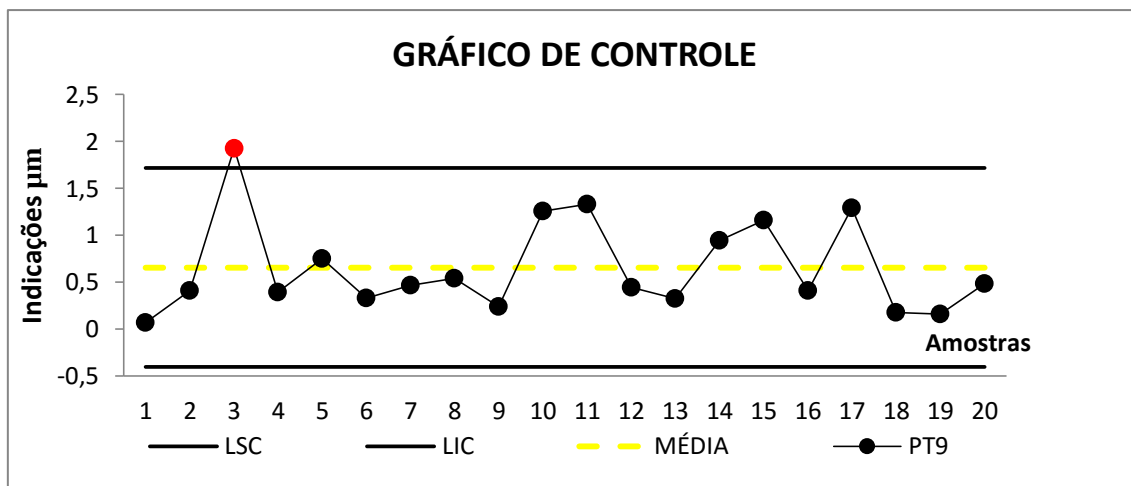
Dados: Amostra=20; LSC = 4,373 μm ; LIC = 0,843 μm ; Média = 2,608 μm ; Repetibilidade = 1,764 μm

Figura 5.57 – Gráfico de controle para o PT7 – repetibilidade para 95,45%



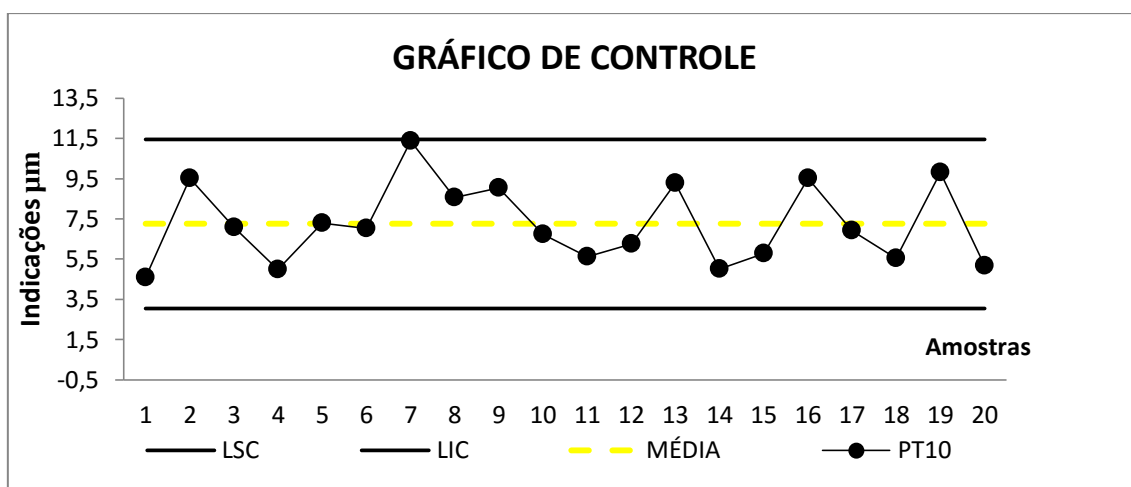
Dados: Amostra=20; LSC = 3,192 μm ; LIC = -0,256 μm ; Média = 1,467 μm ; Repetibilidade = 1,723 μm

Figura 5.58 – Gráfico de controle para o PT8 – repetibilidade para 95,45%



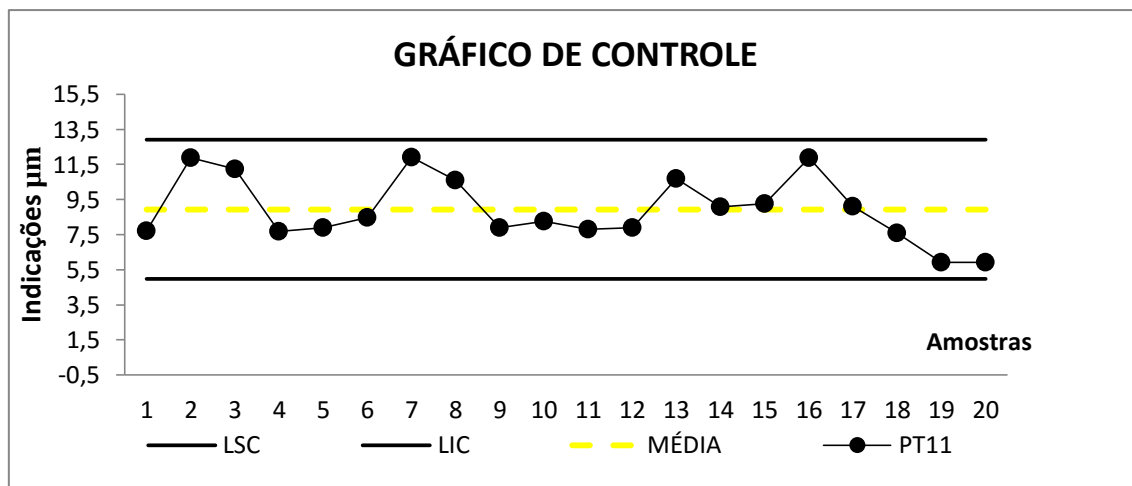
Dados: Amostra=20; LSC = 1,717 μm ; LIC = -0,407 μm ; Média = 0,654 μm ; Repetibilidade = 1,062 μm

Figura 5.59 – Gráfico de controle para o PT9 – repetibilidade para 95,45%



Dados: Amostra=20; LSC = 11,454 μm ; LIC = 3,05 μm ; Média = 7,252 μm ; Repetibilidade = 4,202 μm

Figura 5.60 – Gráfico de controle para o PT10 – repetibilidade para 95,45%



Dados: Amostra=20; LSC = 12,902 μm ; LIC = 4,972 μm ; Média = 8,937 μm ; Repetibilidade = 3,965 μm

Figura 5.61 – Gráfico de controle para o PT11 – repetibilidade para 95,45%

Por meio dos gráficos das Figuras 5.53 à 5.61 é possível verificar que a variabilidade dos resultados de erros da curva *NURBS*, para a metodologia desenvolvida, assume valores pequenos. A maior diferença entre os erros para um conjunto de medições executadas foi identificada no gráfico da Figura 5.54, que são referentes aos pontos PT4s, correspondendo a 10,615 μm , valor este inferior 1,385 μm do limite estabelecido para tal peça, 12 μm . Os gráficos de controle das Figuras 5.54, 5.55, 5.58 e 5.59 apresentaram apenas um ponto coordenado excedendo o Limite Superior de Controle, as demais indicações de erros encontraram-se contidas dentro da faixa de: $M + R_e$ e $M - R_e$. O referido fenômeno pode ser atribuído a uma velocidade de apalpação elevada no instante de captura do ponto específico, uma vez que o ensaio de repetibilidade demanda grande concentração do operador e acuidade visual, tendo em vista a grande quantidade de inspeções que são realizadas, sob mesmas condições.

5.3.5 Teste de Reprodutibilidade com Operadores Distintos

Com a finalidade de analisar a influência de operadores distintos na inspeção do perfil evolvente, um ensaio de reprodutibilidade foi planejado e executado. Para realização deste teste experimental foi utilizado o mesmo objeto de medição do ensaio de repetibilidade, a engrenagem registrada na Figura 5.50 deste capítulo.

Para realização do ensaio de reprodutibilidade dois operadores foram envolvidos, aqui chamados de Op.1 e Op.2, e cada um deles realizaram 20 operações de

medições consecutivas no perfil, totalizando 240 pontos por operador. Os testes apresentados no ensaio de repetibilidade foram considerados no presente experimento e são referentes às medições realizadas pelo Op.1.

De maneira análoga ao ensaio de repetibilidade para inspeção do perfil evolvente já apresentado, conservando as condições de medições usadas na peça citada, e objetivando comparar os resultados com novas medidas realizadas pelo Op.2, as Equações de 5.1 à 5.4 foram empregadas para análise dos novos resultados.

No primeiro momento, a Tabela 5.18 apresenta os valores de erros da curva *NURBS* para as 20 medições executadas pelo Op.2, no qual estão sem o ajuste dos pesos w_i . Os valores referentes aos pontos **PT1** e **PT12** não constam na Tabela 5.18, tendo em vista que são iguais à zero, pelo modelo semi-fechado da curva. As 35 células da tabela, destacada na cor azul, indicam os valores que excederam o erro máximo definido no sistema computacional.

Tabela 5.18 – Erros *NURBS* para 20 as medições executadas no teste de reprodutibilidade pelo Op.2: sem alteração do parâmetro peso w_i

QM	PC	PT2	PT3	PT4	PT5	PT6	PT7	PT8	PT9	PT10	PT11
Erro da curva <i>NURBS</i> - μm											
1		17,548	9,518	4,884	3,601	0,958	5,809	1,57	1,243	6,902	12,895
2		21,739	6,502	4,292	2,727	0,146	4,31	1,202	3,108	4,504	12,568
3		18,646	10,811	6,073	2,983	1,041	4,222	0,375	0,338	8,501	14,279
4		22,328	12,479	7,338	4,993	0,232	0,851	1,353	0,348	7,123	12,658
5		12,94	8,779	6,619	5,229	3,424	3,499	0,607	1,283	8,709	11,267
6		25,925	15,566	2,362	1,677	0,718	4,041	1,126	1,032	8,337	12,896
7		13,117	10,88	3,152	4,965	5,109	2,903	1,348	1,182	10,089	11,123
8		19,241	11,167	7,89	0,207	2,415	3,231	1,118	1,851	10,695	12,11
9		22,415	14,521	4,31	1,046	0,844	3,845	0,631	0,936	9,317	11,603
10		22,793	12,987	2,102	2,922	1,482	3,126	1,94	2,082	10,899	10,527
11		14,935	10,565	5,965	3,037	3,147	2,754	2,241	1,41	9,082	11,629
12		16,139	13,499	6,835	2,201	0,646	2,605	1,718	2,017	10,707	10,228
13		9,984	9,108	5,113	5,814	7,393	1,906	2,458	1,545	8,887	13,229
14		21,969	11,586	4,504	1,416	1,465	3,337	0,828	0,453	9,078	11,056
15		19,125	4,515	3,16	3,627	6,229	3,239	2,029	2,109	9,848	12,518
16		18,554	10,565	6,08	1,384	1,382	2,251	2,016	1,937	11,152	10,479
17		8,459	10,188	4,338	5,988	8,51	3,076	0,972	1,518	10,324	13,897
18		18,817	9,964	6,273	2,186	3,53	1,4	2,84	1,984	9,68	12,966
19		14,801	18,058	7,914	1,821	0,735	3,021	1,274	0,761	9,202	13,035
20		14,592	12,51	5,411	3,202	5,463	2,032	0,827	0,488	8,66	11,984

Legenda da tabela: QM – Quantidade de medições executadas; PC – Pontos coletados;

Aplicando o código de alteração do parâmetro peso w_i nos números da Tabela 5.18, tem-se a Tabela 5.19 na qual ilustra os novos valores de erros com os pesos w_i modificados.

A experiência do Op.2 associada a sua maneira de executar as medições levou a obtenção de maiores valores de erros nos pontos localizados nas extremidades das curvas (**PT2** e **PT11**), como pode ser visto na Tabela 5.18. O comportamento de tais dados se tornou importante para se chegar à conclusão de que: o método de alteração do parâmetro peso w_i funcionou em sua melhor forma para curvas em que os erros se encontraram nos pontos extremos, tendo em vista que todos os valores da Tabela 5.19 foram corrigidos para números inferiores ao limite máximo de 12 μm , em uma quantidade menor de iterações e, conseqüentemente, tempo de execução do código. Experimentos anteriores com resultados semelhantes também ajudaram a se chegar a esta conclusão.

Tabela 5.19 – Erros *NURBS* para 20 as medições executadas no teste de reprodutibilidade: com alteração do parâmetro peso w_i

QM	PC	PT2	PT3	PT4	PT5	PT6	PT7	PT8	PT9	PT10	PT11
Erro da curva <i>NURBS</i> - μm											
1		11,134	6,104	7,071	3,601	0,958	5,809	1,57	1,766	4,365	8,151
2		8,201	8,95	4,292	2,727	0,146	4,31	1,202	3,108	6,192	4,769
3		11,676	6,902	8,759	2,983	1,041	4,222	0,375	0,482	5,355	9,066
4		9,283	9,649	10,59	4,993	0,232	0,851	1,353	0,518	5,274	5,229
5		8,056	5,643	9,587	5,229	3,424	3,499	0,607	1,84	5,499	7,132
6		10,822	11,469	3,379	1,677	0,718	4,041	1,126	1,472	6,129	5,307
7		8,24	6,923	4,595	4,965	5,109	2,903	1,348	1,687	6,336	6,949
8		11,959	7,144	11,326	0,207	2,415	3,231	1,118	2,66	6,691	7,653
9		9,298	10,912	6,21	1,046	0,844	3,845	0,631	1,336	6,86	4,731
10		9,549	9,623	3,058	2,922	1,482	3,126	1,94	2,974	7,985	4,271
11		9,2	6,75	8,615	3,037	3,147	2,754	2,241	1,997	5,698	7,312
12		10,049	8,629	9,866	2,201	0,646	2,605	1,718	2,885	6,712	6,362
13		6,075	5,829	7,441	5,815	7,393	1,906	2,458	2,192	5,562	8,403
14		9,04	8,709	6,468	1,416	1,465	3,337	0,828	0,642	6,7	4,516
15		8,006	3,457	4,62	3,649	6,229	3,239	2,029	3,023	7,208	5,142
16		11,612	6,759	8,775	1,384	1,382	2,251	2,016	2,749	6,987	6,524
17		5,192	6,504	6,328	5,995	8,51	3,076	0,972	2,175	6,47	8,785
18		11,898	6,378	9,063	2,186	3,53	1,4	2,84	2,817	6,063	8,174
19		8,996	11,523	11,241	1,821	0,735	3,021	1,274	1,083	5,781	8,233
20		9,061	7,97	7,812	3,202	5,463	2,032	0,827	0,713	5,456	7,614

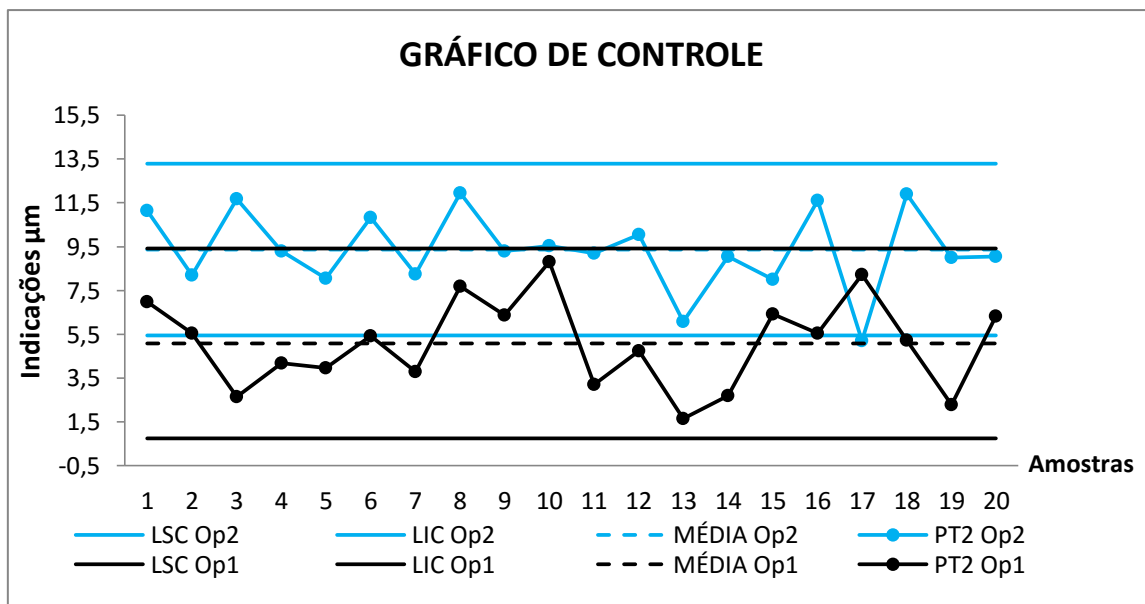
Aplicando as metodologias de análise para os valores da Tabela 5.18, foi possível calcular: média das indicações, incerteza padrão (u), repetibilidade para

95,45%, Limite Superior de Controle (LSC) e Limite Inferior de Controle (LIC). A Tabela 5.20 apresenta os valores citados.

Tabela 5.20 – Parâmetros para construção dos gráficos de controle dos erros *NURBS*

Pontos Coordenados	PT2	PT3	PT4	PT5	PT6	PT7	PT8	PT9	PT10	PT11
Parâmetros para construção dos gráficos de controle										
Média das Indicações	9,367 μm	7,791 μm	7,454 μm	3,053 μm	2,743 μm	3,073 μm	1,424 μm	1,905 μm	6,166 μm	6,716 μm
Incerteza Padrão (u)	1,836 μm	2,112 μm	2,545 μm	1,650 μm	2,531 μm	1,109 μm	0,665 μm	0,897 μm	0,825 μm	1,570 μm
Repetibilidade 95,45 %	3,917 μm	4,506 μm	5,430 μm	3,520 μm	5,40 μm	2,370 μm	1,420 μm	1,914 μm	1,760 μm	3,347 μm
LSC	13,284 μm	12,297 μm	12,885 μm	6,572 μm	8,142 μm	5,439 μm	2,843 μm	3,82 μm	7,925 μm	10,063 μm
LIC	5,45 μm	3,285 μm	2,025 μm	- 0,466 μm	- 2,656 μm	0,707 μm	0,005 μm	- 0,008 μm	4,407 μm	3,369 μm

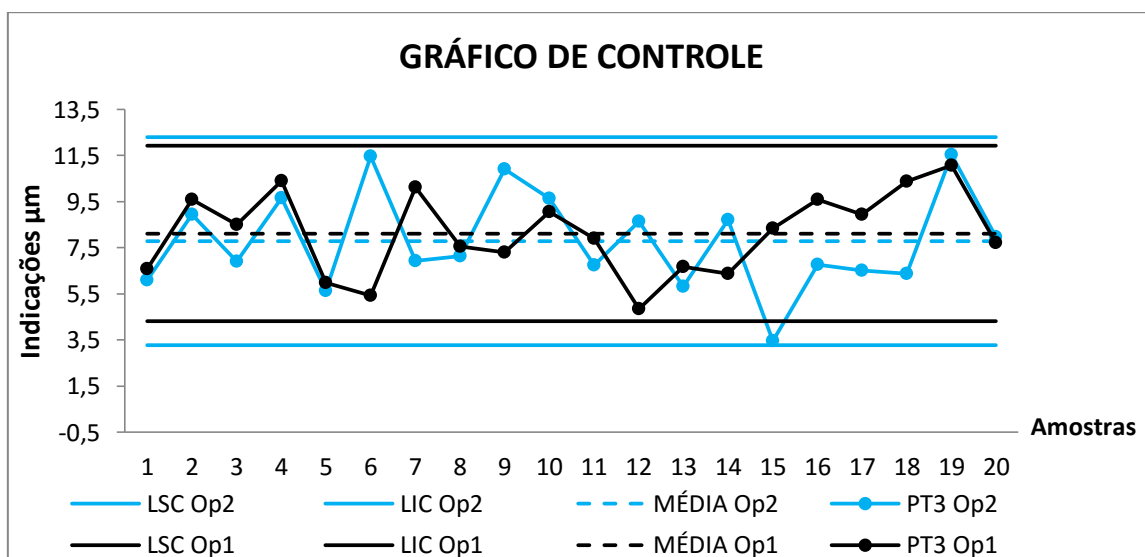
Com os valores da Tabela 5.20, os gráficos de controle para os dois operadores foram construídos e estão apresentados nas Figuras de 5.62 até 5.71, registrando as reprodutibilidades do conjunto de pontos, PT2s, PT3s, ... PT11s. As linhas correspondentes a cada operador são representadas por cores diferentes: na cor azul evidenciando as indicações do Op.1 e na cor preta as indicações do Op. 2.



Dados: Amostra=20; LSC = 13,284 μm ; LIC = 5,45 μm ; Média = 9,367 μm ; Repetibilidade = 3,917 μm

Amostra=20; LSC = 9,418 μm ; LIC = 0,754 μm ; Média = 5,086 μm ; Repetibilidade = 4,332 μm

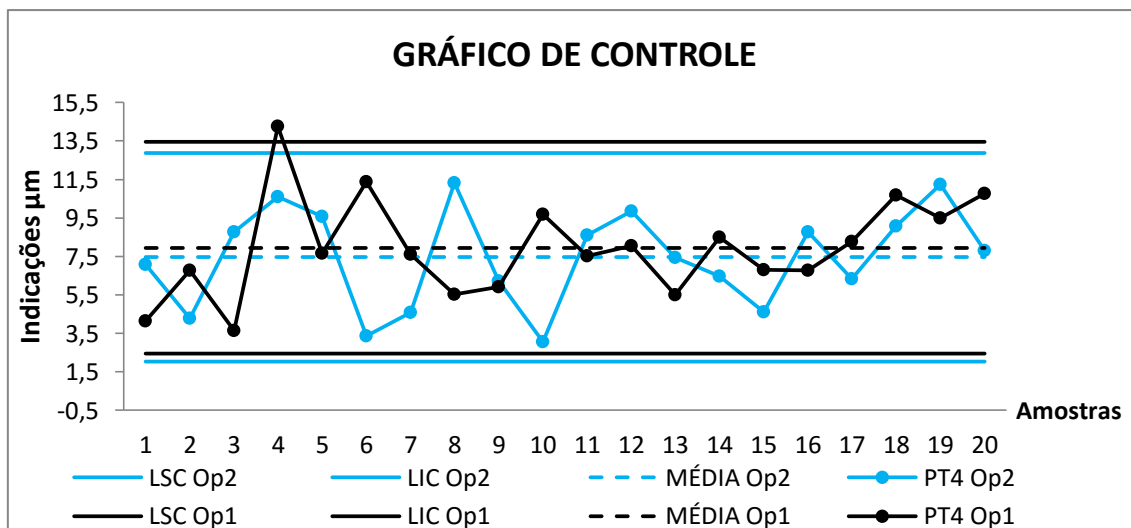
Figura 5.62 – Gráfico de controle para o PT2 – reprodutibilidade para 95,45%



Dados: Amostra=20; LSC = 12,297 μm ; LIC = 3,285 μm ; Média = 7,791 μm ; Repetibilidade = 4,506 μm

Amostra=20; LSC = 11,916 μm ; LIC = 4,312 μm ; Média = 8,114 μm ; Repetibilidade = 3,801 μm

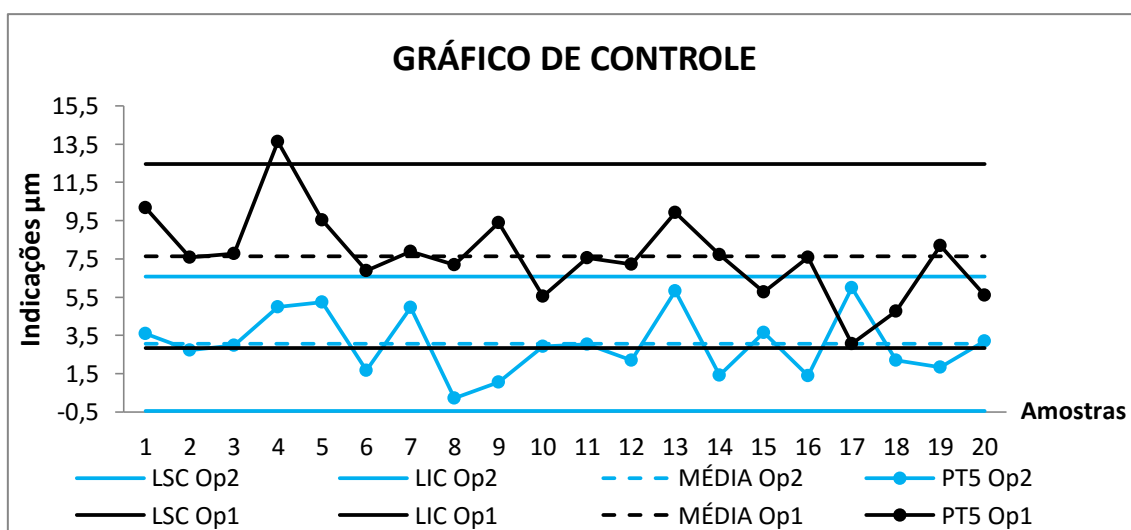
Figura 5.63 – Gráfico de controle para o PT3 – reprodutibilidade para 95,45%



Dados: Amostra=20; LSC = 12,885 μm ; LIC = 2,025 μm ; Média = 7,454 μm ; Repetibilidade = 5,430 μm

Amostra=20; LSC = 13,452 μm ; LIC = 2,44 μm ; Média = 7,946 μm ; Repetibilidade = 5,506 μm

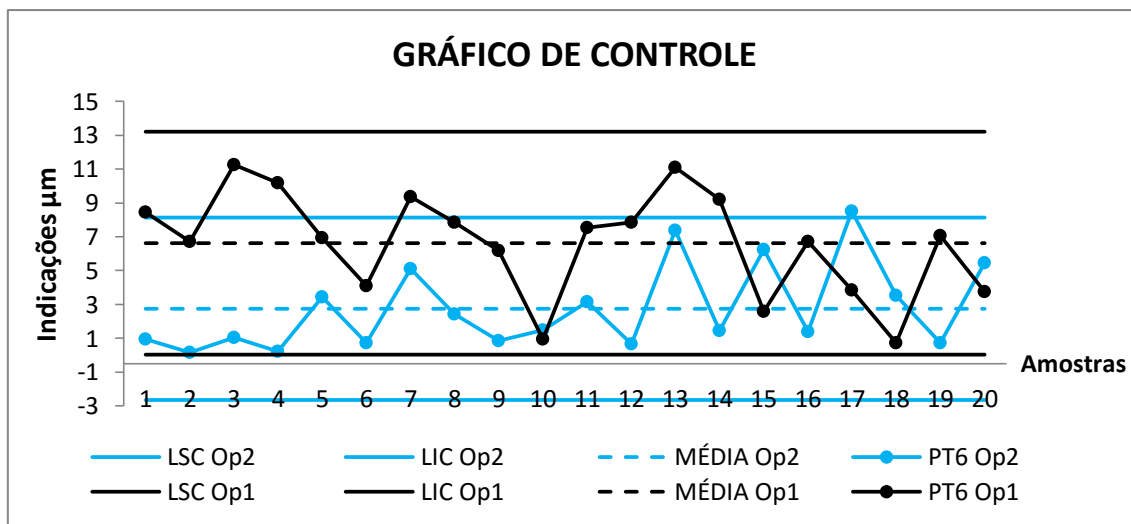
Figura 5.64 – Gráfico de controle para o PT4 – reprodutibilidade para 95,45%



Dados: Amostra=20; LSC = 6,572 μm ; LIC = -0,466 μm ; Média = 3,053 μm ; Repetibilidade = 3,520 μm

Amostra=20; LSC = 12,469 μm ; LIC = 2,827 μm ; Média = 7,648 μm ; Repetibilidade = 4,821 μm

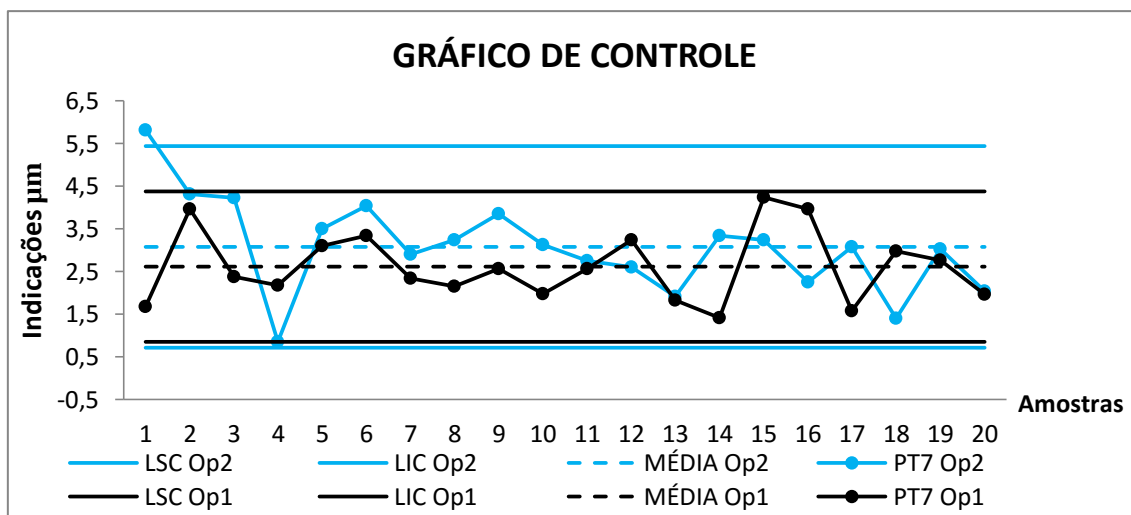
Figura 5.65 – Gráfico de controle para o PT5 – reprodutibilidade para 95,45%



Dados: Amostra=20; LSC = 8,142 μm ; LIC = -2,656 μm ; Média = 2,743 μm ; Repetibilidade = 5,540 μm

Amostra=20; LSC = 13,227 μm ; LIC = 0,019 μm ; Média = 6,622 μm ; Repetibilidade = 6,603 μm

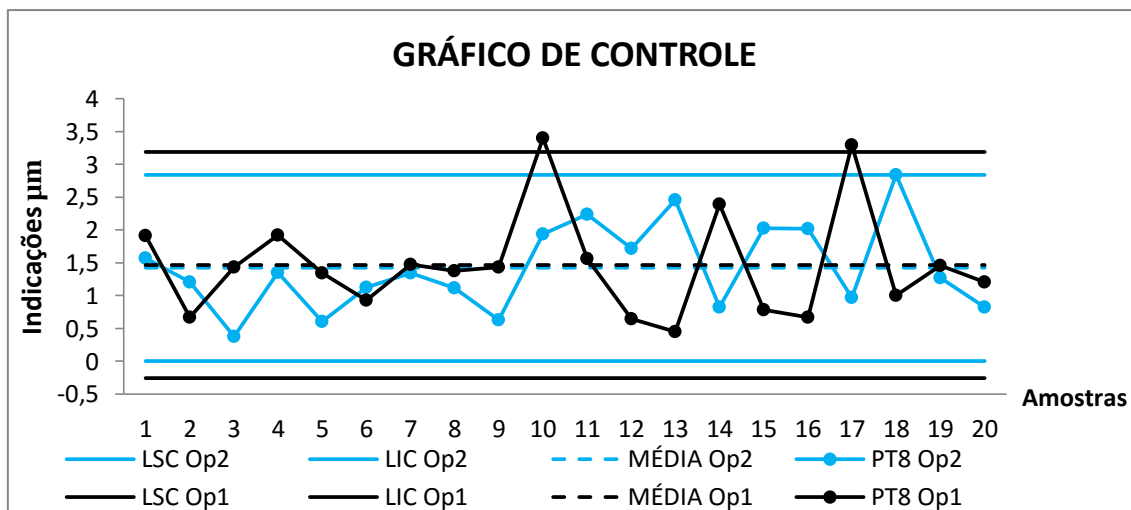
Figura 5.66 – Gráfico de controle para o PT6 – reprodutibilidade para 95,45%



Dados: Amostra=20; LSC = 5,439 μm ; LIC = 0,707 μm ; Média = 3,073 μm ; Repetibilidade = 2,370 μm

Amostra=20; LSC = 4,373 μm ; LIC = 0,843 μm ; Média = 2,608 μm ; Repetibilidade = 1,764 μm

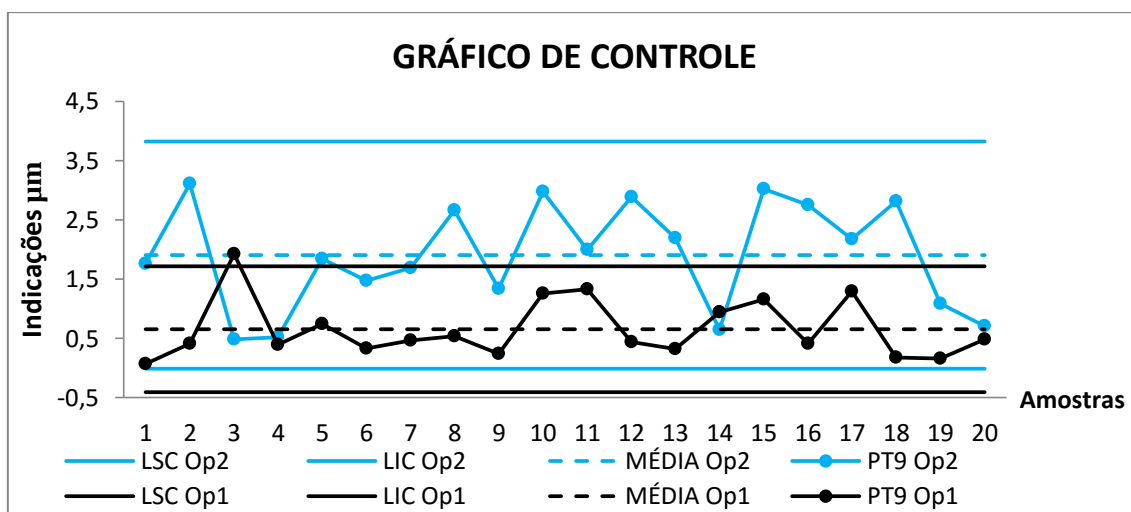
Figura 5.67 – Gráfico de controle para o PT7 – reprodutibilidade para 95,45%



Dados: Amostra=20; LSC = 2,843 μm ; LIC = 0,005 μm ; Média = 1,424 μm ; Repetibilidade = 1,420 μm

Amostra=20; LSC = 3,192 μm ; LIC = -0,256 μm ; Média = 1,467 μm ; Repetibilidade = 1,723 μm

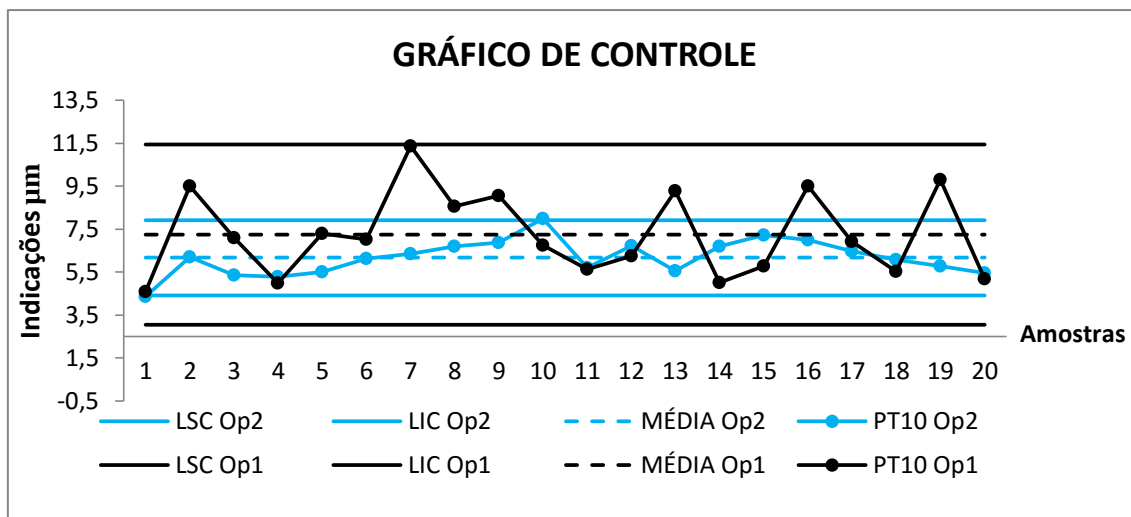
Figura 5.68 – Gráfico de controle para o PT8 – reprodutibilidade para 95,45%



Dados: Amostra=20; LSC = 3,82 μm ; LIC = -0,008 μm ; Média = 1,905 μm ; Repetibilidade = 1,914 μm

Amostra=20; LSC = 1,717 μm ; LIC = -0,407 μm ; Média = 0,654 μm ; Repetibilidade = 1,062 μm

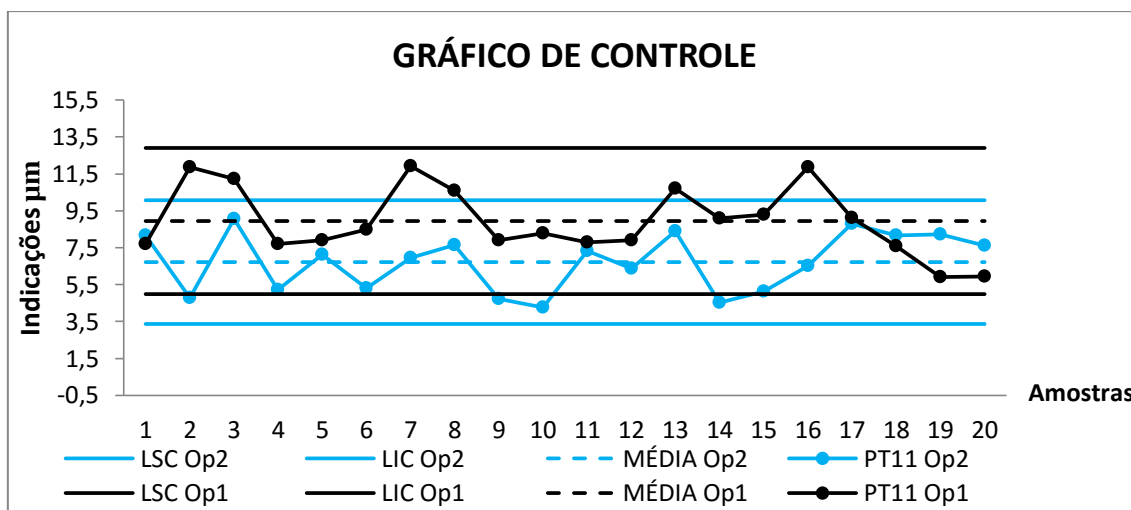
Figura 5.69 – Gráfico de controle para o PT9 – reprodutibilidade para 95,45%



Dados: Amostra=20; LSC = 7,925 μm ; LIC = 4,407 μm ; Média = 6,166 μm ; Repetibilidade = 1,760 μm

Amostra=20; LSC = 11,454 μm ; LIC = 3,05 μm ; Média = 7,252 μm ; Repetibilidade = 4,202 μm

Figura 5.70 – Gráfico de controle para o PT10 – reprodutibilidade para 95,45%



Dados: Amostra=20; LSC = 10,063 μm ; LIC = 3,369 μm ; Média = 6,716 μm ; Repetibilidade = 3,347 μm

Amostra=20; LSC = 12,902 μm ; LIC = 4,972 μm ; Média = 8,937 μm ; Repetibilidade = 3,965 μm

Figura 5.71 – Gráfico de controle para o PT11 – reprodutibilidade para 95,45%

Como pode ser observado nos gráficos de controle de reprodutibilidade, ainda que mínima, existe uma influência do operador nos resultados das indicações, à depender de sua habilidade. Tendo como referência as médias das indicações nos casos extremos, em que satisfazem aos gráficos das Figura 5.62 para os PT2s e Figura 5.68 para os PT8s, a diferença entre os valores de média dos operadores correspondem a,

respectivamente: 4,281 μm e 0,044 μm , em que sobre as médias incidem a dispersão dos valores dos erros *NURBS*.

Para o caso das medições executados pelo Op2, os gráficos correspondentes a Figura 5.62 dos PT2s, Figura 5.66 dos PT6s e Figura 5.67 dos PT7s registram pontos ligeiramente fora dos limites de controle, podendo ser justificado pelos baixos níveis de dispersões das amostras, e consequentemente, pequenos valores de repetibilidade, LSC e LIC, no qual correspondem, nesta ordem a: 3,917 μm , 13,284 μm e 5,45 μm para os PT2s / 5,40 μm , 8,142 μm e -2,656 μm para os PT6s / 2,370 μm , 5,439 μm e 0,707 μm para os PT7s, sendo a diferença entre os limites de controle destes casos, bem abaixo do valor de erro estabelecidos na programação.

Esta mínima influência dos operadores nos resultados das indicações se dá pelo fato das tarefas de inspeções estarem sendo executadas seguindo uma estratégia definida, e pela possibilidade de ajuste do parâmetro peso w_i , significando este um grau de liberdade a mais neste trabalho de inspeção.

Ao teste de reprodutibilidade com operadores distintos, a plataforma SIENG – MMC permitiu uma boa interação com o operador convidado à auxiliar na realização deste experimento, tornando as inspeções das engrenagens mais fáceis e rápidas.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente capítulo foram expostos todos os procedimentos experimentais realizados no âmbito deste trabalho de tese. As engrenagens fabricadas e utilizadas nas inspeções foram qualificadas pelo Laboratório de Engenharia de Precisão, usando uma Máquina de Medição por Coordenadas automática, modelo *Crysta-Apex S 7106*. Uma metodologia para comparação dos perfis medidos das peças e o seus respectivos desenhados em plataforma CAD foi desenvolvida. Após procedimentos descritos, as engrenagens qualificadas foram inspecionadas utilizando a máquina fim deste trabalho, a MMC manual *MICRO-HITE 3D*, do Laboratório de Metrologia do IFPB. Neste sentido, foi apresentado o processo de inicialização desta MMC e a metodologia aplicada para posicionar a coordenada horizontal (X) no eixo de simetria longitudinal de um dos dentes da peça, procedimento de fundamental importância na coerência dos resultados dos testes experimentais. Ensaio para definição do Desvio Total de Perfil (F_α) foram executados. Para os casos em que as curvas *NURBS* geradas ultrapassaram os valores de Erros Máximos definidos, a metodologia/rotina de programação para

alteração automática do parâmetro peso w_i foi aplicada, em que se obtiveram bons resultados. Valores satisfatórios de desvios, bem próximos dos obtidos no processo de qualificação das peças com a MMC automática, foram alcançados, validando assim o método desenvolvido e simulado em ambiente computacional. Ensaios metrológicos de repetibilidade e reprodutibilidade com operadores distintos, usando o modelo *NURBS* e a metodologia proposta, foram realizados para validação das estratégias de inspeção dos perfis evolventes, a fim de comprovar as análises das simulações realizadas no Capítulo IV. Também foram destacados os procedimentos e cuidados que devem ser seguidos durante a inspeção com apalpadores *touch trigger*, no intuito de verificar a influencia do tamanho da esfera de rubi na inspeção de formas curvas, como por exemplo, o perfil evolvente de uma engrenagem cilíndrica de dentes retos.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÃO

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho de tese teve como objetivo desenvolver uma estratégia, baseada no modelo matemático *NURBS*, para inspeção do perfil evolvente de engrenagens cilíndricas de dentes retos, no sentido de determinar o Desvio Total de Perfil (F_α), usando Máquinas de Medição por Coordenadas (MMCs) manuais, equipadas com sensor de contato, os *Touch Trigger Probe* (TTP). A norma de referência utilizada nesta pesquisa foi a ISO 1328.

As principais conclusões deste trabalho são:

1) Para a estratégia desenvolvida no Capítulo IV, em ambiente de simulação computacional, foram estabelecidos valores de erros máximos permissíveis da curva *NURBS* para os perfis evolventes analisados, a depender do módulo da engrenagem, associando tais valores de desvios ao grau de qualidade da peça, segundo a ISO 1328. Neste sentido, para inspeções que excederam os erros *NURBS* definidos, a metodologia de alteração automática dos pesos w_i foi aplicada e resultados satisfatórios foram alcançados. Os testes foram realizados em engrenagens com módulos variando de 1 a 10 mm.

2) Em ambiente de simulação foi possível validar a metodologia de alteração automática do parâmetro peso w_i aplicando-a aos casos pertinentes. Para todas as simulações necessárias foi possível comprovar a boa funcionalidade do método.

3) Ainda em procedimentos de simulação, foi analisado o Desvio Total de Perfil (F_α), segundo a ISO 1328. Com as estratégias de inspeção definidas, tornou-se possível alcançar valores de desvios de perfil bastante pequenos, classificando as engrenagens de acordo com os graus de qualidade da norma supracitada.

4) Para uma análise prática e mais rápida dos dados coletados usando a MMC manual, desenvolveu-se a interface gráfica chamada SIENG – MMC, baseada na estratégia de medição das engrenagens. A SIENG - MMC permitiu uma boa interação com o operador, melhor evidenciada no teste de reprodutibilidade com operadores distintos, em que foi convidado um terceiro para colaboração na obtenção dos resultados.

5) Após os bons resultados obtidos nas simulações, partiu-se para os procedimentos experimentais. Nesta seção todas as engrenagens utilizadas foram qualificadas usando a MMC CNC *Crysta-Apex* e os ensaios de análise de desvio de perfil foram executados usando a MMC manual *Micro-Hite 3D*. Nos testes para geração da curva *NURBS* do perfil evolvente, erros superiores ao definido no sistema computacional foram encontrados. A estes casos a metodologia de alteração do parâmetro peso w_i foi aplicada, obtendo o sucesso desejado. Na determinação do Desvio Total de Perfil (F_a) foi possível constatar uma metodologia eficaz, na qual todas as engrenagens apresentaram, com o modelo *NURBS* e a MMC manual, valores de desvios na mesma ordem de grandeza que os resultados obtidos com a MMC CNC, tornando concluir que é possível inspecionar o perfil evolvente de engrenagens usando máquinas manuais e *softwares* limitados instalados no sistema de controle.

6) Para os teste de repetibilidade foi possível observar que a variabilidade dos resultados das indicações de erros *NURBS* na geração do perfil evolvente assumiu valores pequenos, por esse motivo, alguns gráficos de controle apresentaram pontos coordenados excedendo os limites superior e inferior. Pontos excedentes aos limites de controle também podem ser justificado em ensaios de repetibilidade pela demanda de medições necessárias a realização do experimento, exigindo ao operador grande concentração e acuidade visual. Ao referido teste também foi necessário utilizar a metodologia para alteração automática dos pesos, no qual foi possível obter menores resultados de erros.

7) No teste de reprodutibilidade com operadores distintos tornou-se possível constatar que, ainda que mínima, existe uma influência do operador nos resultados das indicações, à depender de sua habilidade. A pequena influência dos operadores nos resultados das medições é considerada pelo fato das tarefas de inspeções serem executadas seguindo uma metodologia definida, e pela possibilidade de ajuste do

parâmetro peso w_i , significando este um grau de liberdade a mais neste trabalho de inspeção. Nas inspeções realizadas pelo Op.2, devido a sua experiência e maneira de executar as aquisições na superfície do perfil evolvente, maiores valores de erros nos pontos localizados nas extremidades das curvas. Com a avaliação destes dados foi possível concluir que: o método de alteração do parâmetro peso w_i funcionou em seu melhor desempenho para curvas em que os maiores erros se encontravam nas regiões extremas do perfil.

Com a realização dos procedimentos experimentais planejados, executados e apresentados neste documento de tese, tornou-se possível concluir que as estratégias desenvolvidas foram eficazes, tendo em vista que as engrenagens inspecionadas apresentaram valores de Desvio Total de Perfil (F_a) na mesma ordem de grandeza dos valores da MMC CNC; além dos bons resultados dos parâmetros metrológicos de repetibilidade e reprodutibilidade. Sendo assim, torna-se possível a utilização de Máquina de Medição por Coordenadas manuais na inspeção de perfis evolventes de engrenagens cilíndricas de dentes retos, com uma mínima quantidade de pontos coletados.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1) Com base nas estratégia de medição e alteração do parâmetros peso w_i da função *NURBS* desenvolvida para engrenagens cilíndricas de dentes retos, desenvolver metodologia para inspeção de engrenagens do tipo: cônicas e hiperbolóidicas, usando MMC manual e apalpador ponto a ponto;

2) Automatizar o processo para determinação da quantidade pontos de controle na inspeção de engrenagens, independente do módulo;

3) Aplicar a metodologia desenvolvida para inspeção de outras peças, com os ajustes que forem necessários.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AALAM, J.; AL-AHMARI, A. M. A.; 2015, “*Optimizing Parameters of Freeform Surface Reconstruction Using CMM*”. *Journal Measurement*, vol. 64, pp. 17-28.

ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A.; PEZZOTA, C.; 2003, “*Controle Geométrico Através da Metrologia Óptica: Chegando Onde Nenhum Outro Meio de Medição Consegue Chegar*”. *Metrologia e Instrumentação*, São Paulo. SP. pp. 38-42.

ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A.; 2008, “*Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial*”; Editora. Manole. 1º Edição.

ANDREZZA, I. L. P.; SILVA, V. N.; NÓBREGA, L. H. M. S.; SILVA, J. B. A.; SILVA, E. C. M.; 2011, “*Aplication Based on NURBS for Obtaining Free Form Curves and Surfaces Using Coordinate Measurement Machine (CMM)*”. 21nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM), Natal, RN, Brasil.

ARENHART, F. A.; 2007, “*Desempenho Metrológico de Máquinas de Medição por Coordenadas no Âmbito Industrial Brasileiro*”. Trabalho submetido à ABCM para participação do Prêmio ABCM-Yehan Numata, na categoria de graduação. UFSC, Florianópolis.

BARBARINI, L. H. M.; 2007, “*Síntese de Cascos de Embarcações através de Métodos de Otimização Aplicados a Curvas B-splines*”. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, USP.

BOSCH, J. A.; 1995, “*Coordinate Measuring Machines and Systems*”. Marcel Dekker, New York.

BRITO NETO, A. A.; 2003, “*A Tecnologia da Medição por Coordenadas na Calibração de Peças Padrão e Medições de Peças com Geometrias Complexas*”. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Metrologia Científica e Industrial. Laboratório de Metrologia e Automatização (LABMETRO), UFSC, Florianópolis, SC, Brasil.

BRITO, J. N.; 1999, “*Desenvolvimento de uma Interface Computacional Aplicada ao Projeto de Sistemas Engrenados*”. XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Águas de Lindóia, São Paulo.

BUENO, M. A. M.; 2009, “*Sensores Eletrônicos para uso em Máquinas de Medir por Coordenadas*”. Revista Metrologia e Instrumentação, vol. 52.

CAUCHICK-MIGUEL, P. A., KING, T. G.; 1997, “*Factors which Influence CMM Touch Trigger Probe Performance*”. Tool Manufacture, vol. 38, pp. 363-374.

CHENG, K.; GAO, C. H.; WEBB, D.; 2004, “*Invertigation on Sampling Size Optimisation in Gear Tooth Surface Measurement Using a CMM*”. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 24, pp. 599-606.

COELHO, R. T.; GUERRA, M. D.; 2006, “*Development of a Low Cost Touch Trigger Probe for CNC Lathes*”. Journal of Materials Processing Technology, vol. 179, pp. 117-123.

COLLINS, J. A.; 2006, “*Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas – Uma Perspectiva de Prevenção de Falhas*”, Editora LTC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

DEBOOR, C.; 1978, “*A Practical Guide to Splines*”. New York, Springer-Verlang.

ELSAESSER, B.; 1998, “*Approximation with Rational B-spline Curves and Surfaces*”. Proceedings of the International Conference on Mathematical Methods for Curves and Surfaces, vol. 1, pp. 87-94.

EMAMI, M. M.; AREZOO, B.; 2010, “*A Look-Ahead Command Generator with Control Over Trajectory and Chord Error for NURBS Curve with Unknown Arc Length*”. Computer Aided Design, vol. 42, nº 7.

ENAMI, K.; KUO, C.; NOGAMI T.; HIRAKI, M.; TAKAMASU, K.; OZONO S.; 1999, “*Development of a Nano-Probe System Using Optical Scanning*”. Proc. IMEKO-XV, pag. 189 – 192.

FERREIRA, W. R. B.; 2011, “*Planejamento de Trajetórias Robóticas Utilizando B-Splines*”. Dissertação de mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, UFU, Uberlândia, MG, Brasil.

GADELMAWLA, E. S.; 2011, “*Computer Vision Algorithms for Measurement and Inspection of Spur Gears*”. Journal Measurement, vol. 44, pp. 1669-1678.

GAO, W.; ITO, S.; SHIMIZU, Y.; XU, B.; 2015, “*Pitch Deviation Measurement of an Involute Spur Gear by a Rotary Profiling System*”. Precision Engineering, vol. 39, pp. 152-160.

GASPARIN, A. L.; 2004, “*Comportamento Mecânico de Polímero Termoplástico para Aplicação em Engrenagem Automotiva*”, Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

GEAR METROLOGY; 2003, CIRP Annals – Manufacturing Technolog, Volume 52, Issue 2, Pag. 659-695. G Goch

GEMAQUE, M. J. A.; 2004, “*Abordagem para Solução de um Problema Metrológico na Indústria – Medição de Engrenagens-*”. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Metrologia Científica e Industrial, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil.

GENTA, G.; HILLER, J.; SILLER, H. R.; DE CHIFFRE, L.; GAMEROS, A.; 2015, “*A Reverse Engineering Methodology For Nickel Alloy Turbine Blades with Internal Features*”. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, vol. 9, pp. 116-124.

HAEFNER, B.; QUIRING, M.; GULLASCH, J.; GLASER, G.; DMYTRUK, T.; LANZA, G.; 2015, “*Finite Element Simulation for Quality Dependent Lifetime Analysis of Micro Gears*”. 15th CIRP conference on Modelling of Machining Operations. Procedia CIRP. Vol. 31. Pag. 41 – 46.

HAMBURG-PIEKAR, D. S.; 2006, “*Calibração de Peças Padrão em Máquinas de Medir por Coordenadas*”. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial. UFSC, Florianópolis.

HEXAGON METROLOGY, “*Non-Contact Measurement*”, Disponível em <<http://brownandsharpe.com/non-contact-measurement>> (accessado em Março, 2010).

HOOVER, S.; 2002, “*Simplifying Gear Metrology*”.

HONG, D.; 2016, “*Effects of Weights in NURBS*”. Department of Mechanical Engineering, State University of New York at Stony Brook. Site: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.538.4700&rep=rep1&type=pdf>; acessado em 12/04/2016.

HUGHES, T. J.R.; YONGJIE, Z.; BAZILEVS, Y.; GOSWAMI, S.; BAJAJ, C. L.; 2007, “*Patient-Specific Vascular NURBS Modeling for Isogeometric Analysis of Blood Flow*”. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 196, pp. 2943-2959.

INMETRO; 2003, “*Guia para a Expressão da INcerteza de Medição*”. 3ª Edição; ABNT; INMETRO, Rio de Janeiro.

KAPIL, G.; NEELESH, K. J.; 2014, “*Analysis and Optimization of Micro-Geometry of Miniature Spur Gears Manufactured by Wire Electric Discharge Machining*”. Precision Engineering, Elsevier; vol. 38, pp. 728-737.

KRUTH, J. P.; KERSTENS A.; 1998, “*Manufacturability of Reverse Engineered CAD-Models: A Case Study*”. SSM, vol. 146, pp. 187-195.

LERIOS, A.; 2001, “*B-Spline Curve Visualization – A Simple Program that Allows the User to Visualize and Manipulate B-Spline Curves*”.

LI, G.; GU, P., 2004, “*Free Form Surface Inspection Techniques State of the Art Review*”. Computer aided design. pp 1395-1417. Canadá.

LIMA JÚNIOR, J. C.; 2003, “*Determinação da Planeza das Mesas Metrológicas das Máquinas de Medição por Coordenadas*”. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.

LIMA JÚNIOR, J. C.; 2007, “*Aplicação de Redes Neurais Artificiais para Determinar Parâmetros de Geometrias Substitutas em MMC*”. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.

LIN, K. Y.; UENG, W. D.; LAI, J.Y.; 2008, “*CNC Codes Conversion From Linear and Circular Paths to NURBS Curves*”. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 39, pp. 760-773.

MARTIN, P.; LELEU, S.; BIGOT, R.; BAUDOUIN, C.; 2008, “*Gear Geometric Control Software: Approach by Entities*”. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol 38, pp. 120-129.

MAZZO, N.; 2013, “*Engrenagens Cilíndricas – Da Concepção à Fabricação*”. Editora Blucher. 2º edição.

MINETTO, C. F.; 2003, “*Um Estudo sobre as Curvas NURBS*”. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Matemática Aplicada, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

MINETTO, C. F.; *apud* NURBS CURVES AND SURFACES; 2003, “*NURBS Curves and Surfaces. A General Set of Classes Written in Java to Represent and Manipulate Non-Uniform Rational B-Spline (NURBS)*”.

MURAROLLI, P. L.; 2012, “*Implementation of na Automatic Mesh Generator for Finite Element Method*”. Perspectivas em Ciências Tecnológicas, vol. 1, nº 1, pp. 91-129. Faculdade de Tecnologia, Ciências e Educação, FATECE, Pirassununga, SP, Brasil.

NÓBREGA, L. H. M. S.; 2011, “*Projeto e Desenvolvimento de um Apalpador Touch Trigger de Baixo Custo para Medição por Coordenadas*”. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.

NÓBREGA, L. H. M. S.; ALMEIDA, C. H. A.; SILVA, E. C. M.; SILVA, V. N.; ANDREZZA, I. L. P.; LIMA JR, J. C.; SILVA, J. B. A.; SILVA, R. F. A.; 2013, “*Aplication of NURBS for Obtaining Free Form Curves and Surfaces in Spur and Helical Gears by Using Coordinate Measurement Machine (CMM)*”. 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM), Ribeirão Preto, SP, Brasil.

NÓBREGA, L. H. M. S.; SILVA, E. C. M.; SILVA, V. N.; ANDREZZA, I. L. P.; LIMA JR, J. C.; SILVA, J. B. A.; SILVA, R. F. A.; 2014, “*Aplication of NURBS for Obtaining Free Form Curves and Surfaces in Spur and Helical Gears by Using Coordinate Measurement Machine (CMM)*”. Journal of Mechanics Engineering and Automation, vol. 4, nº 5, pp. 432-440.

NORONHA, J. L.; 1994, “*Qualificação de Máquinas de Medir por Coordenadas com Padrões Corporificados*”. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial. UFSC, Florianópolis.

OKUYAMA, E.; KIYONO, S.; MORITOKO, H.; 1994, “*Investigation of an Optical Noncontact Gear Geometry Measurement System: Measurement of Pitch Errors and Tooth Profiles*”. Precision Eng. Pag. 177 – 123.

OLIVEIRA, A. L.; 2003, “*Validação de Processos de Medição por Coordenadas em Operações de Controle da Qualidade*”. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial. UFSC, Florianópolis.

ORREGO, R. M. M.; 1999, “*Método de Calibração Direta para Máquinas de Medir a Três Coordenadas*”. Teste de Doutorado. USP, São Paulo.

ORREGO, R. M. M.; DI GIACOMO, B.; ABACKERLI, A. J.; 2000, “*Fontes de Erros em Metrologia a Três Coordenadas: Considerações Gerais*”. Revista de Ciência e Tecnologia, vol. 8, Pag. 43-56.

PIEGL, L.; TILLER, W.; 1997, “*The NURBS Book*”. 2nd Edition, Springer-Verlag.

PIZO, G. A. I.; 2009, “*Sistema Computacional para Tratamento de Nuvens de Pontos e Reconstrução Tridimensional de Superfícies Baseado em Modelos Deformáveis*”. Dissertação de mestrado. UnB, Faculdade Tecnológica. Departamento de Engenharia Mecânica.

PIRATELLI-FILHO, A.; ARAÚJO, J. A.; BRASIL JÚNIOR, A. C. P.; 2009, “*Reverse Engineering of Hydraulic Turbine Runners Using Coordinate Measurement Arms and NURBS Modeling*”. Journal Technology, vol. 30, nº 1, pp. 114-122.

PORATH, M. C., SOUSA, A. R.; 2002, “*A Tecnologia de Medição por Coordenadas no Ciclo de Desenvolvimento de Produtos Plásticos*”. IX ENEGEP.

PRUDENTE, F., 2011; “*Automação Industrial PLC – Teoria e Aplicações*”, Curso Básico, 2º Edição; Editora LTC.

PURWAR, A.; apud PIEGL, L.; 1986, “*A Geometric Investigation of the Rational Bezier Scheme of Computer-Aided-Design*”. Journal Computers in Industry, vol. 7, pp. 401-410.

PURWAR, A.; *apud* AU, C. K.; YUEN, M. M. F.; 1995, “*Unified Approach to NURBS Curve Shape Modification*”,

RENISHAW WHITE PAPER; 2009, “*At the Sharp End – A Guide to CMM Stylus Selection*” Metrology Division, New Mills, Wotton-under-Edge, Gloucestershire, UK, Technical Literature,

REID, C.; 1995, “*Performance Characteristics of Touch Trigger Probes*”, Quality Today. Buyers Guide, pp. 152-155.

ROLIM, T. L.; 2003, “*Sistemática Indicadora de Método para Calibração de Máquina de Medição por Coordenadas*”. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.

SATO, D. P. V.; DI GIACOMO, B.; ARENCIDA, R. V.; 2004, “*Procedimentos de Cálculo de Incerteza de Medição a Três Coordenadas do Diâmetro da esfera*”, Anais do III Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Vol. 10, Bélem, Pará, Brasil.

SHEN, Y.; MOON, S.; 1996, “*Erro Compensation of Coordinate Measurements in Computer-Integrated Manufacturing Using Neural Networks*”, Journal of Materials Processing Technology, vol. 61, pp. 12-17.

SHIGLEY, J. E.; 1970, “*Cinemática dos Mecanismos*”, Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo.

SILVA, E. C. M., SILVA, J. B. A.; 2009, “*Medição de Superfícies de Formas Livres: Um Estudo Comparativo com Uso de Medição com Contato e sem Contato para Fins de Uso de Inspeção e Engenharia Reversa*”. V Congresso de Metrologia, Salvador, BA.

SILVA, E. C. M.; SILVA, J. B. A., LIMA JR., J. C., ANDREZZA, I. L. P.; 2011, “*Aplicação de NURBS para Modelagem de Curvas e Superfícies de Formas Livres Utilizando MMCs com Apalpadores do Tipo Touch Trigger*”. II Congresso Internacional de Metrologia Mecânica (CIMMEC), Natal, RN, Brasil.

SILVA, E. C. M.; *apud* PIRATELLI-FIHO, A.; MOTTA, J. M. S. T.; 2011, “*Performance of CAD Model Recovering Method Based on CMA Measurement and Nurbs Modeling Applied to Small Free Form Surfaces*”. *Ciência e Engenharia*, vol. 16, pp. 67-72.

SILVA, E. C. M.; 2011, “*Aplicação de NURBS em MMCs, com Apalpador Touch Trigger, para Escaneamento de Superfícies de Formas Livres e Geometrias Complexas*”. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.

SONY, K.; CHEN, D.; LERCH, T., 2009; “*Parameterization of Prismatic Shapes and Reconstruction of Free-Forms Shapes in Reverse Engineering*”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 41, pp. 948-959.

SOUSA, A. R.; 1998, “*Medição por Coordenadas*”, Apostila de Curso, ETFSC, Florianópolis, SC.

SOUSA, G. R.; DENINI, F. G.; 2004, “*Influência do Ângulo de Pressão no Perfil Evolvental do Dente das Engrenagens Cilíndricas de Dentes Retos*”. III Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Belém, Pará, Brasil.

SPIEGEL, M. R.; 1973, “*Manual de Fórmulas e Tabelas Matemáticas*”, Coleção Schaum, Editora McGraw-Hill do Brasil.

REIS, J. F.; *apud* FÉLIX, L. R.; SILVA, A. B. A.; FÉLIX, N. M. R.; 2012, “*Entre Béziérs e NURBS: Ensino de Formas Livres no Contexto Arquitetônico*”. Universidade Federal de Pelotas, SIGRADI-UNISINOS, 1-3 p.

TALÓN, J. L. H.; MARÍN, R. G.; GARCÍA-HERNÁNDEZ, C.; BERGES-MURO, L.; LÓPEZ-GÓMES, C.; ZURDO J. J. M.; ORTEGA, J. C. C.; 2013, “*Generation of Mechanizing Trajectories with a Minimum Number of Points*”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 69, pp. 361-374.

TESA, “*Manual do Software da MH3D*”, 2004.

TOLVALY-ROSCA, F.; FORGÓ F.; 2015, “*Mixed CAD Method to Develop Gear Surface Using the Relative Cutting Movements and NURBS Surfaces*”. 8th International Conference Interdisciplinarity in Engineering. Procedia Technology. Vol. 19. Pag. 20 – 27.

VALE, F. A. M.; 2006, “*Desenho de Máquinas*”. Apostila da Disciplina de Desenho de Máquinas, Curso Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, UFPB, Brasil.

VARADY, T.; MARTIN, R. R.; COXT, J.; 1977, “*Reverse Engineering of Geometric Model – Na Introduction*”. Computer Aided Design. Elsevier Science Ltd. Vol. 29. Pag. 255 – 268.

VERSPRILLE, K.; 1975, “*Computer-Aided Design Application of the Rational B-Spline Approximation Form*”. PHD Thesis Syracuse University, USA.

VIEIRA, T. M. A.; 2005, “*Reconstrução de Superfícies Paramétricas Triangulares Usando uma Técnica de SPR Adaptada*”. Projeto de Pesquisa PIBIC/CNPQ. Centro de Ciências Exatas e Naturais, Departamento de Matemática, UFAL.

YANG, J.; ANWER, N.; MATHIEU, L.; SHI, Z.; ZHANG, M.; 2015, “*Geometric Product Specification of Gears: The GeoSpelling Perspective*”. 13th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, Procedia, Vol. 27, Pag. 90 – 96.

YOUNES, M. A.; KHALIL, A. M.; DAMIR, M. N.; 2005, “*Automatic Measurement of spur-gear dimensions Using Laser Light – Part 1: Measurement of Tooth Thickness and Pitch*”. Opt. Eng. Vol. 44.

YOUNES, M. A.; KHALIL, A. M.; DAMIR, M. N.; 2005, “*Automatic Measurement of spur-gear dimensions Using Laser Light – Part 2: Measurement of Flank Profile*”. Opt. Eng. Vol. 44.

WECKENMANN, A.; ESTLER, T.; PEGGS, G.; MCMURTRY, D.; 2004, “*Probing systems in dimensional metrology*”. Annals of CIRP. vol. 2, pp 197.

WERNER, A.; SKALSKI, K.; PISZCZATOWSKI, S.; SWIESZKOWSKI, W.; LECHNIAK, Z.; 1998, “*Reverse Engineering of Free-Form Surfaces*”. Journal of Materials Processing Technology, vol. 76, pp. 128-132.

WOZNIAK, A.; MAYER, J. R. R.; ABDELHAK, N.; 2011, “*Novel CMM-Based Implementation of the Multi-Step Method for the Separation of Machine and Probes erros*”. Precision Engineering. Elsevier Science Ltd. Vol. 35. Pag. 318 – 328.

WOZNIAK, A.; GRZEGORZ K.; 2014, “*Simple Master Artefact for CMM Dynamics Error Identification*”. Precision Engineering. Elsevier Science Ltd. Vol. 38. Pag. 64 – 70.

ZHANG, P.; 2008, “*NURBS Toolbox*”. Site MathWorks com acesso em 2013.
<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/authors/82397>

ZHANG, M.; SHI, Z. Y.; MATHIEU, L.; NABIL; ANWER, Y. J.; 2015, “*Geometric Product Specification of Gears: The GeoSpelling Perspective*”. 13th CIRP conference on Computer Aided Tolerancing. Procedia CIRP. Vol. 27. Pag. 90 – 96.

ZHIFENG, L.; LIDING, W.; XIAODONG, W.; YONG M.; 2011, “*Measurement Erros Caused by Radius Deviation of Base Disc in Double-Disc Instrument for Measuring an Involute*”, IOPscience, Measurement Science and Technology, vol 22.

APÊNDICE A

A.1 COEFICIENTE t DE STUDENT

Graus de Liberdade	σ 68,27 %	1,96 σ 95 %	2,00 σ 95,45 %	2,58 σ 99,00 %	3,00 σ 99,73 %
1	1,837	12,706	13,968	63,656	235,811
2	1,321	4,303	4,527	9,925	19,206
3	1,197	3,182	3,307	5,841	9,219
4	1,142	2,776	2,869	4,604	6,620
5	1,11	2,571	2,649	4,032	5,507
6	1,091	2,447	2,517	3,707	4,904
7	1,077	2,365	2,429	3,499	4,530
8	1,067	2,306	2,366	3,355	4,277
9	1,059	2,262	2,320	3,250	4,094
10	1,053	2,228	2,284	3,169	3,957
11	1,048	2,201	2,255	3,106	3,850
12	1,043	2,179	2,231	3,055	3,764
13	1,040	2,160	2,212	3,012	3,694
14	1,037	2,145	2,195	2,977	3,636
15	1,034	2,131	2,181	2,947	3,586
16	1,032	2,120	2,169	2,921	3,544
17	1,030	2,110	2,158	2,898	3,507
18	1,029	2,101	2,149	2,878	3,475
19	1,027	2,093	2,140	2,861	3,447
20	1,026	2,086	2,133	2,845	3,422
25	1,020	2,060	2,105	2,787	3,330
30	1,017	2,042	2,087	2,750	3,270
35	1,014	2,030	2,074	2,724	3,229