



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica

- Mestrado - Doutorado -

**SISTEMÁTICA PARA GARANTIA DA QUALIDADE NA
MEDIÇÃO DE PEÇAS COM GEOMETRIA COMPLEXA E
SUPERFÍCIE COM FORMA LIVRE UTILIZANDO
MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS**

Por

Luiz Soares Júnior

***Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para
obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica***

João Pessoa - Paraíba

Dezembro - 2010

LUIZ SOARES JÚNIOR

**SISTEMÁTICA PARA GARANTIA DA QUALIDADE NA
MEDIÇÃO DE PEÇAS COM GEOMETRIA COMPLEXA E
SUPERFÍCIE COM FORMA LIVRE UTILIZANDO
MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS**

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

Orientador: Prof. Dr. João Bosco de Aquino Silva

S676s Soares Júnior, Luiz.
Sistemática para Garantia da Qualidade na Medição de Peças com Geometria Complexa e Superfície com Forma Livre Utilizando Máquina de Medir por Coordenadas / Luiz Soares Júnior.- João Pessoa: [s.n.], 2010.
186f.
Orientador: João Bosco de Aquino Silva
Tese (Doutorado) – UFPB/CT

1. Engenharia Mecânica. 2. Geometria Complexa. 3. Medição por Coordenadas.

UFPB/BC

CDU : 621(043)

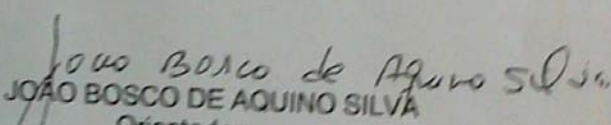
**SISTEMÁTICA PARA GARANTIA DA QUALIDADE NA
MEDIÇÃO DE PEÇAS DE GEOMETRIA COMPLEXA E
SUPERFÍCIE COM FORMA LIVRE UTILIZANDO
MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS**

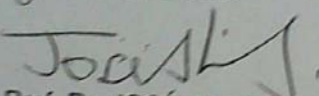
por

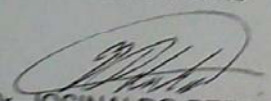
LUIZ SOARES JÚNIOR

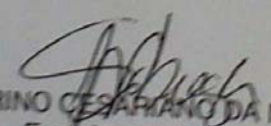
Tese aprovada em 13 de dezembro de 2010

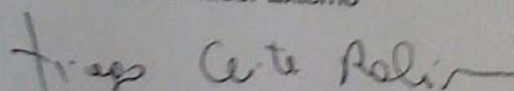
Período letivo 2010.2


Prof. JOÃO BOSCO DE AQUINO SILVA
Orientador


Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO RIUL
Examinador Interno


Prof. Dr. JOSINALDO PEREIRA LEITE
Examinador Interno


Prof. Dr. SEVERINO CESARIANO DA NÓBREGA NETO
Examinador Externo


Prof. Dr. TIAGO LEITE ROLIM
Examinador Externo

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, que com sua imensa bondade nos abençoa diariamente e nos dar força para vencermos os desafios da vida.

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Camila, pelo seu amor e apoio em todas as horas.

Aos meus pais, Luiz Soares Cunha e Maria Gomes S. Feitosa, pelo amor e incentivo irrestritos em toda a minha vida.

Em especial ao professor João Bosco de Aquino Silva, pela orientação, incentivo e pelo sincero empenho para a realização deste trabalho.

À FUNCAP – Fundação Cearense de Pesquisa e Cultura, pela concessão da bolsa de doutorado por dois anos.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção da Universidade Federal do Ceará, pela concessão de afastamento por dois anos e a oportunidade de crescimento profissional.

Aos colegas Robson e Elaine do LAMETRO/UFC e ao Prof. André Roberto de Sousa pelas discussões sobre o tema.

Às empresas participantes do estudo de casos, pelas valiosas contribuições e oportunidades a mim concedidas.

Aos meus irmãos, Uilna, Neyara, Uilton e João Batista, pelas palavras de apoio e incentivo.

SISTEMÁTICA PARA GARANTIA DA QUALIDADE NA MEDIÇÃO DE PEÇAS COM GEOMETRIA COMPLEXA E SUPERFÍCIE COM FORMA LIVRE UTILIZANDO MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS

RESUMO

Peças com geometria complexa e superfície com forma livre são de grande interesse em muitas aplicações industriais, seja por questão funcional ou estética. Sua disseminação deve-se, em parte, aos avanços nos sistemas CAD/CAM e na tecnologia de medição por coordenadas. Apesar dos avanços tecnológicos, o projeto do produto continua sendo um dos maiores problemas da indústria. Os problemas vão desde a concepção do projeto até àqueles inerentes ao processo de fabricação e controle, que muitas vezes são descobertos somente na aplicação do produto. As variações dimensionais, de forma e de textura da superfície são especificadas no desenho técnico através de tolerância dimensional e geométrica. Para peça com geometria complexa as variações admissíveis são especificadas através de tolerâncias de perfil de linha e de superfície. O seu controle tipicamente consiste na comparação dos pontos coordenados medidos sobre a superfície com o modelo CAD disponível. Este trabalho contém uma proposta de sistematização de procedimentos para garantia da qualidade da medição de peças com geometria complexa e superfície com forma livre através de máquina de medir por coordenadas cartesianas. A proposta foi baseada no amplo estudo sobre o tema, nas constatações de problemas evidenciados nas visitas realizadas em seis empresas que utilizam a tecnologia de medição por coordenadas e nos resultados de estudos de casos realizados numa empresa do setor automotivo. A sistemática foca nas principais fontes de erros da medição por coordenadas e demonstrou ser de fácil aplicação na empresa selecionada.

Palavras-chave: Garantia da qualidade, Geometria complexa, Medição por coordenadas.

SYSTEMATIC FOR QUALITY ASSURANCE IN MEASUREMENT PROCESS OF PARTS WITH COMPLEX GEOMETRY AND FREE- FORM SURFACE BY USING COORDINATE MEASURING MACHINES

ABSTRACT

Parts with complex geometry and with free-form surface are of great interest in many industrial applications, either for functional or aesthetic issue. Its spread is due to advances in CAD / CAM systems and coordinate measuring technology. Despite technological advances, product design remains a major problem in industry. The problems range from design conception to those inherent in the manufacturing process and control, which are often discovered only in the product application phase. The dimensional variations of shape and surface texture are specified in the technical drawing using geometric and dimensional tolerance. To part with complex geometry variations are allowable tolerances specified by line and surface profile. Their control typically consists of a comparison of the coordinate points measured on the surface to the CAD model available. This paper contains a proposal to systematize procedures for quality assurance of measurement of parts with complex geometry and free-form surface by using coordinate measuring machines. The proposal was based on extensive study on the subject, the findings of problems revealed in visits to six companies that use technology to coordinate measurement and the results of case studies from a company in the automotive sector. The system focuses on the major sources of errors of coordinate measuring and proved easy to be applied in the selected company.

Keywords: Quality assurance, Complex geometry, Coordinate measuring machines.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	001
1.1 AVANÇOS NO PROJETO, FABRICAÇÃO E METROLOGIA.....	001
1.2 GEOMETRIA COMPLEXA NA INDÚSTRIA.....	003
1.3 DISSEMINAÇÃO DE TOLERÂNCIAS DE PERFIL NA ESPECIFICAÇÃO GEOMÉTRIA DE PRODUTOS.....	006
1.4 DESAFIOS NO CONTROLE DE TOLERÂNCIAS EM PEÇAS COM GEOMETRIA COMPLEXA.....	007
1.5 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	011
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	011
MEDIÇÃO DE PEÇAS COM GEOMETRIA COMPLEXA.....	013
2.1 INTRODUÇÃO.....	013
2.2 MEDIÇÃO POR CONTATO.....	014
2.2.1 Medição com gabaritos.....	014
2.2.2 Graminho ou traçador de altura.....	015
2.2.3 Máquinas de medir por coordenadas (MMC).....	016
2.2.4 Braços articulados de medição.....	018
2.2.5 Sistema de rastreamento interferométrico tridimensional.....	019
2.3 MEDIÇÃO SEM CONTATO.....	021
2.3.1 Sistema fotogramétrico.....	021
2.3.2 Sistema topogramétrico.....	022
2.4 MEDIÇÃO DE ENGRENAGENS.....	023
2.4.1 NORMAS PARA ESPECIFICAR ENGRENAGENS.....	026
2.4.2 ESPECIFICAÇÃO DE ENGRENAGENS CILÍNDRICAS DE DENTES RETOS SEGUNDO A NORMA ISO 1328 1/2.....	030
2.4.3 CONTROLE GEOMÉTRICO DE ENGRENAGENS.....	035

2.4.4	AVANÇOS NA METROLOGIA DE ENGRENAGENS.....	037
2.5	MEDIÇÃO DE PÁS DE HÉLICE.....	041
2.5.1	CONTROLE GEOMÉTRICO.....	043
	ESPECIFICAÇÃO GEOMÉTRICA DE PRODUTOS.....	047
3.1	INTRODUÇÃO.....	047
3.2	PRINCÍPIOS DE TOLERÂNCIA.....	050
3.3	ESTUDO DA TOLERÂNCIA.....	055
3.4	NORMALIZAÇÃO PARA TOLERÂNCIA.....	059
3.4.1	A Linguagem GD&T versus GPS.....	061
3.4.2	Nova geração de normas ISO/GPS.....	066
3.5	TOLERÂNCIA DE PERFIL	068
3.5.1	Tolerância de perfil de linha.....	068
3.5.2	Tolerância de perfil de superfície	070
3.5.3	Controle geométrico das tolerâncias de perfil	071
	REQUISITOS DE GARANTIA DA QUALIDADE NA MEDIÇÃO COM MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS.....	075
4.1	MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS –MMC.....	075
4.2	FONTES DE ERROS NA MEDIÇÃO POR COORDENADAS.....	077
4.2.1	Erros relativos à estrutura da MMC.....	079
4.2.2	Erros relativos ao sistema de apalpação.....	082
4.2.3	Erros relativos à peça e operador.....	088
4.2.4	Erros relativos à estratégia de medição e de avaliação.....	091
4.3	RASTREABILIDADE METROLÓGICA NA MEDIÇÃO POR COORDENADAS.....	104
4.3.1	Rastreabilidade na medição de engrenagens	107
4.4	AValiação da conformidade com a especificação.....	108
	SISTEMÁTICA PARA GARANTIA DA QUALIDADE NA MEDIÇÃO DE PEÇAS COM GEOMETRIAS COMPLEXAS E SUPERFÍCIES COM FORMAS LIVRES EM MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS.....	111
5.1	INTRODUÇÃO.....	111
5.2	CONSTATAÇÕES SOBRE OS ASSUNTOS ESTUDADOS.....	113
5.3	SISTEMÁTICA PROPOSTA.....	115

5.3.1	Formação da base do conhecimento.....	116
5.3.2	Planejamento da medição.....	121
5.3.3	Estratégia de medição.....	124
5.3.4	Medição e confirmação metrológica.....	127
	APLICAÇÃO DA SISTEMÁTICA PROPOSTA.....	128
6.1	INTRODUÇÃO.....	128
6.2	EXPERIMENTO 1.....	129
6.3	EXPERIMENTO 2.....	141
	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	156
7.1	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS E CONTRIBUIÇÕES DA SISTEMÁTICA PROPOSTA.....	157
7.2	CONSIDERAÇÕES SOBRE A APLICAÇÃO DA SISTEMÁTICA PROPOSTA.....	158
7.3	RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	160
	REFERÊNCIAS.....	161
	APÊNDICE A - MODELO DO QUESTIONÁRIO DA PESQUISA.....	171
	APÊNDICE B - FORMULÁRIO PARA ELABORAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE MEDIÇÃO DA ENGRENAGEM.....	175
	APÊNDICE C - FORMULÁRIO PARA ELABORAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE MEDIÇÃO DO TAMBOR DE FREIO.....	181

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 -	Comparação dos dados medidos com o modelo nominal de uma porta de um veículo.....	002
Figura 1.2 -	Medição de perfil aerodinâmico.....	004
Figura 1.3 -	Medição de perfil de automóvel.....	004
Figura 1.4 -	Medição de perfil hidrodinâmico.....	004
Figura 1.5 -	Medição de perfil de uma turbina Pelton.....	005
Figura 1.6 -	Medição de perfil geométrico de telefone celular.....	005
Figura 1.7 -	Componentes mecânicos (a) e prótese humana (b).....	005
Figura 1.8 -	Densidades dos custos dos desvios da qualidade gerados e corrigidos.....	008
Figura 2.1 -	Sistemas de coordenadas do projeto e da peça real.....	014
Figura 2.2 -	Inspeção direta de uma pá de turbina	015
Figura 2.3 -	Diversos tipos de traçador de alturas.....	016
Figura 2.4 -	Tipos de máquinas de medir por coordenadas.....	016
Figura 2.5 -	Configurações de braços articulados de medição.....	018
Figura 2.6 -	Medição de uma pá de turbina com braço de medição.....	019
Figura 2.7 -	Rastreador interferométrico 3D da Leica Geosystems	020
Figura 2.8 -	Aplicações do rastreador interferométrico tridimensional.....	0201
Figura 2.9 -	Triangulação formada por um único ponto à esquerda e múltiplos pontos em comum à direita.....	021
Figura 2.10 -	Inspeção de uma turbina Kaplan por Topogrametria.....	022
Figura 2.11 -	Engrenagens cilíndricas: dentes retos (a) e dentes helicoidais (b).....	024
Figura 2.12 -	Engrenagem cônica com dentes retos (a) e com dentes helicoidais (b).....	024
Figura 2.13 -	Engrenagem hipoidal.....	025
Figura 2.14 -	Sintomas e conseqüências da falta de qualidade no engrenamento.....	025

Figura 2.15 -	Passo teórico e seus desvios	031
Figura 2.16 -	Desvio de perfil	031
Figura 2.17 -	Tipos de desvio de perfil segundo a ISO 1328-1.....	032
Figura 2.18 -	Desvio da linha de flanco.....	033
Figura 2.19 -	Desvio circular radial.....	033
Figura 2.20 -	Métodos de controle de engrenagens	036
Figura 2.21 -	Engrenômetro utilizado para o controle de engrenagens através do método funcional	037
Figura 2.22 -	Sistema de medição dedicado (a) e sistema de medição híbrido (b)	038
Figura 2.23 -	Máquina de medir por coordenadas com mesa rotativa integrada.....	039
Figura 2.24 -	Rotores de turbinas com geometria complexa	041
Figura 2.25 -	Componentes de um perfil aerodinâmico de uma pá	042
Figura 2.26 -	Pá Kaplan em CAD e com os alvos de referência para medição.....	044
Figura 2.27 -	Pá Kaplan com linhas de referências para medição.....	045
Figura 2.28 -	Análise de erro do modelo CAD da Pá Kaplan K2.....	046
Figura 3.1 -	Peça projetada (a) e peça real (b).....	048
Figura 3.2 -	Exemplo de desenho industrial com especificação GD&T.....	049
Figura 3.3 -	Tolerância linear versus tolerância geométrica.....	051
Figura 3.4 -	Desenho de uma placa simples com dois furos.....	052
Figura 3.5 -	Resultados diferentes devido a seqüência diferente de posicionamento para inspeção.....	054
Figura 3.6 -	Interpretação dos Princípios de independência e de Taylor.....	062
Figura 3.7 -	Representação (desenho) da tolerância de perfil com datum (a) e representação da zona de tolerância (b).....	065
Figura 3.8 -	Zona de tolerância de perfil de linha sem referência (datum).....	069
Figura 3.9 -	Zona de tolerância de perfil de linha sem referência.....	069
Figura 3.10 -	Zona de tolerância de perfil de superfície sem referência.....	070
Figura 3.11 -	Zona de tolerância de perfil de superfície com referência.....	071
Figura 3.12 -	Controle de tolerância de perfil de superfície com comparadores.....	071
Figura 3.13 -	Controle de tolerância de perfil de linha com projetor de perfil	072
Figura 3.14 -	Controle de tolerância de perfil de superfície com calibre funcional.....	072
Figura 3.15 -	Controle de tolerância de perfil com calibre funcional.....	073

Figura 3.16 -	Avaliação de perfil de superfície através da comparação com modelo CAD.....	074
Figura 3.17 -	Avaliação de perfil de superfície através da comparação com modelo CAD de uma peça fundida.....	074
Figura 4.1 -	Subsistemas de uma máquina de medir por coordenadas.....	075
Figura 4.2 -	Fontes de erros de medição em MMC.....	079
Figura 4.3 -	Modelo de erros geométricos de uma guia rígida.....	080
Figura 4.4 -	Vinte e um erros geométricos de uma MMC.....	081
Figura 4.5 -	Erro na compensação do raio do apalpador.....	083
Figura 4.6 -	Variação de rigidez de um apalpador com a direção de medição.....	084
Figura 4.7 -	Efeito da filtragem mecânica pelo sensor	086
Figura 4.8 -	Apalpador medidor da Zeiss (a) e modos de medição por pontos (b) e por contato contínuo (c).....	087
Figura 4.9 -	Fixação funcional de um pára-choque de um carro (Tecnomatrix).....	089
Figura 4.10 -	A natureza da medição com uma MMC.....	092
Figura 4.11 -	Diversas características geométricas à luz da ISO17450.....	097
Figura 4.12 -	Alinhamento matemático da peça na MMC.....	099
Figura 4.13 -	Recomendações para medição de superfície de referência.....	101
Figura 4.14 -	Ajuste por mínimos quadrados (a) e por zona mínima (b).....	102
Figura 4.15 -	Erro na avaliação de perpendicularidade por conta da escolha do tipo de algoritmo de ajuste.....	103
Figura 4.16 -	Experimento montado: MFG (esquerda) e a pá de turbina (direita).....	106
Figura 4.17 -	Padrões corporificados: (a) perfil envolvente, (b) passo e (c) ângulo de hélice.	107
Figura 4.18 -	Influência da incerteza de medição na zona de conformidade especificada.....	109
Figura 5.1 -	Módulos que caracterizam a sistemática proposta.....	116
Figura 5.2 -	Informações gerais que compõem os módulos “Formação da base do conhecimento” e “Planejamento da medição”.....	123
Figura 5.3 -	Aspectos a serem considerados para estratégia de medição e sequência da medição por coordenadas.....	124
Figura 6.1 -	Vista superior e detalhe do fresado do cubo de roda.....	129

Figura 6.2 -	Medição da engrenagem selecionada para o experimento 1.....	130
Figura 6.3 -	Gráfico dos desvios de perfil da engrenagem.....	133
Figura 6.4 -	Gráfico dos desvios de flanco da engrenagem	134
Figura 6.5 -	Gráfico dos desvios individuais de passo esquerdo.....	135
Figura 6.6 -	Gráfico dos desvios individuais de passo direito.....	136
Figura 6.7 -	Representação do desvio de passo individual.....	136
Figura 6.8 -	Gráfico dos desvios acumulados de passo esquerdo.....	137
Figura 6.9 -	Gráfico dos desvios acumulados de passo direito.....	137
Figura 6.10 -	Planilha de entrada de dados gerais.....	138
Figura 6.11 -	Planilha de calculo da incerteza do processo de medição.....	139
Figura 6.12 -	Planilha de calculo da relação entre a incerteza do processo de medição e a tolerância especificada.....	139
Figura 6.13 -	Desenho 3D da peça selecionada para o experimento 2.....	141
Figura 6.14 -	Peça utilizada no experimento de medição na empresa.....	142
Figura 6.15 -	Gráfico das médias superpostas.....	149
Figura 6.16 -	Gráfico das amplitudes superpostas.....	149
Figura 6.17 -	Gráfico das médias superpostas recalculado.....	150
Figura 6.18 -	Gráfico das amplitudes superpostas recalculado.....	151
Figura 6.19 -	Fórmulas para os cálculos numéricos do estudo de R&R.....	151
Figura 6.20 -	Gráfico das médias superpostas.....	154
Figura 6.21 -	Gráfico das amplitudes superpostas.....	155

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 -	Lista de normas para engrenagens cônicas e hipoidais.....	027
Tabela 2.2 -	Lista de normas para engrenagens cilíndricas de dentes retos e helicoidais.....	027
Tabela 2.3 -	Grau de equivalência entre normas de engrenagens ISO e AGMA.....	029
Tabela 2.4 -	Principais parâmetros controlados em uma engrenagem cilíndrica.....	035
Tabela 3.1 -	Breve história da tolerância versus metrologia.....	059
Tabela 3.2 -	Desenvolvimento histórico dos sistemas GD&T e GPS.....	060
Tabela 3.3 -	Diferenças fundamentais entre GD&T e GPS.....	063
Tabela 3.4 -	Símbolos de características geométricas.....	064
Tabela 3.5 -	Exemplo do relacionamento de normas na matriz GPS.....	066
Tabela 3.6 -	Modelo geral da matriz de normas GPS.....	067
Tabela 4.1 -	Grau de influência de cada fonte de erro nas características geométricas..	078
Tabela 4.2 -	Número de pontos recomendados para a avaliação das geometrias básicas na medição por coordenadas.....	098
Tabela 5.1 -	Empresas visitadas por setor de atuação.....	112
Tabela 5.2 -	Aspectos a serem considerados na elaboração do planejamento da medição.....	122
Tabela 5.3 -	Orientações para as tarefas usuais na medição por coordenadas.....	125
Tabela 6.1 -	Dados da engrenagem padrão cilíndrica externa.....	130
Tabela 6.2 -	Parâmetros e valores admissíveis da engrenagem.....	131
Tabela 6.3 -	Condições de medição da engrenagem cilíndrica de dentes retos.....	131
Tabela 6.4 -	Resultados da medição do desvio de perfil.....	132

Tabela 6.5 -	Resultados da medição do desvio de flanco.....	133
Tabela 6.6 -	Resultados da medição do desvio de passo.....	134
Tabela 6.7 -	Especificações técnicas dos parâmetros avaliados.....	142
Tabela 6.8 -	Principais constatações e sugestões de melhorias.....	143
Tabela 6.9 -	Resultados das medições do segundo experimento.....	146
Tabela 6.10 -	Resultados numéricos da primeira fase do estudo de R&R.....	152
Tabela 6.11 -	Número de pontos a medir.....	153
Tabela 6.12 -	Resultados numéricos da segunda fase do estudo de R&R.....	155

LISTA DE ABREVIATURAS

ASME	American Society of Mechanical Engineers
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGMA	American Gear Manufacturers Association
BAM	Braço Articulado de Medição
CAD	Computer-Aided Design
CAE	Computer-Aided Engineering
CAM	Computer-Aided Manufacturing
CAT	Computer-Aided Tolerance
CAPP	Computer-Aided Process Planning
CAI	Computer-Aided Inspection
CNC	Computer-Numeric Control
CB	Comitê Brasileiro
CAQ	Computer-Aided Quality
CIM	Computer Integrated Manufacturing
DRF	Datum Reference Frame

DMIS	Dimensional Measuring Interface Standard
FEM	Finite Element Method
FOS	Feature of size
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
GPS	Geometric Product Specification
GD&T	Geometric Dimensioning and Tolerancing
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organization for Standardization
IFRM	Intelligent Feature Recognition Methodology
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
JIS	Japanese Industrial Standard
MMC	Máquina de Medição por Coordenada
MFG	Modular FreeForm Gauge
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
NBR	Norma Brasileira
NIST	National Institute of Standards and Technology
NPL	National Physical Laboratory
NURBS	Non Uniform Rational Basis Spline
PTB	Physikalisch Technische Bundesanstalt

PSD	Position Sensing Device
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
TR	Technical Report
TS	Technical Specification
TPD	Technical Product Documentation
TPS	Technical Product Specification
T	Tolerância
U	Incerteza (95%)

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 AVANÇOS NO PROJETO, FABRICAÇÃO E METROLOGIA

As grandes transformações que a manufatura mundial tem experimentado nos últimos anos têm obrigado as indústrias a aprimorarem seus processos, desde o projeto, fabricação, inspeção e montagem. Estas mudanças têm sido motivadas pela agregação de novas tecnologias ao processo de desenvolvimento de produtos em menor tempo, custo reduzido e uso de geometria complexa e superfície com forma livre.

Atualmente, programas computacionais avançados para CAD (Projeto Auxiliado por Computador) podem incorporar funções que verificam interferências entre partes de uma peça, analisam concentração de tensão, modelam sólidos 3D e superfícies, auxiliam no projeto colaborativo através da internet, entre outras características.

Nas atividades de controle dimensional e geométrico, os métodos convencionais com uso de paquímetros, medidores internos e traçadores de altura já não satisfazem as exigências atuais de rapidez e flexibilidade. Têm-se destaque para as tecnologias de medição por coordenadas onde é possível integrar equipamento de medição e programa computacional ao ciclo de desenvolvimento do produto, com programação fora de linha (off-line) das etapas de inspeção, verificação virtual das tolerâncias de projeto, medição em três coordenadas do protótipo físico desenvolvido, entre outras aplicações. Programas computacionais comerciais como o Polyworks®, RapidForm®, Geomagic®, Metris® e o Capture3D® possuem a função de inspeção e comparação dos dados medidos com o modelo de projeto (LI e GU, 2004).

Na figura 1.1 consta um exemplo de aplicação de um programa computacional comercial com a função de inspeção e comparação dos dados medidos com o modelo nominal de uma porta de um veículo.

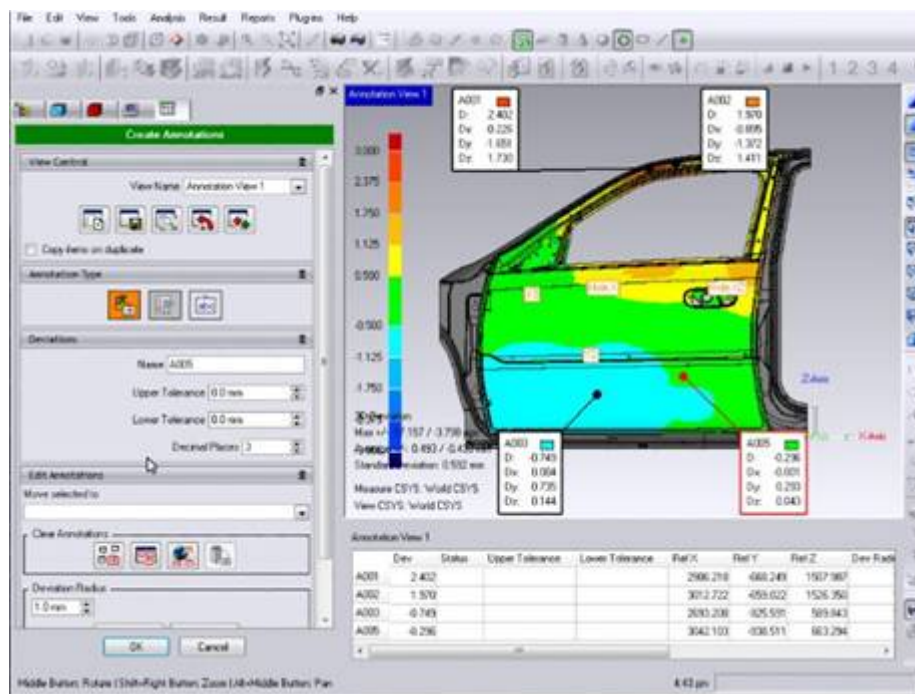


Figura 1.1- Comparação dos dados medidos com o modelo nominal de uma porta de um veículo (Geomagic®).

No campo do planejamento da fabricação e montagem, os programas computacionais denominados genericamente de CAPP (Planejamento da Produção Auxiliada por Computador) e CAM (Fabricação Auxiliada por Computador) incorporam funções para programação da fabricação em máquinas CNC (Comando Numérico Computadorizado), planejamento da montagem e otimização da produção entre outras. Cabe ressaltar, que os avanços tecnológicos no campo da fabricação, em especial os sistemas flexíveis de manufatura, contribuíram sobremaneira para o emprego de peças complexas em produtos de diferentes áreas, destacando-se os setores automotivo, aeronáutico e eletro-eletrônico (GIGO, 1999).

Para o projeto, fabricação e controle geométrico dessas peças usualmente são utilizados sistemas CAD/CAM e máquinas de medir por coordenadas. Dois caminhos são normalmente seguidos. No primeiro, parte-se de um desenho do modelo nominal da peça através de um programa de auxílio por computador (CAD) que é interpretado por um programa computacional de auxílio para fabricação (CAM) em uma máquina ferramenta.

As características dimensionais e geométricas da peça fabricada são verificadas através de uma máquina de medir coordenadas (MMC). No segundo caminho, essas características são desconhecidas no todo ou em parte e, portanto, devem ser identificadas através de medição por coordenadas para posterior modelamento geométrico dos pontos adquiridos através de sistemas CAD/CAM. Inclui-se neste caso a engenharia reversa.

1.2 GEOMETRIA COMPLEXA NA INDÚSTRIA

A produção industrial faz intenso uso de formas simples para fabricação de peças que possuem a combinação de formas planas, cilíndricas, esféricas entre outras. De um modo geral, essas peças são mais fáceis e mais baratas de fabricar que peças com geometria complexas e superfícies com forma livre. Entretanto, em muitas situações a forma geométrica simples pode não ser adequada, como, por exemplo, quando a funcionalidade da peça depende de uma interação com um fluido ou uma onda, como é o caso de aplicações em aerodinâmica e óptica. Em outras situações, a estética e aparência podem ser mais importantes para o consumidor que requisitos funcionais (SAVIO et al., 2007).

A principal característica de uma peça complexa é sua diversidade de geometrias e múltiplas tolerâncias, com a capacidade de agregar funções de diversos componentes numa só estrutura, tornando-as de alto valor. São exemplos de peças complexas: blocos de motores de combustão interna, caixas de câmbio, carcaças de mouse e de telefones, próteses, discos de freio, pás de turbinas, etc.

Uma superfície livre ou curvada é um tipo de superfície não limitada por formas analíticas clássicas, mas por um conjunto de pontos de controle. A sua geometria não pode ser representada por equações matemáticas definidas, sendo normalmente de difícil descrição analítica (NEROSKY, 2001 e LI e GU, 2004).

Segundo a norma ISO 17450-2 (2002), que trata de especificação geométrica de produtos, uma característica geométrica complexa não tem grau de invariância, ou seja, deslocando-se uma característica ideal ela não se mantém idêntica. Uma geometria cilíndrica, por exemplo, tem dois graus de invariância: rotação e translação em torno do seu eixo.

Diversas são as aplicações na indústria de peças com geometrias complexas. A título de exemplos podem-se citar aplicações na indústria aeroespacial (turbinas, perfis aerodinâmicos, etc.), automotiva (perfil de automóvel, engrenagens, painéis, etc.), energia

(dutos fluido-dinâmicos, pás de turbina, etc.), naval (perfis hidrodinâmicos), eletro-eletrônica (tubos de TV, carcaça de celular, câmeras fotográficas, etc.), componentes mecânicos (engrenagens, cames, parafusos sem fim, blocos de motores, etc.) e engenharia biomédica (próteses, juntas, válvulas, etc.).

Nas figuras de 1.2 a 1.7 são apresentados alguns exemplos de aplicação de superfícies com forma livre.

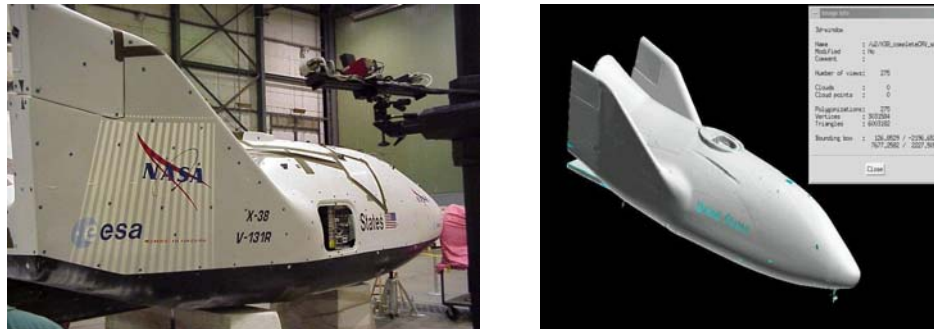


Figura 1.2 – Medição de perfil aerodinâmico.

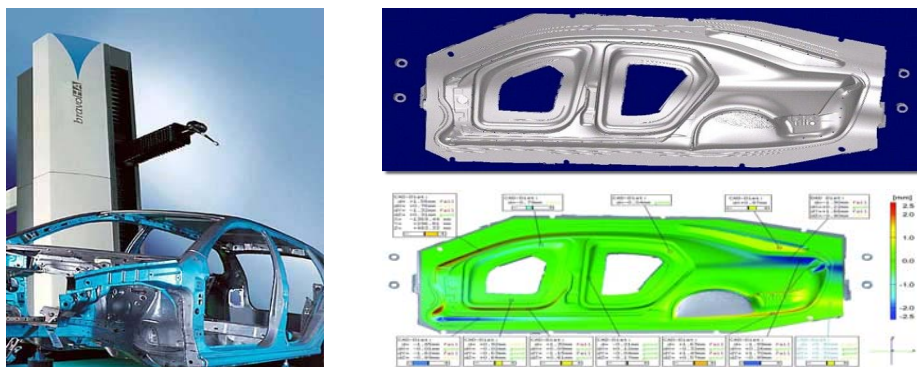


Figura 1.3 – Medição de perfil de automóvel

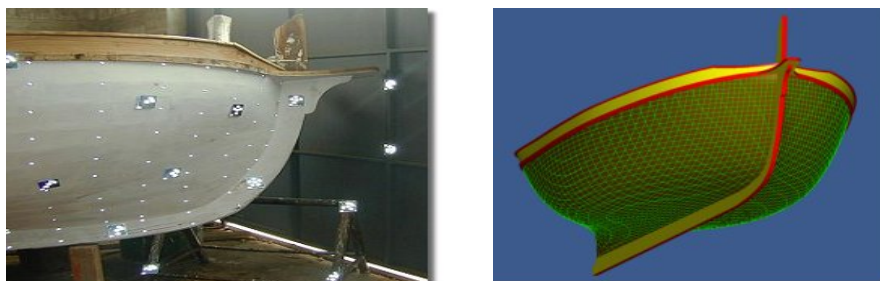


Figura 1.4 – Medição de perfil hidrodinâmico (GOM, 2007)

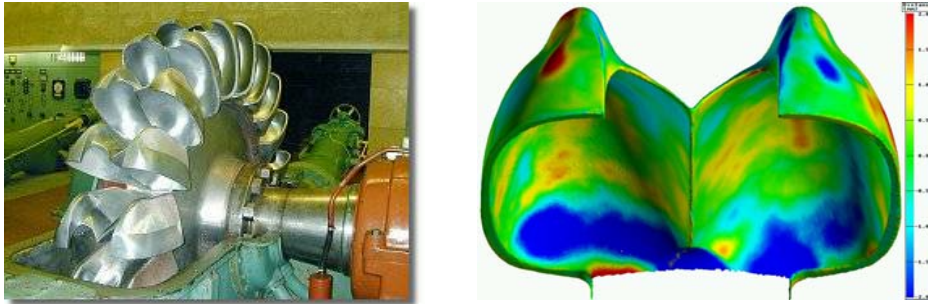


Figura 1.5 – Medição de perfil de uma turbina Pelton (GOM, 2007)

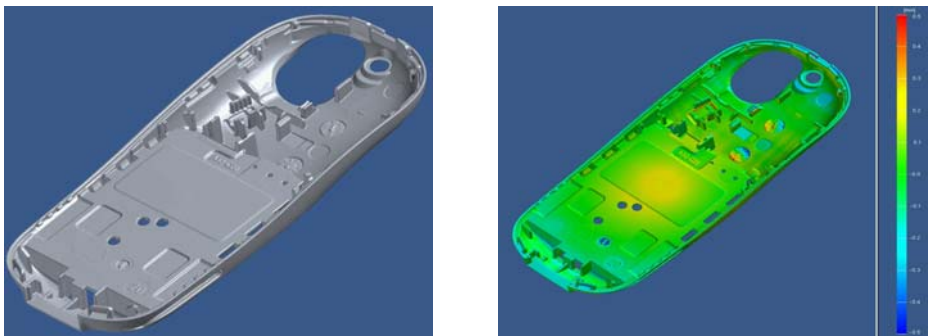


Figura 1.6 – Medição de perfil geométrico de telefone celular



(a)



(b)

Figura 1.7 – Componentes mecânicos (a) e prótese humana (b)

1.3 DISSEMINAÇÃO DE TOLERÂNCIAS DE PERFIL NA ESPECIFICAÇÃO GEOMÉTRICA DE PRODUTOS

Nos exemplos de produtos apresentados no item 1.2, compostos de geometrias regulares e superfícies de formas livres ou curvadas, pode-se concluir sobre a extensa aplicação dessas geometrias nos mais variados segmentos de produção.

A especificação geométrica de produtos com superfícies com formas livres e curvas está fundamentalmente relacionada com as tolerâncias de perfil de linha e superfície, com ou sem relação a referências definidas. De acordo com a norma ISO 1101 (2004), que trata de tolerâncias geométricas, as tolerâncias de perfil podem ser usadas para controle em três situações distintas: somente para forma, para orientação (incluindo forma) e para localização (incluindo forma e orientação). Rigorosamente, todas as tolerâncias aplicadas em planos e linhas são casos particulares da tolerância de perfil de superfície (SOUSA, 2010).

Segundo PASIN (2003), a tolerância de perfil de superfície é a segunda mais utilizada depois da tolerância de posição na Embraer (Empresa Brasileira de Aeronáutica S.A). Apesar da sua versatilidade de aplicação na especificação geométrica de produtos, a prática industrial criou certos mitos sobre a utilização de tolerância de perfil. O primeiro mito foi que tolerância de perfil de linha deve ser aplicada nas bordas de estamparia e vedação. Neste caso deve-se aplicar tolerância de perfil de superfície, pois a borda é uma superfície fina. Tolerância de perfil de linha deve ser aplicada em elementos de linha.

Outros dois mitos são que a tolerância de perfil é mais restritiva que tolerância dimensional e que deve ser usada somente em peças com geometria complexa. Esses mitos nasceram da aplicação intensa de tolerância de perfil em cames e pás de turbinas. Esses componentes mecânicos têm aplicação crítica e tolerâncias bastante pequenas. Portanto, a aplicação disseminada dessa tolerância nesses tipos de peças contribuiu para o entendimento equivocado de que tolerância de perfil de superfície deveria ser utilizada apenas nesses casos (KRULIKOWSKI, 1999).

A disseminação da aplicação de tolerâncias de perfil tem uma importante contribuição dos programas computacionais para CAD (Projeto Auxiliado por Computador), CAM (Fabricação Auxiliada por Computador) e as tecnologias de medição por coordenadas. Considerando o aspecto do controle da tolerância de perfil, na medição por contato em máquina de medir por coordenadas, por exemplo, a informação sobre a

geometria da peça é obtida apalpando a superfície em pontos de medição discretos onde esses pontos são expressos em um sistema de coordenadas de referência pré-determinado. Esses pontos medidos são posicionados com relação ao modelo CAD tridimensional da peça e determinados os desvios da superfície real com relação à superfície do modelo. Esse é o modo de controle de tolerância de perfil de superfície mais freqüente quando se trata de superfícies de forma livre.

1.4 DESAFIOS NO CONTROLE DE TOLERÂNCIAS EM PEÇAS COM GEOMETRIA COMPLEXA

Apesar dos avanços tecnológicos, o projeto do produto continua sendo um dos maiores problemas da indústria (MAZIERO, 1997). Segundo DONATELLI et al.(2005), esses problemas vão desde a concepção do projeto até o estágio de inspeção final ou uso do produto. É fato, na prática industrial, que nos primeiros estágios do projeto mecânico, o projetista imagina o produto ideal, ou seja, tendo dimensões e formas perfeitas. Porém, os processos de fabricação e de montagem são inerentemente inexatos (DANTAN et al., 2007), produzindo peças que variam de dimensão, forma e textura da superfície que podem prejudicar a funcionalidade da peça ou do componente projetado.

As variações são controladas através da especificação de tolerâncias que impactam nos custos finais de produção. Tolerâncias muito estreitas podem resultar num aumento de custos de produção, enquanto tolerâncias largas podem aumentar o desperdício e problemas de montagem (MAZIERO, 1997). Desse modo, a definição e compreensão adequada das especificações de tolerância é crítica em um projeto. As variações inerentes ao processo de fabricação e suas formas de controle devem ser consideradas (FLACK e BEVAN, 2005).

Segundo o relatório ISO/TC 213 (2008) do Comitê Técnico 213 da ISO (International Organization for Standardization) que padroniza a verificação e especificação dimensional e geométrica de produtos, quase 80% dos custos de um produto derivam de decisões tomadas durante as fases de concepção e de produção inicial. Como mostrado na figura 1.8, grande parte dos desvios com referência à qualidade desejada pelo cliente é originária das etapas de planejamento do produto, projeto e métodos de produção, onde constam as especificações de funcionalidade e tolerâncias do novo produto. Esses desvios da qualidade são gerados ao longo de todo o ciclo de vida do produto e os custos dos desvios da qualidade corrigidos podem ser consideráveis à medida que são identificados nas fases de fabricação e/ou inspeção final (DONATELLI et al., 2005, ARENHART, 2007).

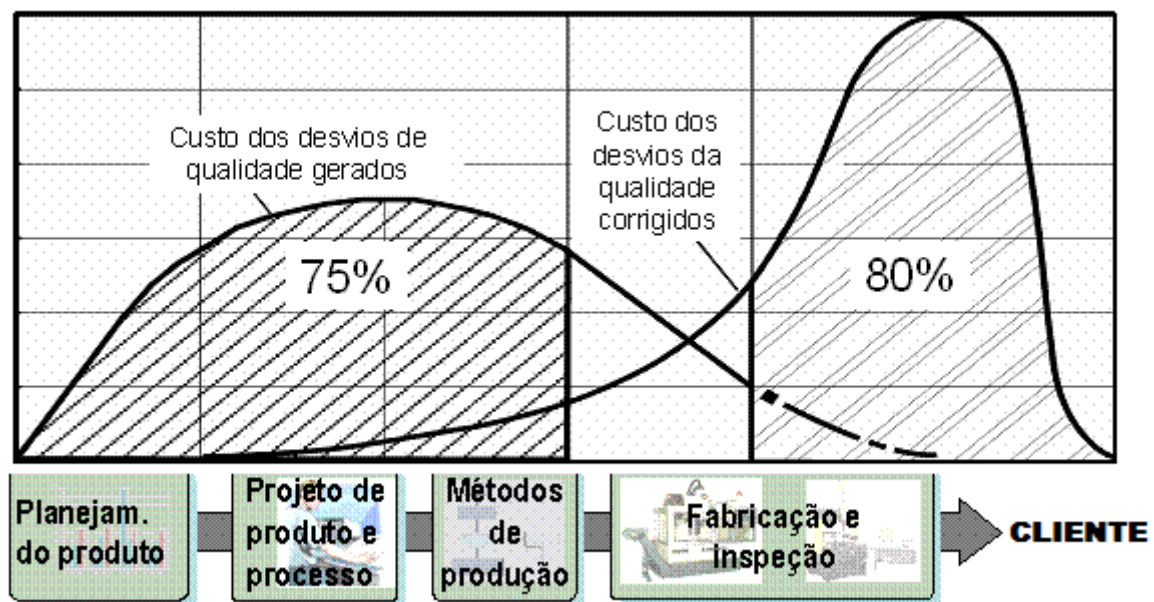


Figura 1.8 – Densidades dos custos dos desvios da qualidade gerados e corrigidos (DONATELLI et al., 2005).

As causas desses desvios de qualidade são diversas e muitas vezes complexas. Abaixo está uma lista de causas prováveis, sem a pretensão que seja exaustiva (ISO/TC 213, 2008, DONATELLI et al., 2005):

- especificação inadequada de tolerâncias dimensionais e geométricas;
- processo de fabricação fora de controle estatístico;

- conhecimento insuficiente das técnicas de inspeção, medição e ensaios do produto nas diversas fases de desenvolvimento, considerando, inclusive, a rastreabilidade metrológica;
- falta de integração entre os setores de CAD, CAE, CAPP, CAM e CAI;
- falhas no registro e transferência de informação ao longo do projeto;
- negligenciamento do erro do sistema de medição e sua incerteza desde as especificações de projeto;
- desconhecimento das possíveis variações dimensionais e geométricas durante e após a fabricação;
- conhecimento insuficiente da capacidade do processo de medição e de fabricação;
- rigor das normas atuais de avaliação de conformidade com a especificação;
- entre outras.

Verifica-se, portanto, que boa parte das possíveis causas relatadas acima tem relação com a especificação e controle de tolerância geométrica e que podem se tornar ainda mais complexas quando se trata de peças que possuem formas livres, como por exemplo, engrenagens hipoidais, perfis de turbinas, perfis de automóveis, carcaças de aparelhos eletrodomésticos, etc.

As constatações relatadas a seguir justificam a importância de se sistematizar informações que auxiliem profissionais e empresas que lidam com a tecnologia de medição por coordenadas na melhoria da qualidade das medições de peças com geometrias complexas.

Com respeito a expressão de tolerâncias geométricas em modelos de três dimensões (3D), a ASME publicou em 2003 a norma ASME Y14.41 – definição de produtos digitais publicada e a ISO em 2006 publicou, baseado na ASME, a sua norma ISO 16792 dentro do comitê que trata de documentação técnica de produto (TPD).

No Brasil, a norma ABNT NBR 6409 (1997), que trata de símbolos, definições e indicações de tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento circular, é baseada na norma ISO 1101 de 1983 e, portanto, está desatualizada. Outro aspecto importante, citado por WANDECK e SOUSA (2008), é a possibilidade de erros de aplicação no controle dimensional e geométrico pela omissão da norma brasileira sobre o uso do princípio da independência como regra fundamental. Esse princípio se contrapõe ao princípio de Taylor ou regra do envelope constante na norma ASME Y14.5 (2009) que é largamente

utilizada nas salas de metrologia no Brasil mas, referencia nos desenhos técnicos a NBR 6409, o que indica um erro na interpretação da norma. O princípio de Taylor considera como regra fundamental que a tolerância dimensional já controla os desvios de forma, potencializando problemas de funcionalidade nos produtos. O princípio da independência avalia tolerância dimensional e desvios de forma de maneira independente.

No controle das especificações de tolerância, basicamente dois métodos são utilizados para medição de superfícies com formas livres: a comparação direta e a indireta. O primeiro método consiste na verificação dos desvios entre a superfície a ser medida e o modelo físico padrão. Os problemas comuns nesta metodologia são a exatidão, velocidade de medição, custo do padrão e o nível de incerteza de medição que é fortemente dependente da habilidade do operador (NEROSKY, 2001).

Na comparação indireta, a superfície real é comparada não mais com um modelo físico, mas, com um modelo geométrico da superfície livre em CAD 3D. Dentre as vantagens da metodologia por comparação indireta podemos destacar a incerteza da medição que é geralmente menor que no caso anterior, uma vez que são conhecidas explicitamente a posição e magnitude dos erros. Outra vantagem é a possibilidade de obtenção de uma superfície contínua a partir dos pontos medidos, utilizando-se de técnicas de ajuste como, por exemplo, a dos mínimos quadrados (NEROSKY, 2001, LI e GU, 2004).

Uma questão relacionada com a comparação indireta é o fato da imprecisão e a limitação no intercâmbio dos dados gerados entre diferentes sistemas CAD/CAM e as máquinas de medir por coordenadas. Adicionalmente outros fatores podem interferir na avaliação da conformidade com a especificação como, por exemplo, programa de medição, fixação e alinhamento (definição do sistema de coordenadas da peça), filtros e algoritmos de ajuste, entre outros (SAVIO et al., 2007, MAAS, 2001).

Quanto às técnicas de medição, as peças com geometrias complexas podem ser medidas com ou sem contato. Na medição por contato, tem-se destaque para máquina de medir por coordenadas, onde a peça é apalpada mecanicamente por um sensor. Na medição sem contato, não há o contato físico entre o sensor e a peça e os métodos ópticos são largamente utilizados (LI e GU, 2004, FANTIN, 1999). Em qualquer das técnicas de medição existe a limitação quanto à rastreabilidade metrológica na medição pela falta de um padrão (ou peça padrão) com geometria similar a peça medida, suficiente exatidão, boa estabilidade, razoável custo e incerteza de calibração suficientemente pequena (SAVIO et

al.,2007). As normas de ensaios de máquinas de medir por coordenadas não contemplam geometrias complexas e superficies livres. Este último ponto tem relação direta com normas ISO 9001, ISO/IEC 17025 e ISO/GPS (GPS - Geometric Product Specification), que exigem que o sistema de medição esteja formalmente rastreado aos padrões nacionais ou internacionais de medição.

1.5 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo geral:

Desenvolvimento de uma sistemática com diretrizes para auxiliar profissionais e empresas na garantia da qualidade na medição de peças com geometrias complexas e superficies com forma livre, utilizando máquina de medir por coordenadas.

Os objetivos específicos:

- a) Apresentar um conjunto de diretrizes, focadas nas principais fontes de erros na medição por coordenadas, que auxiliarão profissionais e empresas que utilizam máquina de medir por coordenadas cartesianas;
- b) Avaliar operacionalmente e metrologicamente a sistemática proposta em estudo de caso real.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo II é feita uma descrição dos métodos de medição por coordenadas com e sem contato e os principais meios de medição de peças com geometrias complexas. É abordada a medição de engrenagens cilíndricas de dentes retos e uma breve discussão sobre a medição de pás de hélice.

No capítulo III é feita uma extensa revisão bibliográfica sobre tolerância dimensional e geométrica, normalização e seus princípios e as limitações no caso de geometrias complexas e superficies com forma livre. É discutido controle geométrico de tolerância de perfil de linha e de superfície.

No capítulo IV são apresentados os principais subsistemas de uma máquina de medir cartesiana. São discutidas questões relativas às fontes de erros na medição por coordenadas incluindo os erros geométricos da máquina, estratégia de medição, interpretação de geometrias nominais e erros nos programas para medição e análise. É

discutido o estado da arte com respeito às limitações de rastreabilidade metrológica e incerteza de medição para geometrias complexas.

No capítulo V são resumidas as principais dificuldades relacionadas com especificação e medição de tolerâncias dimensionais e geométricas com máquinas de medir por coordenadas. É detalhada a sistemática para se garantir qualidade na medição por coordenadas, focando essencialmente na estratégia de medição.

No capítulo VI são apresentados estudos de casos de peças com geometria complexa, para avaliação operacional e metrológica da sistemática proposta no capítulo V.

No capítulo VII são apresentadas as conclusões do trabalho e sugeridos trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

MEDIÇÃO DE PEÇAS COM GEOMETRIA COMPLEXA

2.1 INTRODUÇÃO

Conforme citado no capítulo I, na inspeção geométrica de superfícies livres duas metodologias são normalmente empregadas: a comparação direta e indireta. O princípio básico da comparação direta consiste em verificar o desvio entre a superfície a ser analisada e uma superfície física tida como padrão, através da medição das distâncias (folgas) existentes entre as duas quando sobrepostas. A principal desvantagem de se usar superfícies padrão em medições geométricas é a incerteza de medição, que se torna fortemente dependente da habilidade do inspetor e da manutenção e calibração dos próprios padrões (NEROSKY, 2001).

A comparação indireta baseia-se na tecnologia de medição por coordenadas. Nesse caso, as coordenadas de diversos pontos da superfície da peça são determinadas e os erros geométricos são definidos como sendo as diferenças entre os valores medidos e os valores de referência. Como a posição e a magnitude dos erros são fornecidas explicitamente, sua incerteza de medição é geralmente menor que no caso da comparação direta (NEROSKY, 2001).

A complexidade na medição de superfícies livres reside na falta de elementos substitutos (planos, cilindros, linhas, etc.) para comparação. Adicionalmente, o sistema de coordenadas do projeto da peça é diferente do sistema de coordenadas dos pontos medidos da peça real.

É necessário, portanto, colocá-los em um sistema de coordenadas comum, de modo que se possam comparar as duas superfícies. Esse relacionamento entre coordenadas

é complexo (LI e GU, 2004). Na figura 2.1 constam os dois sistemas de coordenadas, e o Δr é a diferença do ponto “p” entre os sistemas, próprio dos erros de fabricação.

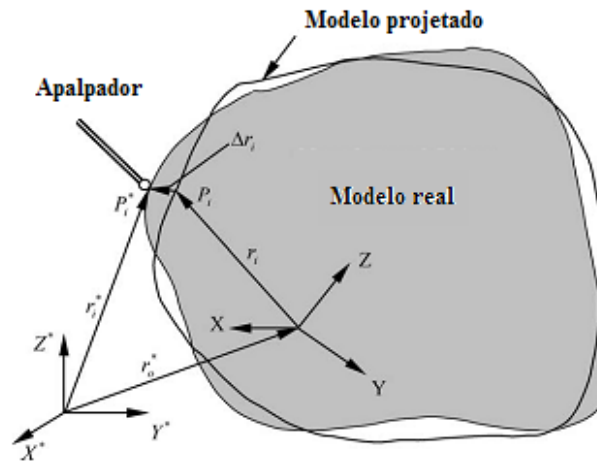


Figura 2.1 – Sistemas de coordenadas do projeto e da peça real (adaptado DANTAN *et al.*, 2007)

Independente da metodologia utilizada, as informações sobre a orientação, posição e forma são essenciais para uma caracterização unívoca da superfície livre, exigindo uma análise bastante criteriosa. A seguir faz-se um breve resumo das técnicas e instrumentos usuais de medição de formas ou superfícies livres, classificando em medição por contato e medição sem contato. Essa classificação não é rígida uma vez que uma máquina de medir por coordenadas, por exemplo, pode ser classificada como de medição sem contato quando utiliza algum tipo de sensor óptico para aquisição dos pontos sobre a superfície.

2.2 MEDIÇÃO POR CONTATO

2.2.1 Medição com gabaritos

Esses instrumentos operam como padrões contra os quais a curva ou superfície é comparada de forma direta. Assim, sua forma deve apresentar um desvio consideravelmente menor que a tolerância da superfície a ser controlada. Usualmente, a comparação é visual, através da observação do fio de luz entre o gabarito e a peça. A

inspeção é por atributos e, portanto, não informa o valor do desvio em cada ponto da superfície controlada.

Na figura 2.2 consta um exemplo de inspeção de uma pá de turbina através da comparação direta com observação com fio de luz.



Figura 2.2 – Inspeção direta de uma pá de turbina (SAVIO et al., 2007).

Como afirmado na introdução deste capítulo, a principal limitação de se usar superfícies padrão (gabaritos) em medições geométricas é a incerteza de medição, que se torna fortemente dependente da habilidade do inspetor e da manutenção e calibração dos próprios gabaritos.

2.2.2 Graminho ou traçador de altura

Trata-se de um instrumento de medição semelhante ao paquímetro, porém realiza seu trabalho sobre uma superfície de referência. São utilizados tanto em laboratório de metrologia como em setores de fabricação para medir, traçar peças, auxiliar na verificação de nivelamento, paralelismo, planeza e outros parâmetros (LIMA, 2006).

Na figura 2.3 constam exemplos de traçadores de altura analógicos e digitais.



Figura 2.3 – Diversos tipos de traçador de alturas

2.2.3 Máquinas de medir por coordenadas (MMC)

Uma máquina de medir por coordenadas cartesianas é um sistema mecatrônico de medição cujo objetivo é obter as coordenadas cartesianas de pontos sobre superfícies de peças de diversos formatos e de maneiras diferentes. Existem variados tipos de máquinas de medir, que diferem entre si essencialmente pelo tipo de construção e pela exatidão de medida, apresentando todas elas, no entanto, características comuns tais como: uma mesa, três eixos e um apalpador.

Essa variedade de construção mecânica aliada à rapidez e flexibilidade para medição de diferentes formas geométricas contribuíram para a disseminação dessa tecnologia nas atividades de desenvolvimento de produtos, controle dimensional e geométrico e calibração de peças em laboratórios de metrologia. Na figura 2.4 constam três tipos construtivos de máquinas de medir por coordenadas cartesianas denominados de: tipo pórtico (a), tipo braço horizontal (b) e tipo ponte (c).



(a)



(b)



(c)

Figura 2.4– Tipos de máquinas de medir por coordenadas.

Na medição por contato nessas máquinas, a informação sobre a geometria da peça é obtida apalpando fisicamente a superfície da peça e as coordenadas desses pontos são expressas num sistema de referência pré-determinado. Entretanto, não é possível avaliar os desvios dimensionais e geométricos da peça (por exemplo, desvios de diâmetro, de distância, de posição, de perfil, batimentos, entre outros) diretamente pelas coordenadas dos pontos medidos. Assim, podem-se identificar basicamente duas formas para avaliar, a partir dessas coordenadas, a qualidade geométrica da peça. Na primeira forma, as coordenadas dos pontos medidos são usadas para estimar, através de um algoritmo de ajuste, os parâmetros de elementos geométricos ideais, também chamados de geometrias substitutas, tais como cilindros, planos, cones, etc. A avaliação de conformidade é realizada comparando esses parâmetros com as especificações de interesse (por exemplo, tolerâncias de tamanho, posição, orientação, batimento, entre outros).

Na segunda maneira, os pontos medidos são posicionados com relação ao modelo CAD tridimensional da peça usando algum critério matemático de ajuste, por exemplo, o ajuste por mínimos quadrados. A partir desse ajuste podem ser determinados os desvios da superfície extraída com relação à superfície do modelo, realizando a avaliação de conformidade com as especificações. Esse é o modo mais freqüente quando se faz medição de peças com superfícies de forma livre.

Basicamente, todo método de medição 3D capaz de adquirir pontos únicos da superfície de uma peça é apropriado para medições de superfícies de formas livres. As máquinas de medir por coordenadas equipadas com apalpadores para medição por contato contínuo (scanning) podem medir um grande número de pontos na superfície de uma peça num pequeno intervalo de tempo, gerando, assim, informação mais detalhada sobre a geometria. Para geometrias regulares (planos, cilindros, esferas, cones, etc.) a definição da quantidade mínima de pontos para medição é normalizada e disposta nos programas computacionais de medição. No entanto, na medição de superfícies livres, a escolha do número de pontos e da sua distribuição é mais complexa, gerando normalmente uma quantidade densa de pontos sobre a superfície (NEROSKY, 2001).

Entre as limitações do uso da máquina de medir por coordenadas com relação aos métodos ópticos, destacam-se a necessidade de fixação da peça, portabilidade, a velocidade de medição e a limitação quanto ao tamanho da peça a inspecionar. Um estudo mais detalhado da aplicação da MMC é abordado no capítulo IV.

2.2.4 Braços articulados de medição

Um braço articulado de medição, também conhecido como máquina de medir por coordenadas portátil, é um sistema de medição manual composto de uma série de articulações com cinco, seis ou sete graus de liberdades e sensores de medição angular (encoders) de elevada exatidão nas juntas para determinar a posição de um apalpador no espaço tridimensional.

Devido as suas diversas configurações e características construtivas, os braços articulados de medição possuem características vantajosas como, por exemplo, grande portabilidade, baixo peso e custo reduzido se comparado às máquinas de medir por coordenadas cartesianas. Na figura 2.5 são apresentadas duas configurações de braços de medição em função do número de juntas de rotação (graus de liberdades).

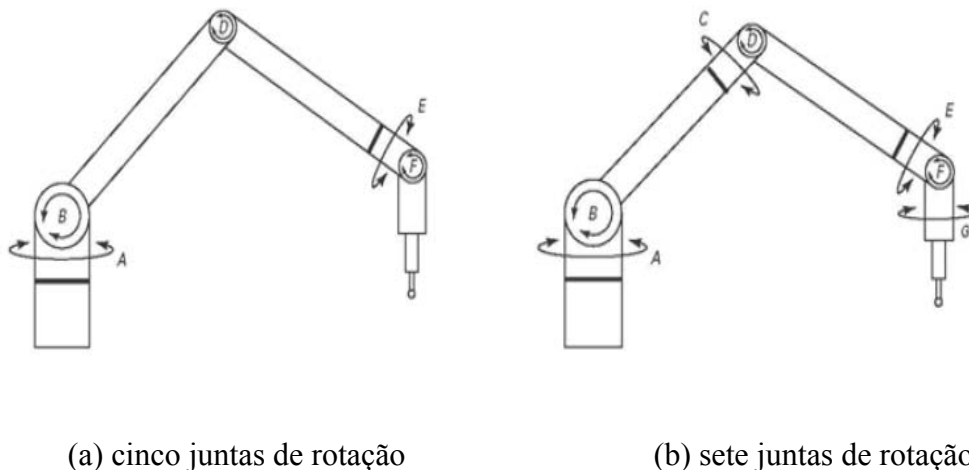


Figura 2.5 – Configurações de braços articulados de medição (LIMA, 2006).

Em geral, as incertezas das medições realizadas com braços são maiores que as executadas nas máquinas de medir por coordenadas cartesianas. Segundo LIMA (2006), valores de repetitividade (2σ) entre 0,1 mm e 0,6 mm são comuns para volumes de medição de aproximadamente 2 metros. Devido essa limitação, os braços articulados de medição são apropriados para o controle de peças com tolerâncias amplas, tais como peças plásticas, estampadas e fundidas não acabadas (peças brutas).

Na figura 2.6 consta uma aplicação prática de um braço articulado na medição de uma pá de turbina de grande porte.



Figura 2.6 - Medição de uma pá de turbina com braço de medição (LIMA, 2006).

2.2.5 Sistema de rastreamento interferométrico tridimensional

Pode-se descrever o rastreador interferométrico tridimensional ou “Laser Tracker” como sendo uma máquina tridimensional portátil que utiliza um laser interferométrico para medição de distância e de dois sensores (vertical e horizontal) de elevada exatidão para medição angular. É dotado de um mecanismo direcionador e um sensor de posição (PSD) de alta resolução, permitindo assim rastrear um refletor manual e medir seu posicionamento tridimensional no espaço, enquanto este é movimentado sobre a superfície da peça (VIEIRA, 2003).

O rastreador interferométrico tridimensional executa suas medições em coordenadas polares, ou seja, ângulo vertical, ângulo horizontal e distância do centro de giro do cabeçote até o centro do refletor. Um sistema computacional converte essa medição em coordenadas retangulares, quando desejado.

Existem diversos fabricantes com diferentes configurações e aplicações. Segundo catálogo da empresa FARO, a incerteza de medição de distância do seu equipamento

denominado de “Laser Tracker X” é da ordem de $10\mu\text{m} + 0,4\mu\text{m/m}$ com alcance até 70 metros.

Na figura 2.7 consta o modelo denominado de “Smart 310” da empresa Leica Geosystems e o princípio de medição da coordenada tridimensional de um ponto “p”.

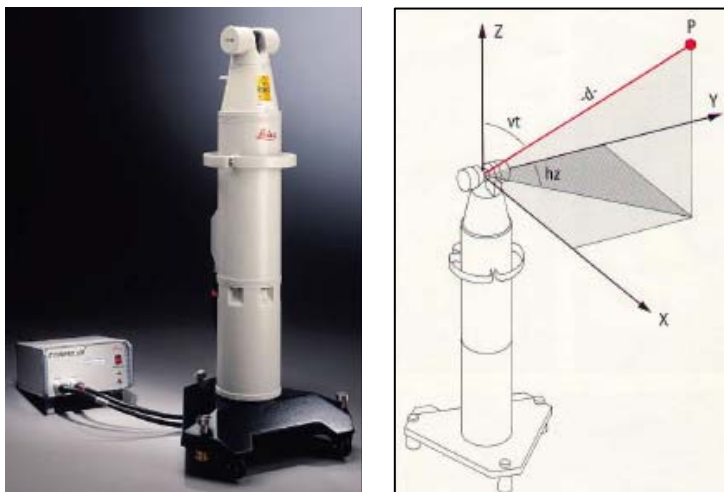


Figura 2.7 – Rastreador interferométrico 3D da Leica Geosystems (VIEIRA, 2003)

Pela portabilidade e flexibilidade desse sistema de medição, as possibilidades de aplicação vão desde laboratórios de calibração, empresas de construção naval, manutenção, aeronáutica, entre outras. Na figura 2.8 constam exemplos de aplicação dessa tecnologia na medição do perfil de pá de uma turbina (a), na medição do perfil de uma aeronave (b) e na medição do perfil de um automóvel (c).

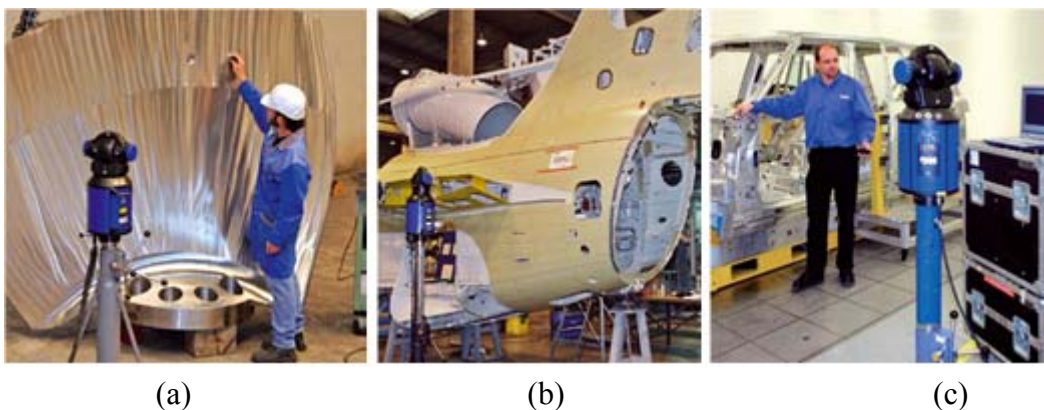


Figura 2.8 - Aplicações do rastreador interferométrico tridimensional (FARO, 2007)

2.3 MEDIÇÃO SEM CONTATO

As tecnologias baseadas em princípios ópticos de medição se caracterizam pela ausência de contato entre o instrumento de medição e o mensurando. A grande maioria dos métodos ópticos de medição de forma é baseada no princípio da triangulação, isto é, no cálculo da distância absoluta através da definição de um triângulo (FANTIN, 1999).

Há diversos sistemas ópticos disponíveis comercialmente que podem ser aplicados na medição de peças com geometria complexa. Nos tópicos seguintes serão abordados os sistemas de medição por fotogrametria e topometria.

2.3.1 Sistema fotogramétrico

A fotogrametria é classificada como uma técnica passiva de triangulação, isto é, não depende de fontes ativas tais como projetores de franjas ou fonte de laser. A aplicação da técnica fotogramétrica parte do conhecimento dos pontos homólogos (pontos nas duas imagens referentes ao mesmo ponto físico na peça medida), permitindo o cálculo das coordenadas tridimensionais do objeto através do princípio da triangulação. Por esse princípio, os vértices do triângulo são definidos pelo ponto a ser medido e suas correspondentes projeções em duas dimensões (2D) nas imagens da câmera. Através de um sistema computacional são identificadas as posições de pontos homólogos em cada imagem 2D e com base nas informações da posição e orientação da(s) câmera(s) são calculadas as coordenadas 3D de um grande número de pontos sobre a peça submetida à medição. Na figura 2.9 consta aquisição de imagens obtidas de duas posições diferentes da câmera. À esquerda, a triangulação é formada por um único ponto e à direita, por múltiplos pontos.

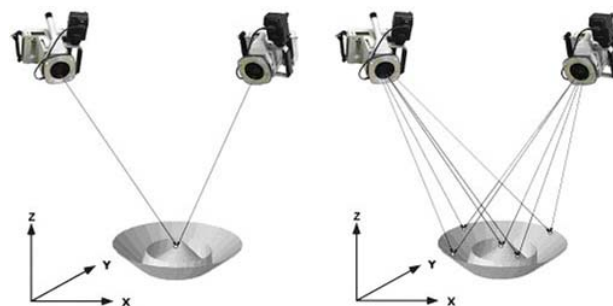


Figura 2.9 – Triangulação formada por um único ponto à esquerda e múltiplos pontos em comum à direita (LIMA, 2006).

Nesta técnica um problema relevante é a identificação dos pontos homólogos das duas imagens. Outra questão importante é a rastreabilidade metrológica desse sistema que é alcançada utilizando-se padrões de comprimento de diversas formas (geralmente unidimensionais), equipados com marcas de referência que possam ser reconhecidas pelo sistema fotogramétrico e calibrados como um padrão de comprimento na metrologia dimensional. Esses padrões de comprimento fixados na peça a medir e projetados na imagem 2D permitem ajustar a escala da nuvem de pontos ao tamanho real do objeto medido.

Como vantagens desse sistema podem-se citar:

- Grande portabilidade, sendo ideal para medições em campo ou em laboratório;
- Medição de peças complexas rígidas ou não;
- Baixo tempo de aquisição das imagens e robustez frente às grandezas de influência como vibrações e temperatura do ambiente.

Segundo LIMA (2006), o erro máximo admissível para esses sistemas é tipicamente da ordem de $\pm 0,02$ mm/m.

2.3.2 Sistema topogramétrico

O nome Topogrametria surge da fusão entre as técnicas Topométrica e Fotogramétrica (FANTIN, 1999, LIMA, 2006). A técnica Topogramétrica reúne os princípios da luz codificada, projeção de franjas com deslocamento de fase e fotogrametria. A técnica por topogrametria é ideal para medição de formas livres pela alta capacidade de aquisição de pontos sobre a superfície e sua portabilidade. Dentre as limitações destaca-se a medição de peças espelhadas, transparentes ou de cor muito escura, assim como nas peças que possuem furos ou descontinuidades a medição torna-se crítica com esse tipo de sistema (FANTIN, 1999). Na figura 2.10 consta um exemplo de inspeção de uma turbina tipo Kaplan e o resultado dos dados processados através de um programa computacional.

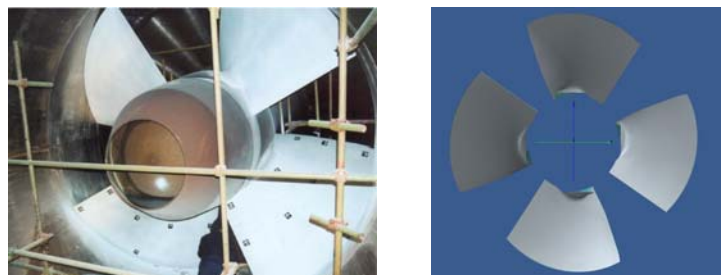


Figura 2.10 – Inspeção de uma turbina Kaplan por Topogrametria (GOM, 2007).

2.4 MEDIÇÃO DE ENGRENAGENS

Dentre os exemplos de peças com geometrias complexas já citadas neste trabalho, as engrenagens se destacam pela vasta aplicação nos mecanismos de transmissão e, por outro lado, pela falta de literatura técnica com respeito a tolerância de projeto e suas formas de controle (GOCH, 2003).

Pode-se definir uma engrenagem como um elemento mecânico provido de saliências de forma constante, chamadas de dentes, e que transmite ou recebe um movimento por contato direto com outra engrenagem (BRITO 2002, GEMAQUE, 2004). Sua geometria é complexa, formada de partes com superfície livre (perfil da envolvente, por exemplo) e outras com superfície regular (furo do eixo central, por exemplo).

A importância da engrenagem no contexto industrial pode ser ressaltada pela produção anual da indústria mundial, estimada em mais de 2,5 bilhões de engrenagens, com negócios da ordem de 200 bilhões de Euros (GOCH, 2003). Esses componentes mecânicos estão presentes em vários mecanismos de transmissão, aparelhos domésticos, máquinas ou motores, com as principais funções de:

- a) Transmitir movimento e torque entre eixos;
- b) Variar a velocidade e o sentido de rotação de um eixo para outro;
- c) Ampliar ou reduzir torque;
- d) Converter movimento retilíneo em angular e vice-versa.

Segundo GEMAQUE (2004), as engrenagens podem ser classificadas, segundo sua geometria global, em cilíndricas, cônicas e hiperbolóidicas. Estas geometrias são obtidas pela rotação de uma reta ou curva geratriz, em torno do eixo central da engrenagem.

As engrenagens cilíndricas podem ser de dentes retos ou de dentes helicoidais. As primeiras possuem seus dentes orientados na direção paralela ao eixo de transmissão e são relativamente mais fácil de estudo, fabricação e medição que outros tipos de engrenagens. Sua aplicação contempla transmissão de pequenas e médias potências entre eixos paralelos que operam a baixa rotação.

Nas engrenagens cilíndricas helicoidais os dentes se orientam segundo hélices cilíndricas de ângulos entre 5° e 45°. Normalmente são empregadas com eixos paralelos, mas também são encontradas com eixos reversos. São aplicadas em transmissões de alta velocidade como, por exemplo, caixas de marchas de veículos, mas são limitadas para

transmissões de altas potências em virtude dos esforços axiais nos mancais gerados por conta da sua geometria. Na figura 2.11 constam exemplos de engrenagens cilíndricas de dentes retos (a) e outra com dentes helicoidais (b).



Figura 2.11 – Engrenagens cilíndricas: dentes retos (a) e dentes helicoidais (b)

As engrenagens com geometrias cônicas são usadas para transmissão entre eixos ortogonais ou concorrentes com ângulos distintos de 90° e exigem alta exatidão na fabricação, inspeção e montagem para um adequado funcionamento. Seus dentes podem ser retos, helicoidais ou curvos (tipo Zerol). Na figura 2.12 constam exemplos de engrenagens cônicas de dentes retos (a) e outra com dentes helicoidais (b).



Figura 2.12 - Engrenagem cônica com dentes retos (a) e com dentes helicoidais (b)

As engrenagens com geometrias hiperbolóidicas possibilitam a transmissão entre eixos reversos ou deslocados. Permitem altas relações de transmissão, assim como possuem grande capacidade de carga. São extensivamente aplicadas em eixos de carros, caminhões e tratores.

Na figura 2.13 consta um exemplo de uma engrenagem hipoidal.



Figura 2.13- Engrenagem hipoidal

Nessa ordem de apresentação, observa-se um aumento da complexidade tanto de projeto quanto de fabricação e, conseqüentemente, no controle dimensional e geométrico. As principais conseqüências com relação a não conformidade com as especificações dimensionais e geométricas são os elevados níveis de ruídos, vibrações, danos em outras engrenagens, decréscimo do rendimento e falhas prematuras (BRITO, 2003).

Na figura 2.14 estão apresentadas as formas nas quais a falta de qualidade nas engrenagens podem ser manifestadas (BRITO, 2003).

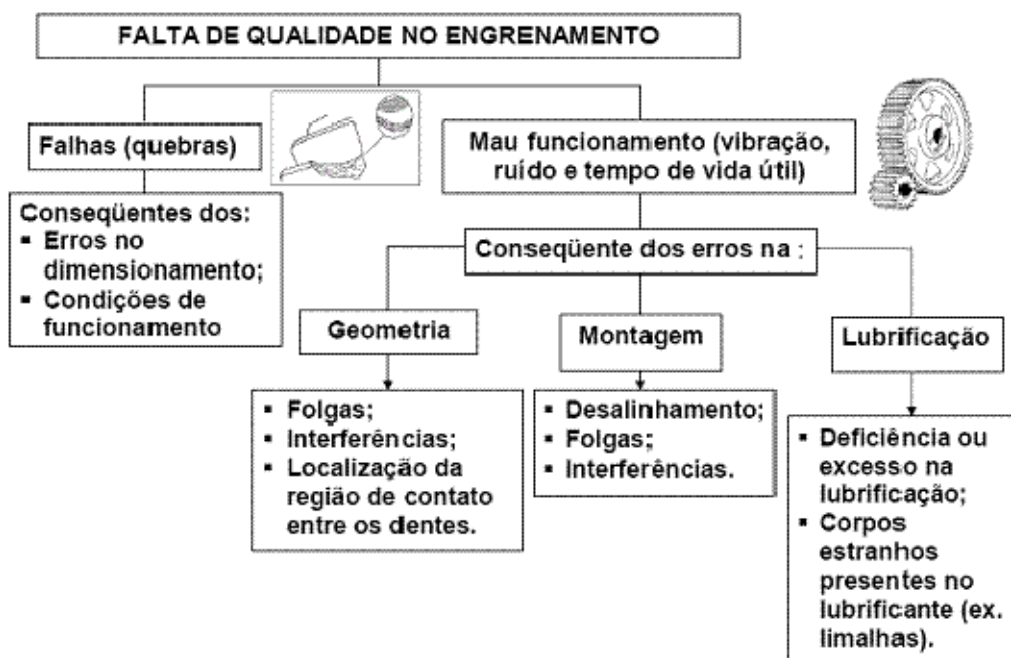


Figura 2.14 - Sintomas e conseqüências da falta de qualidade no engrenamento

São muitas as causas de erros em engrenagens, desde a especificação inadequada de projeto, problemas de montagem e lubrificação e especificamente, erros dimensionais e geométricos de fabricação. Neste último, os métodos de medição dependem, entre outros fatores, da magnitude das tolerâncias especificadas, ou seja, da classe de qualidade à qual a engrenagem pertence; que são definidas em normas nacionais, regionais ou internacionais.

2.4.1 NORMAS PARA ESPECIFICAR ENGRENAGENS

Segundo GEMAQUE (2004), é prática industrial o cliente optar pela norma que melhor atende as suas necessidades. Essas normas são publicadas por diversos sistemas de normalização, segundo a competitividade no mercado para este tipo de aplicação.

Dentre os principais organismos de normalização cabe destacar:

ISO – International Organization for Standardization

AGMA – American Gear Manufacturers Association

DIN – Deutsches Institut für Normung

JIS – Japanese Standards Association

BSI – British Standards Institution

AFNOR – Associação Francesa de Normalização

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

As normas sobre engrenagens publicadas por essas organizações diferem basicamente em relação a:

- a) simbologia utilizada para representação dos parâmetros geométricos.
- b) definição dos limites de tolerâncias que cada norma abrange; e
- c) quantidade de classes disponíveis.

Na tabelas 2.1 e 2.2 consta uma seleção das mais importantes normas utilizadas para engrenagens cônicas e hipoidais e para engrenagens cilíndricas de dentes retos e helicoidais, respectivamente, com relação aos aspectos de simbologia e tolerância dimensional e geométrica.

Tabela 2.1 - Lista de normas para engrenagens cônicas e hipoidais.

TIPO DE ENGRENAGEM	NORMA
Cônicas ou hipoidais	ISO 17485(2006) - Bevel gears - ISO system of accuracy.
	ISO 23509 (2006) - Bevel and hypoid gear geometry.
	ANSI/AGMA 2009-B01- Bevel Gear Classification, Tolerances and Measuring Methods.
	ABNT NBR 7262 (1982) - Engrenagens cônicas, hipóides e elóides (Terminologia).
	ABNT NBR 6167(1980) - Módulos de engrenagens cônicas.

Tabela 2.2 - Lista de normas para engrenagens cilíndricas de dentes retos e helicoidais.

TIPO DE ENGRENAGEM	NORMA
Cilíndricas de dentes retos ou helicoidais	ISO 1328-1(1995) - Cylindrical gears - ISO system of accuracy - Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to corresponding flanks of gear teeth.
	ISO 1328-2 (1997) - Cylindrical gears - ISO system of accuracy - Part 2: Definitions and allowable values of deviations relevant to radial composite deviations and runout information.
	ANSI/AGMA 2015-1-A (2001) - Accuracy Classification System - Tangential Measurements for Cylindrical Gears.
	ANSI/AGMA 2015-2-A (2005) - Accuracy Classification System - Radial Measurements for Cylindrical Gears
	AGMA 913-A (1998) - Method for Specifying the Geometry of Spur and Helical Gears.
	AGMA 933-B03 (2003) - Basic Gear Geometry.
	ANSI/AGMA 1012-G05 (2005) - Gear Nomenclature, Definitions of Terms with Symbols.
	ABNT NBR 6174 (1980) - Definições gerais de engrenagens.
	ABNT NBR 11534 (1991) - Representação de engrenagem em desenho técnico.
	ABNT NBR 10099 (1989) - Símbolos de engrenagens cilíndricas
	ABNT NBR 6684 (1981) - Engrenagens cilíndricas de dentes retos e helicoidais.
	ABNT NBR10095 (1989) - Engrenagem Cilíndrica de Evolvente – Precisão Dimensional.

No Brasil, por exemplo, as normas para engrenagens cilíndricas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, em alguns aspectos como definições de partes funcionais e parâmetros geométricos, se assemelham à ISO 1328 – parte 1 e 2.

Com relação às classes de qualidade (ou graus de qualidade), também existem diferenças entre cada sistema de normalização. Por exemplo, o sistema ISO (internacional) e o DIN (alemão) possuem dezoito graus de qualidade classificados de 01 a 16, enquanto que no sistema de normalização AGMA (americano) existem treze graus de qualidade de Q3 a Q15.

As normas da AGMA, DIN e ISO são normalmente as mais consultadas em trabalhos acadêmicos e na prática industrial (GOCH, 2003, DANTAN et al., 2007). Essa afirmação foi confirmada pelo autor deste trabalho em uma visita a uma empresa multinacional localizada no estado de Pernambuco que produz engrenagens para veículos de duas e quatro rodas. Nessa lista incluem-se também as normas japonesas da JIS.

Segundo GOCH (2003), apesar das diferenças atuais, a tendência é de harmonização dos conceitos, terminologias, especificação de tolerâncias e suas formas de controle, com as normas da ISO através do Comitê Técnico ISO TC 60. Atualmente, esse Comitê é secretariado pela AGMA (American Gear Manufacturers Association).

Um exemplo dessa iniciativa de harmonização é a publicação gradual de uma série de normas ANSI/AGMA 2015 (atualmente publicadas as partes 1 e 2) que substituem a norma ANSI/AGMA 2000-A88, que trata de classificação e inspeção de engrenagens cilíndricas e a própria norma ANSI/AGMA 1328-1. O objetivo é reduzir as ambigüidades e diferenças entre as normas da ISO e da AGMA.

Nessa nova norma da AGMA, por exemplo, a classificação considera dez graus de qualidade (A2 a A11) e não mais treze (Q3 a Q15) como na norma antiga. A ordem do grau de qualidade também foi alinhada com a norma ISO que utiliza a ordem crescente de grau e de tolerância. Desse modo, quanto maior for o grau de qualidade maior será a tolerância.

Outras mudanças importantes referem-se à obrigatoriedade de se estabelecer, no desenho técnico, um eixo de referência sem o qual a geometria nominal dos dentes da engrenagem não pode ser definida e o uso do sistema internacional de unidades (SI). Outras mudanças importantes como o uso de filtro gaussiano, seleção do diâmetro de apalpador, cálculo dos parâmetros da engrenagem, seleção da engrenagem padrão, entre outras informações podem ser obtidas em LAWSON (2004).

Apesar do esforço para a harmonização das normas entre as organizações de normalização, ainda existe um longo caminho a percorrer nesse sentido. A título de exemplo, na tabela 2.3 consta uma comparação do grau de equivalência entre normas da ISO (internacional) e da AGMA (sistema americano) para algumas normas de engrenagens cilíndricas de dentes retos, helicoidais e engrenagens cônicas e hipoidais. Verifica-se, pela tabela 2.3, que todas são parcialmente equivalentes, especialmente com respeito à terminologia, símbolos e forma de avaliação (ISO/TC60, 2010)

Tabela 2.3 – Grau de equivalência entre normas de engrenagens ISO e AGMA.

EQUIVALÊNCIA ENTRE AS NORMAS		TIPO
ISO	AGMA	
ISO 1328 - Cylindrical gears - ISO system of accuracy - Part 1 (1995) and Part 2 (1997)	ANSI/AGMA 2015-1- A (2001) e 2015-2-A (2005)	PARCIAL
ISO TR 10064 - Cylindrical gears - Code of inspection practice -- Part 1(1992) and 2 (1996)	AGMA 915-1-A02(2002) e AGMA 915-1-A05(2005)	PARCIAL
ISO/TR 10064 - Cylindrical gears - Code of inspection practice - Recommendation relevant to blanks, center distance, parallelism of axes Part 3 (1996)	AGMA 915-3-A99(1999)	PARCIAL
ISO 23509 - Bevel and hypoid gear geometry (2006)	ANSI/AGMA -2003-B97(2003)	PARCIAL
ISO 17485 - Bevel gears – ISO system of accuracy (2006)	ANSI/AGMA 2009-B01(2001)	PARCIAL
ISO 18653 - Gears – Evaluation of instruments for the measurement of individual gears (2003)	ANSI/AGMA 2110-A94(2000); 2113-A97(1997) e 2114-A98(1998)	PARCIAL
ISO/TR 10064-5 -Cylindrical gears - Code of inspection practice – Part 5: Recommendations relative to evaluation of gear measuring instruments (2005)	AGMA 931-A02 (2002)	PARCIAL

2.4.2 ESPECIFICAÇÃO DE ENGRENAGENS CILINDRICAS DE DENTES RETOS SEGUNDO A NORMA ISO 1328 1/2

As normas ISO 1328 partes 1 e 2 tratam das tolerâncias dimensionais e geométricas para engrenagens cilíndricas de dentes retos, as fórmulas de cálculo dos limites admissíveis para os principais parâmetros característicos das geometrias e delimita os erros máximos admissíveis conforme o grau de qualidade da engrenagem. A norma é aplicável apenas para engrenagem isolada e cobre a geometria de engrenagens de módulo normal (0,2 a 70) mm e diâmetro de referência de (5 a 10 000) mm.

Com respeito aos métodos de inspeção, a norma faz referência à norma ISO/TR 10064-1 de 1992 que trata de boas práticas para inspeção de flancos de engrenagens. Outra característica importante da norma é que o controle dos desvios com relação aos parâmetros característicos das engrenagens é tratado isoladamente e de forma conjunta, ou seja, considerando todos os desvios isolados.

Esses parâmetros característicos são elementos de controle da geometria da engrenagem que na norma ISO 1328 são classificados em dois grupos segundo a forma de avaliação dos desvios, são eles: desvios isolados (avaliação analítica) e desvios de conjunto (avaliação funcional).

Na seqüência são descritos os parâmetros característicos da geometria da engrenagem, com terminologia, símbolos e conceitos conforme a norma ISO 1328-1(1995).

a) Desvios de passo individual (fpt), acumulado (fpk) e total (Fp)

O desvio de passo individual (fpt) corresponde a diferença algébrica entre o passo medido e o correspondente passo teórico medidos usualmente na circunferência primitiva. No controle desse desvio, utiliza-se, pela facilidade, o flanco dos dentes como referência para a medição.

O desvio de passo acumulado (Fpk) corresponde a diferença algébrica, em qualquer setor, entre o comprimento medido e o comprimento teórico. O setor selecionado deve conter uma quantidade inteira de passos (k) e não deve ser maior que 1/8 da circunferência de referência, ou seja, $2 \leq k \leq Z/8$, onde Z é o número de dentes. Na teoria, o desvio de passo acumulado pode ser entendido como a soma algébrica dos passos individuais no setor avaliado.

O desvio de passo acumulado total (F_p) corresponde ao máximo valor do desvio de passo acumulado de qualquer setor ($k=1$ até $k=Z$) de circunferência em relação a um determinado flanco de dente. Na figura 2.15 consta o passo teórico (P_t), o desvio do passo individual (f_{pt}) e o desvio do passo acumulado (f_{pk}) para dois dentes.

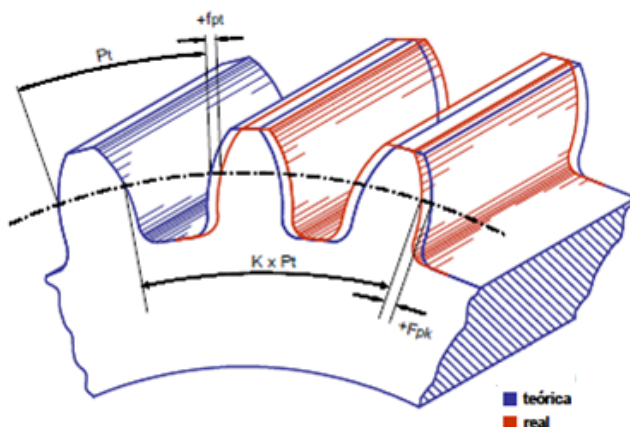


Figura 2.15 – Passo teórico e seus desvios (GEMAQUE, 2004)

b) Desvios de perfil (F_α , ff_α e fH_α)

O desvio de perfil corresponde ao afastamento do perfil evolvente real obtido do processo de fabricação do perfil ideal gerado a partir da respectiva circunferência de base. Na figura 2.16 consta a medição do desvio de perfil que deverá ocorrer no ponto médio da largura do dente.

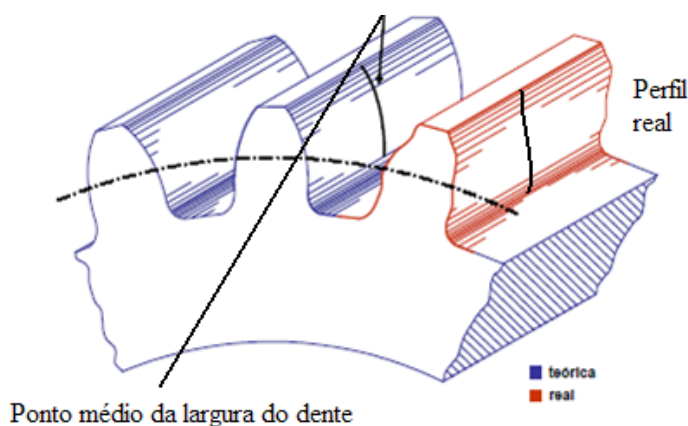


Figura 2.16 – Desvio de perfil (GEMAQUE, 2004)

Segundo a norma 1328-1, o desvio de perfil é caracterizado por três parâmetros: desvio total de perfil (F_α); desvio de forma de perfil (ff_α) e desvio angular de perfil (fH_α).

Na figura 2.17 constam graficamente os três tipos de desvios para um perfil corrigido onde a linha sinuosa representa a linha real do perfil medido pelo sistema de medição sobre o flanco do dente.

O desvio total de perfil (a) é a distância entre duas linhas de perfis projetados que envolvem o perfil real medido dentro de um comprimento de avaliação denominado de L_α . Na figura 2.17 (a), o gráfico corresponde a soma dos desvios de perfil (b) e (c).

O desvio de forma do perfil (ff_α) é a distância entre dois perfis médios que devem conter o perfil real medido. Na figura 2.17 (b) o gráfico representa o quanto à forma do perfil real se desviou da forma do perfil teórico.

O desvio angular de perfil é a distância entre dois perfis projetados que interceptam o perfil médio nos pontos entremos de avaliação do dente. Na figura 3.17 (c) consta o gráfico de desvio angular de perfil (fH_α) que representa o quanto o perfil real se desviou angularmente do perfil teórico.

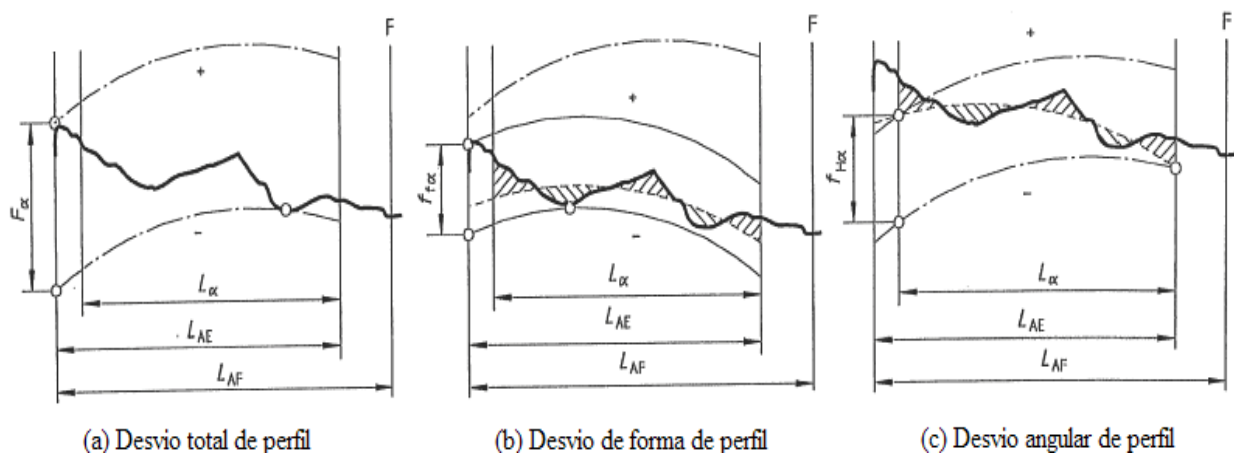


Figura 2.17 – Tipos de desvio de perfil segundo a ISO 1328-1

c) Desvio da linha de flanco (F_β , ff_β e fH_β)

Segundo a ISO 1328-1 o desvio da linha de flanco corresponde ao afastamento do flanco do dente com relação ao perfil evolvente ideal no sentido axial da engrenagem. As medições, segundo a ISO 1328-1, deverão ocorrer na altura da circunferência de referência e no sentido axial.

Na figura 2.18 consta a medição do desvio da linha de flanco que deverá ocorrer, segundo a ISO 1328-1, na altura da circunferência de referência.

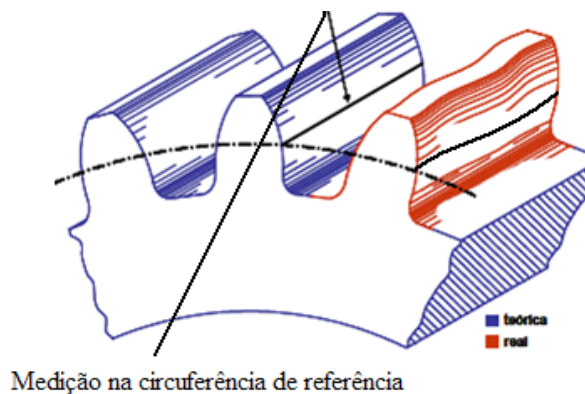


Figura 2.18 - Desvio da linha de flanco

Da mesma forma que o desvio de perfil, o desvio da linha de flanco é caracterizado por três parâmetros: desvio total da linha de flanco ($F\beta$), desvio de forma da linha de flanco ($ff\beta$) e desvio angular da linha de flanco ($fH\beta$). A interpretação do desvio da linha de flanco é análoga ao desvio de perfil.

d) Batimento radial (F_r)

Segundo a norma 1328-2 (1997), o batimento circular radial corresponde a amplitude máxima dos desvios individuais em relação ao eixo de giro da engrenagem. Na figura 2.19 consta um gráfico onde os erros estão distribuídos em torno de uma senóide, cuja amplitude corresponde a duas vezes o erro de concentricidade.

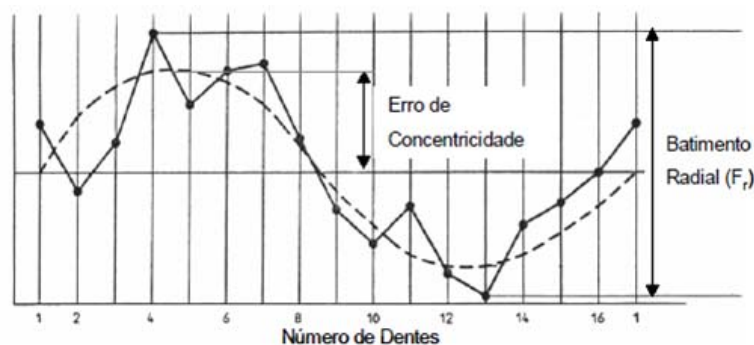


Figura 2.19 – Desvio circular radial

e) Desvios de conjunto

Os desvios de conjunto são abordados na ISO 1328-2(1997) e correspondem a variações de funcionalidade das engrenagens dentro de uma determinada faixa de tolerância requerida. Segundo GEMAQUE (2004), essas variações são provenientes dos diversos desvios isolados próprios da engrenagem e que à priori não são conhecidos.

Esses desvios são avaliados no processo de produção através da comparação do engrenamento entre a engrenagem selecionada e uma engrenagem padrão. Outros dispositivos de controle também são utilizados como calibres passa-não-passa, por exemplo. Existem dois tipos de desvios de conjunto: desvio composto tangencial e desvio composto radial. Entretanto, as informações oriundas desses parâmetros (tipicamente qualitativas) não são eficazes uma vez que não informam as causas dos desvios sendo, nestes casos, aplicável a avaliação dos desvios individuais (avaliação analítica).

Numa visita realizada em uma grande empresa fabricante de engrenagens na região nordeste constatou-se que nas diversas etapas do processo de fabricação, o controle é feito com engrenômetros e calibres de boca e tampão do tipo passa-não-passa.

Tanto os desvios isolados quanto os desvios de conjunto são avaliados para se garantir um funcionamento adequado do par pinhão/coroa. A norma ISO 1328-1/2 traz um conjunto de tabelas que caracterizam cada um destes desvios, e dependendo da tolerância admitida por projeto, poder-se-á ter um determinado grau de qualidade.

Como afirmado anteriormente, os graus de qualidade variam para cada sistema de normalização. No caso da norma ISO 1328-1/2, exceto pelo desvio composto radial, que possui 9 graus de qualidade, os demais parâmetros característicos possuem 13 graus de qualidade onde a tolerância aumenta com o aumento do número do grau de qualidade.

Para classificação de uma engrenagem com relação ao seu grau de qualidade, alguns parâmetros de projeto são considerados pela norma 1328-1/2, entre eles: o diâmetro de referência e o módulo da engrenagem.

Em resumo, os parâmetros característicos controlados segundo a norma ISO 1238 1/2 estão apresentados na tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Principais parâmetros controlados em uma engrenagem cilíndrica

GRANDEZA	PARÂMETRO
Desvios de forma do dente	Desvio total de perfil (evolvente): F_α
	Desvio de forma de perfil (evolvente): $f_{f\alpha}$
	Desvio angular do perfil (evolvente): $f_{H\alpha}$:
Orientação do dente	Desvio total da linha de flanco: F_β
	Desvio de forma da linha de flanco: $F_{\beta f}$
	Desvio angular da linha de flanco: $F_{H\beta}$:
Desvios de divisão (ou passo)	Desvio individual de divisão: f_p .
	Desvio acumulado de divisão: F_{pk} .
	Desvio total de divisão: F_p .
Batimento Radial	Desvio de batimento radial: F_r

2.4.3 CONTROLE GEOMÉTRICO DE ENGRENAGENS

Os parâmetros característicos das engrenagens, ou seja, os elementos de controle da geometria apresentados no item anterior são medidos por instrumentos de medição específicos ou máquinas de medir universais ou por máquinas controladas numericamente (máquinas universais CNC e as máquinas de medir por coordenadas).

As principais diferenças entre esses instrumentos referem-se ao método e estratégia de medição e ao uso de programa computacional para avaliação dos dados medidos (GOCH, 2003). Por sua vez, a metodologia de medição de engrenagens a ser utilizada irá depender de fatores como: nível de incerteza requerido; magnitude da tolerância especificada (grau de qualidade à qual a engrenagem pertence); tamanho da engrenagem; número de engrenagens produzidas; nível de automação e informatização desejado da medição; e custo da inspeção (BRITO, 2003).

Os dois principais métodos de medição utilizados no controle de engrenagens são o método funcional e o analítico. O método funcional é uma forma qualitativa de se classificar as engrenagens, isto é, o resultado da medição irá fornecer uma idéia dos níveis de erros dimensionais e geométricos da engrenagem, não fornecendo subsídios para se determinar as origens de tais erros.

O método analítico de controle de engrenagens consiste na medição do desvio existente entre o valor real do parâmetro e o seu valor teórico especificado em projeto. Esse método permite que os parâmetros característicos da engrenagem sejam medidos separadamente, possibilitando identificar as origens dos erros geométricos e realizar uma realimentação do processo de fabricação. Na figura 2.20 constam os métodos de medição e exemplos de instrumentos ou sistemas de medição para o controle de engrenagens.

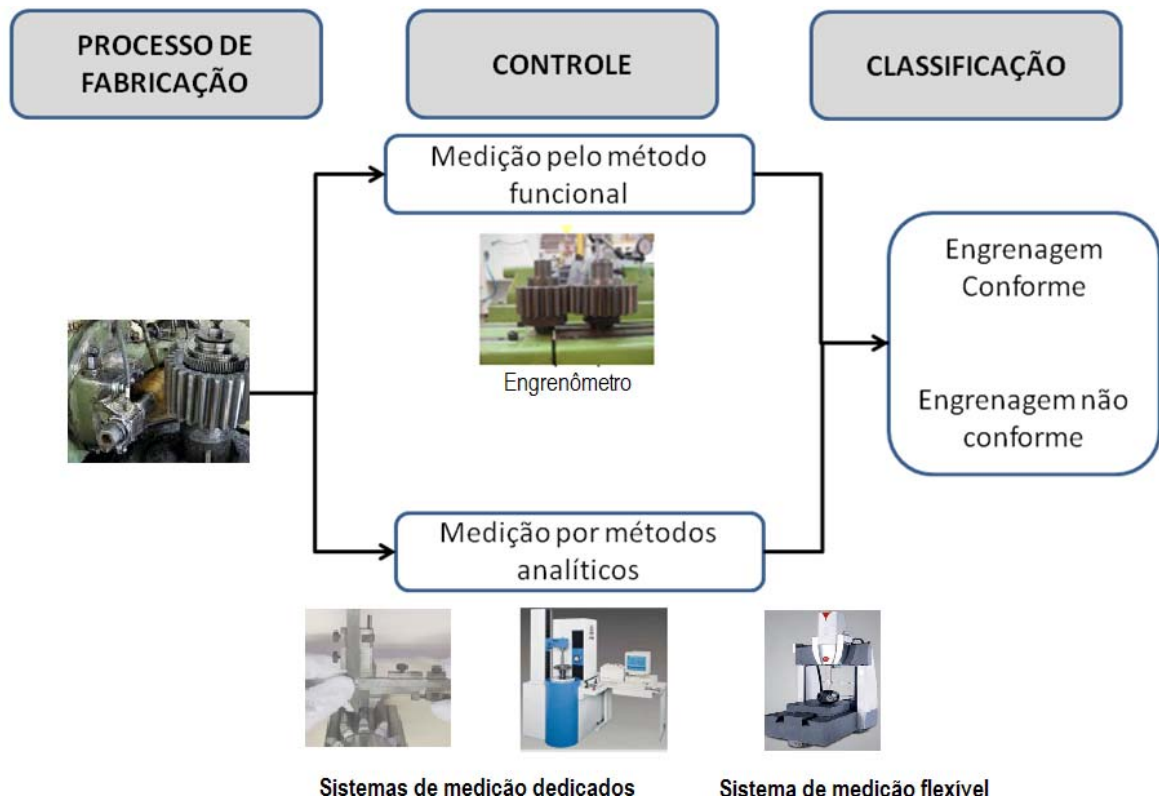


Figura 2.20 – Métodos de controle de engrenagens (adaptado BRITO, 2003)

O principal método funcional utilizado para controle dos desvios de conjunto consiste na simulação do engrenamento da engrenagem selecionada com uma engrenagem padrão, onde as variações da distância entre eixos são medidas e/ou registradas

graficamente para análise do engrenamento. A maior desvantagem desse método de medição é a impossibilidade de se conhecer individualmente as origens dos erros, logo o mesmo não é capaz de realimentar analiticamente o processo de fabricação. Na figura 2.21 consta um engrenômetro utilizado para o controle de engrenagens através do método funcional.

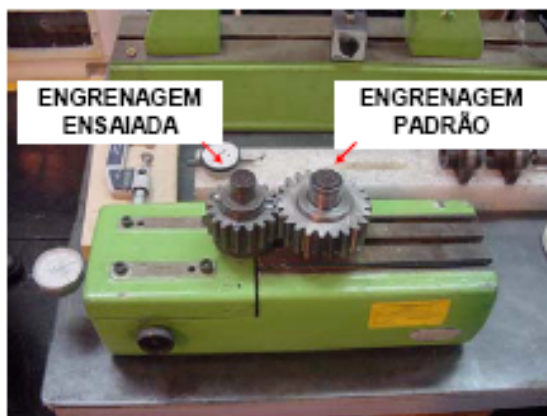


Figura 2.21 – Engrenômetro utilizado para o controle de engrenagens através do método funcional (BRITO, 2003).

2.4.4 AVANÇOS NA METROLOGIA DE ENGRENAGENS

Os avanços tecnológicos na área de controle, fabricação e desenvolvimento de programas computacionais, por exemplo, contribuíram para a evolução de sistemas de medição automatizados na medição de engrenagens.

Com respeito às máquinas de medir dedicadas, por exemplo, existem sistemas universais de medição por comando numérico computadorizado (CNC) de fabricantes como Klingelnberg, Mahr, Gleason e Wenzel.

Esses sistemas de medição podem controlar todos os parâmetros importantes da engrenagem de forma automatizada e informatizada, integrando a metrologia ao ambiente de produção (BRITO, 2003). São equipamentos normalmente dotados de dois ou três eixos lineares e um eixo de rotação (mesa rotativa). O alinhamento da engrenagem a ser inspecionada e a determinação de suas posições podem ser executadas ambos mecanicamente ou por programa computacional.

Na figura 2.22 constam dois sistemas de medição para engrenagens: o modelo dedicado Wenzel Geartec da empresa Wenzel (a) e o modelo Primar MX4 da empresa Mahr que é um sistema híbrido para medição de forma e dos parâmetros de engrenagem (b).



Figura 2.22 - Sistema de medição dedicado (a) e sistema de medição híbrido (b)

Outro sistema de medição CNC não dedicado de grande destaque na medição de peças com geometria complexa, como engrenagens cônicas, parafusos sem fim, etc., é a máquina de medir por coordenadas dotadas de mesa rotativa e de programa computacional específico.

Segundo HANDSCHUH e BILL(1991), a introdução da tecnologia da medição por coordenadas na medição de engrenagens cônicas deu-se no início da década de 90, onde o controle de engrenagens cônicas era feito através da comparação com engrenagem padrão e análise do modelo padrão de contato do dente. Na época, os métodos desenvolvidos para o controle de erros individuais para engrenagens cilíndricas de dentes retos e helicoidais não eram adequados para engrenagens cônicas, uma vez que nessas engrenagens, a axialidade dos dentes varia com a altura e espessura e o tamanho e forma dos dentes variam com a posição axial da engrenagem.

Na figura 2.23 consta um exemplo de uma máquina de medir por coordenadas com mesa rotativa integrada para medição de engrenagem da empresa alemã Wenzel.



Figura 2.23 – Máquina de medir por coordenadas com mesa rotativa integrada (Wenzel GearTec Germany)

A aplicação de máquina de medir por coordenadas no controle geométrico de engrenagens divide opiniões de especialistas uma vez que ainda não existem estudos conclusivos sobre as limitações de aplicação dessas máquinas no controle de engrenagens (BRITO 2003). Um fato é que, por questão de projeto, a incerteza de medição das máquinas CNC dedicadas são menores que das máquinas de medir por coordenadas (GOCH, 2003, BRITO, 2003).

Entretanto, do ponto de vista de flexibilidade, as máquinas de medir por coordenadas podem oferecer uma relação custo-benefício melhor se o equipamento não for utilizado na sua capacidade máxima. No tempo ocioso, a MMC pode medir uma gama variada de outras peças.

BRITO (2003) realizou um estudo comparativo entre o sistema de medição Primar MX4 mostrado na figura 2.22 (b) e uma máquina de medição por coordenadas de referência da fabricante alemã Zeiss modelo 550 para medição de engrenagem cilíndrica de dentes retos. A maior incerteza encontrada na medição de parâmetros da engrenagem pela MMC Zeiss 550 foi de 2 μm e na Primar MX4 foi de 1,1 μm .

Segundo BRITO (2003), os resultados do seu trabalho indicam a possibilidade de uso da máquina de medir por coordenadas de referência (baixo nível de incerteza, mesa rotativa e programa computacional específico) em pé de igualdade com as máquinas dedicadas para medição de engrenagens. O uso de máquinas de medir por coordenadas menos sofisticadas dependerá essencialmente da relação entre a tolerância da engrenagem e incerteza do processo de medição alcançada. Em seu trabalho, BRITO (2003) faz um estudo, sob a óptica da confiabilidade metrológica, das potencialidades de aplicação da máquina de medir por coordenadas de referência para medição e calibração de peças padrão com geometria de média complexidade e com geometria normalizada como é o caso de engrenagem cilíndrica de dentes retos. A principal limitação citada pelo autor refere-se à relação entre a tolerância da característica medir e a incerteza do processo de medição, mesmo para máquina de medir por coordenadas de referência.

Outro trabalho de dissertação que estudou a medição de engrenagem cilíndrica de dentes retos com uso de uma máquina de medir por coordenadas de referência foi realizado por GEMAQUE (2004). No trabalho foram discutidas as limitações identificadas na empresa para o controle de engrenagem e apresentadas sugestões que culminaram na aquisição de outra MMC com melhores recursos.

Além do crescimento na aplicação de máquina de medir por coordenadas (MMC) para controle dimensional e geométrico de engrenagem, outra tendência é a utilização de sistemas de medição ópticos para o controle de toda superfície do flanco do dente e não apenas do perfil, linha de flanco e passo simples, como é feito na metrologia convencional de engrenagem (GOCH, 2003, PFEIFER et al., 2001). Essa tendência é incentivada pela capacidade desses sistemas de adquirir até duzentos mil pontos da superfície do flanco em poucos segundos. A descrição 3D do flanco do dente e seu relacionamento geométrico com o passo e a espessura do dente permitem a descrição tridimensional completa de toda engrenagem. As normas atuais de engrenagens não abordam a análise 3D do flanco e tampouco a teoria de GD&T nesse domínio (GOCH, 2003).

Com respeito à demonstração formal da rastreabilidade metrológica para tarefas específicas na MMC, esse assunto será tratado no capítulo 4 deste trabalho.

2.5 MEDIÇÃO DE PÁS DE HÉLICE

Outro componente mecânico com geometria complexa é a pá de hélice. Ela pode ser encontrada em uma grande variedade de produtos industriais, desde ventiladores para computadores pessoais, turbinas para medição de vazão de fluidos, hidrogeradores, sistemas de propulsão de embarcações e em sistemas de alto desempenho como motores de combustão a jato. Neste último, o controle da qualidade é crucial dado que uma falha pode ter efeitos catastróficos (SAVIO et al., 2007).

Na figura 2.24 constam exemplos de turbinas para hidrogeração: tipo Pelton (a), Francis (b) e Kaplan (c). Essas turbinas são projetadas, por razões funcionais, utilizando a composição de partes com geometria regulares e com superfícies livres (LIMA, 2006).

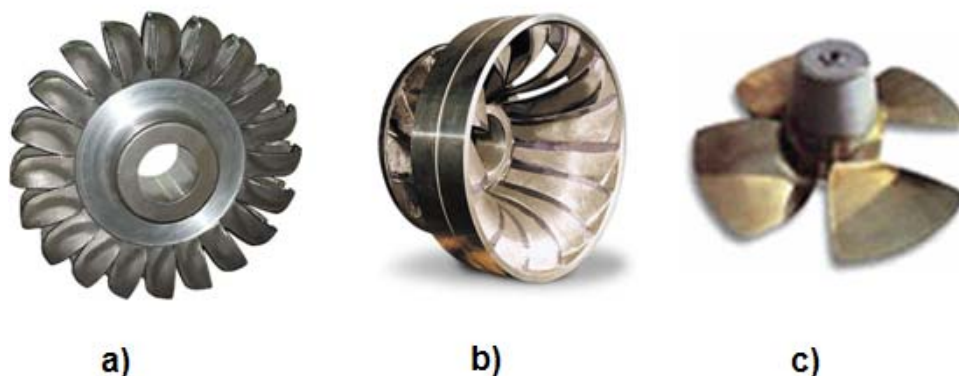


Figura 2.24 – Rotores de turbinas com geometria complexa

Segundo BOAS (2006) diversos são os parâmetros que definem a geometria de uma hélice. Uma parte desses parâmetros é obtida nas denominadas séries sistemáticas que são tabelas que definem a geometria de cada uma das famílias de hélice, como por exemplo, a família Kaplan. Essas tabelas são constituídas por números adimensionais, que possibilitam a parametrização da geometria da hélice, com relação a poucas variáveis. O restante dos parâmetros é definido de acordo com as especificações do projeto.

De uma forma geral, uma hélice é composta por um cubo central no qual o eixo de transmissão é fixado. Ao redor do cubo, são presas as pás que possuem duas superfícies, a superior é denominada de “superfície de sucção”, a inferior é denominada de “superfície de pressão”. As duas arestas formadas pelo encontro das superfícies são conhecidas por:

“bordo de ataque” e “bordo de fuga”. Tendo em vista o sentido da rotação, o bordo de ataque precede o de fuga.

As secções das pás para aplicações aerodinâmicas possuem um perfil semelhante aos das asas dos aviões e por isso recebem o nome de “perfil alar”. Ao comprimento linear de cada um dos perfis é dado o nome de “corda”. O ângulo da pá, usualmente medido em graus, é o ângulo entre a corda da pá e o plano de rotação.

Existe uma grande variedade de tipos de perfil para fins aerodinâmicos; desses, poucos são apropriados para uso em hélices. Os perfis mais empregados pelos fabricantes são os desenvolvidos pela NACA (National Advisory Committee for Aeronautics), atual NASA (BOAS, 2006).

As entidades que compõem e definem um perfil aerodinâmico são: o bordo de fuga e o de ataque; a corda que é definida como a reta que une o bordo de ataque ao bordo de fuga; a linha média, também denominada linha de curvatura, que é definida como a linha equidistante entre a superfície de sucção e a de pressão; a curvatura é definida como a distância máxima entre a corda e a linha média; a espessura é definida como a maior distância, perpendicular à linha média, entre a superfície de pressão e a de sucção.

Na figura 2.25 constam as principais partes do perfil aerodinâmico de uma pá.

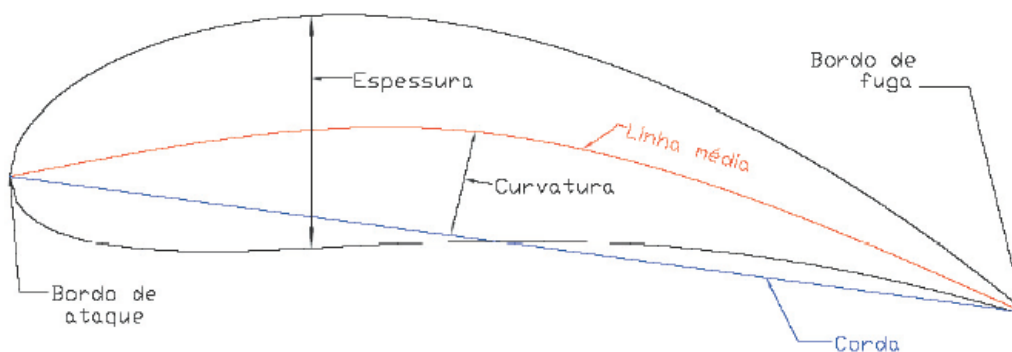


Figura 2.25 – Componentes de um perfil aerodinâmico de uma pá

2.5.1 CONTROLE GEOMÉTRICO

As pás são fabricadas por diversos processos tais como, usinagem por fresa, prototipagem rápida, forjamento, fundição, etc. Nesses processos, diversos fatores como contrações térmicas e deformações plásticas, podem influenciar nas variações dimensionais e geométricas do componente. Essas variações dentro de limites admissíveis (tolerâncias especificadas) garantem a adequada função de equipamentos dotados de rotores de turbinas como mostrados na figura 2.24.

As tolerâncias dimensionais estão basicamente relacionadas a variações de torção, ângulo, arco e espessura das pás. A tolerância de geometria, com forma livre ou curva da pá, está fundamentalmente relacionada com as tolerâncias de perfil de linha e superfície, com ou sem relação a referências (LIMA, 2006).

Usualmente pás de turbinas podem ser medidas através de técnicas de medição com e sem contato. Na medição por contato, ainda existem sistemas manuais dedicados para medição de contorno e ângulo de torção das pás, porém são lentos e com custo de manutenção elevado.

Outra opção com contato bastante difundida é o uso da medição por coordenadas associada a programas computacionais específicos como, por exemplos, PC-DMIS BLADE® (www.wilcoxassoc.com) e Blade® Pro software (www.zeiss.com) e apalpadores para medição por contato contínuo.

As máquinas de medir por coordenadas cartesianas e os braços articulados de medição são largamente utilizados. Dois trabalhos recentes utilizando a tecnologia de medição por coordenadas abordaram a medição de pás de turbinas hidráulicas.

LIMA (2006) em seu trabalho fez uma comparação entre tecnologias de medição com e sem contato através de estudos em peças fundidas para hidrogenação, no caso uma pá Kaplan. Os sistemas de medição utilizados foram um braço de medição articulado da empresa FARO e um sistema de medição fotogramétrico da empresa GOM.

Na figura 2.26 consta o desenho simplificado em CAD da pá Kaplan e os pontos de interesse colados na peça.

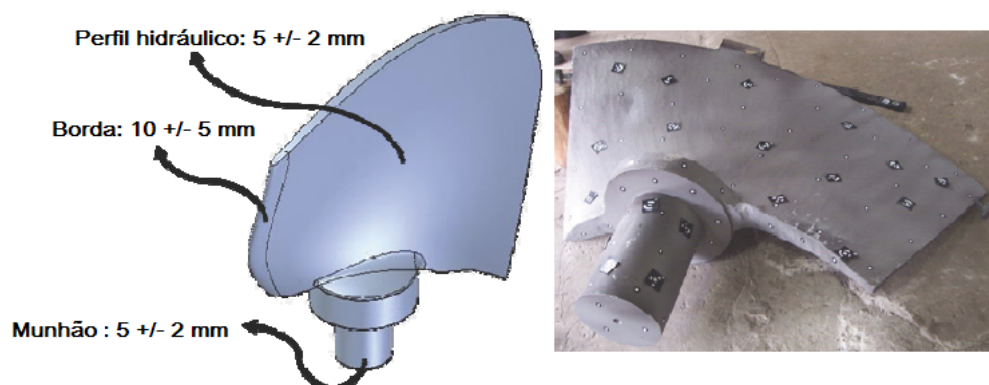


Figura 2.26 – Pá Kaplan em CAD e com os alvos de referência para medição.

As coordenadas dos pontos medidos por ambos os sistemas de medição foram exportadas e tratadas separadamente no programa SmartFit 3D® para o ajuste dos pontos ao modelo CAD da peça. O autor utilizou o ajuste por mínimos quadrados e não considerou as tolerâncias especificadas no projeto. Como a tolerância geométrica para esse tipo de peça é usualmente tolerância de perfil de superfície ou de linha, é comum o uso de algoritmo de zona mínima ou Chebychev. Segundo LIMA (2006), houve concordância satisfatória entre as medições dos sistemas FARO e TRITOP, com um diferença média de -0,066 mm e um desvio médio relativo desprezível frente à tolerância da peça (ver figura 2.26).

Entre as dificuldades citadas na medição, o autor cita o tratamento de pontos de medição atípicos provavelmente resultantes de uma limpeza da peça deficiente e devido o procedimento separado de medição para os dois lados da pá, que necessitou gerar uma referência comum para as duas nuvens de pontos. Com respeito ao tempo de medição, LIMA (2006) afirma que a medição óptica consumiu metade do tempo da medição com o braço articulado de medição. Segundo FANTIN (1999) e LI e GU (2004), entre as vantagens dos sistemas ópticos frente às máquinas de medição por coordenadas destacam-se o volume grande de pontos medidos sobre a superfície e velocidade de aquisição que pode chegar tipicamente a 20 000 pontos por segundo.

O outro trabalho com braço articulado de medição foi realizado por PIRATELLI et al. (2009) que apresentou uma metodologia para reconstrução de modelos CAD para peças de grande porte e com geometria complexa, no caso uma turbina hidráulica tipo Kaplan com diâmetro 4,3 metros e tolerância de 4,3 mm. Foram medidas duas turbinas: uma com 30 anos de uso (denominada de K1) e outra nova a ser instalada (denominada de K2). Na figura 2.27 consta uma hélice da turbina com as linhas de referências para a medição.

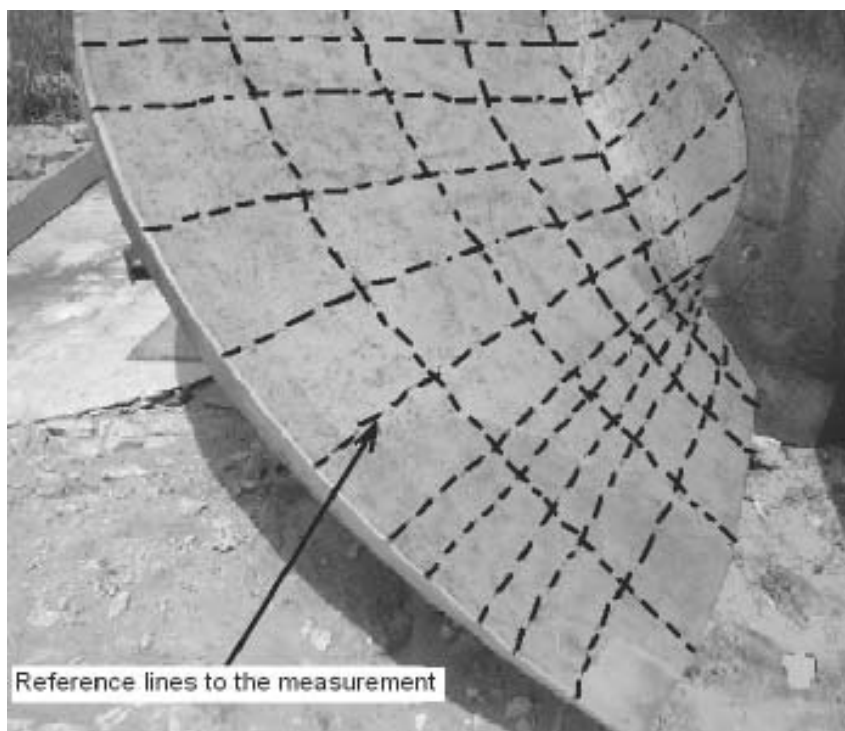


Figura 2.27 – Pá Kaplan com linhas de referências para medição.

Os autores utilizaram um braço de medição da empresa ROMER com alcance de 2,5 metros e um programa específico denominado de G-Pad® para processamento dos dados. Foram aplicadas técnicas de engenharia reversa e modelagem com NURBS (B-splines racionais não-uniformes). A análise dos erros foi feita comparando os pontos medidos com os pontos equivalentes das superfícies CAD através do programa RHINOCEROS®.

Na figura 2.28 está representada o gráfico de análise de erros de uma pá da turbina Kaplan K2.

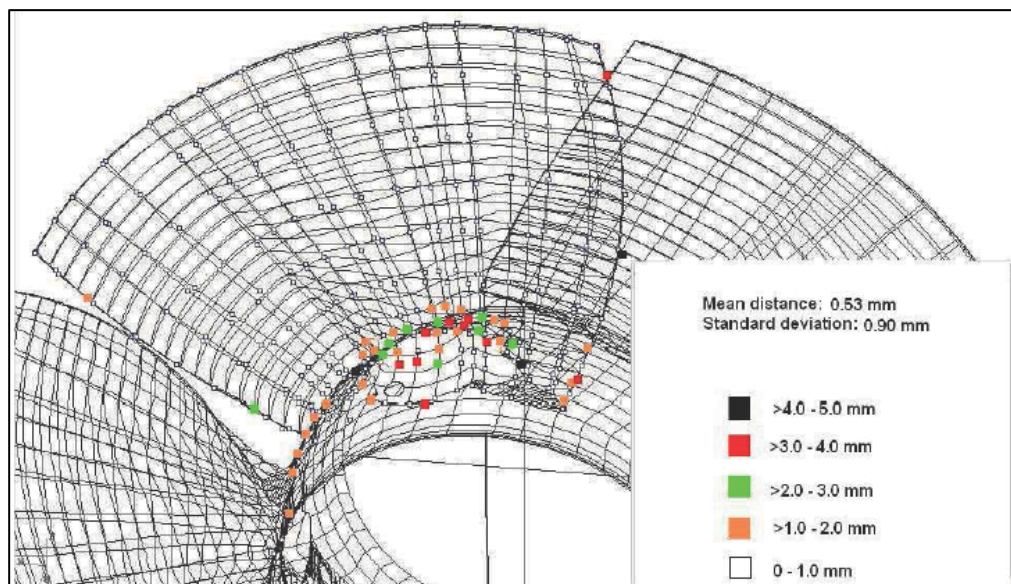


Figura 2.28 – Análise de erro do modelo CAD da Pá Kaplan K2.

Segundo PIRATELLI et al. (2009), o procedimento de medição propiciou o desenvolvimento de modelos CAD com erros de pequena magnitude (todos abaixo de 5 mm) adequados para aplicações de simulação computacional de escoamento de fluidos e análise de tensões. Da mesma forma que no trabalho de LIMA (2006), os lados da hélice foram medidos separadamente e pontos atípicos foram tratados antes do modelamento da geometria com NURBS. Também foi utilizado a algoritmo dos mínimos quadrados para minimizar os erros de ajuste das curvas que não passam exatamente sobre os pontos medidos.

CAPÍTULO III

ESPECIFICAÇÃO GEOMÉTRICA DE PRODUTOS

3.1 INTRODUÇÃO

No desenvolvimento de um produto mecânico, o principal meio de comunicação entre o projetista, fabricante e o metrologista é o desenho técnico. Nele estão contidas todas as informações relevantes para a concretização do produto como, por exemplo, sua especificação geométrica.

Entende-se como especificação geométrica a etapa do projeto onde a faixa de desvios admissíveis de um conjunto de características de uma peça é estabelecida, levando-se em conta os requisitos funcionais e normativos. Adicionalmente é definido um nível de qualidade em conformidade com o processo de fabricação, os limites admissíveis para fabricação e a definição dos critérios de avaliação de conformidade da peça (ISO 17450, 2002).

A necessidade da especificação geométrica parte do princípio de que as variações inerentes do processo de fabricação e de controle fazem com que existam diferenças entre o que é projetado e o produto real (FENG e HOPP, 1991). Do ponto de vista econômico, a convivência com o desvio entre o que é projetado e o que é fabricado é aceitável uma vez que os custos de fabricação crescem substancialmente à medida que as tolerâncias diminuem (PASIN, 2003).

Na figura 3.1 está representada a intenção do projetista expressada no desenho técnico (a) e no lado direito da figura a geometria real da peça produzida (b).

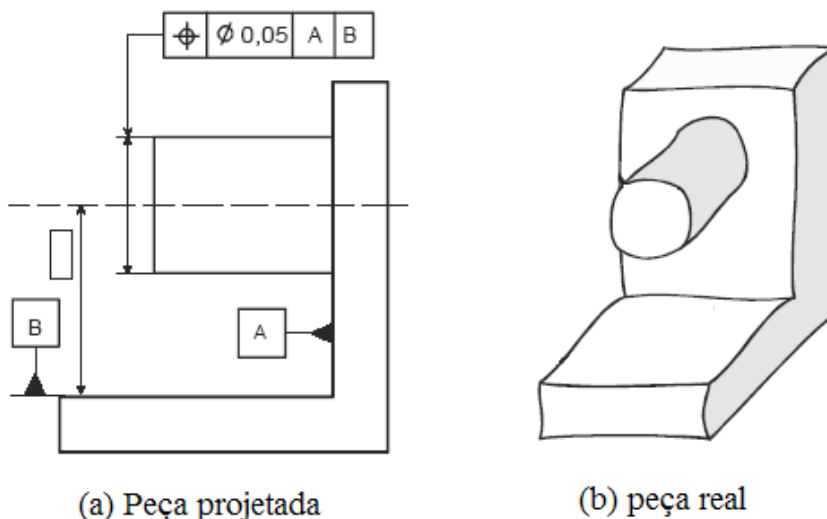


Figura 3.1 - Peça projetada (a) e peça real (b) (SCHNEIDER,2005)

Para controlar esses desvios e, portanto, garantir que os requerimentos funcionais sejam satisfeitos, os limites de variação, ou tolerâncias, devem ser especificados e representados no desenho técnico com base em normas de dimensionamento e tolerância geométrica.

Atualmente dois sistemas de normalização padronizam a sintaxe (simbologia para indicação gráfica) e a semântica (o que cada símbolo significa para interpretação do desenho) do dimensionamento e da tolerância geométrica. A linguagem do dimensionamento e da tolerância geométrica, comumente citada como GD&T (Geometric Dimensioning and Tolerancing), suportada pela ASME (American Society of Mechanical Engineers) e a linguagem da especificação geométrica de produto, citada usualmente como GPS (Geometric Product Specification), suportada pela ISO (International Organization for Standardization). Atualmente as duas linguagens têm princípios 90% a 95% similares corroborando com a tendência de harmonização dos dois sistemas de padronização.

Um exemplo da linguagem GD&T é apresentado na figura 3.2 onde constam cotas de tolerâncias dimensionais e especificação de tolerâncias geométricas de paralelismo, posição, batimento circular radial e axial, perpendicularidade e tolerância de planeza. No exemplo do desenho, consta ainda a especificação de elementos de referência denominados de A, B e C para os elementos tolerados e condição de máximo material denominado pelo símbolo M com um círculo.

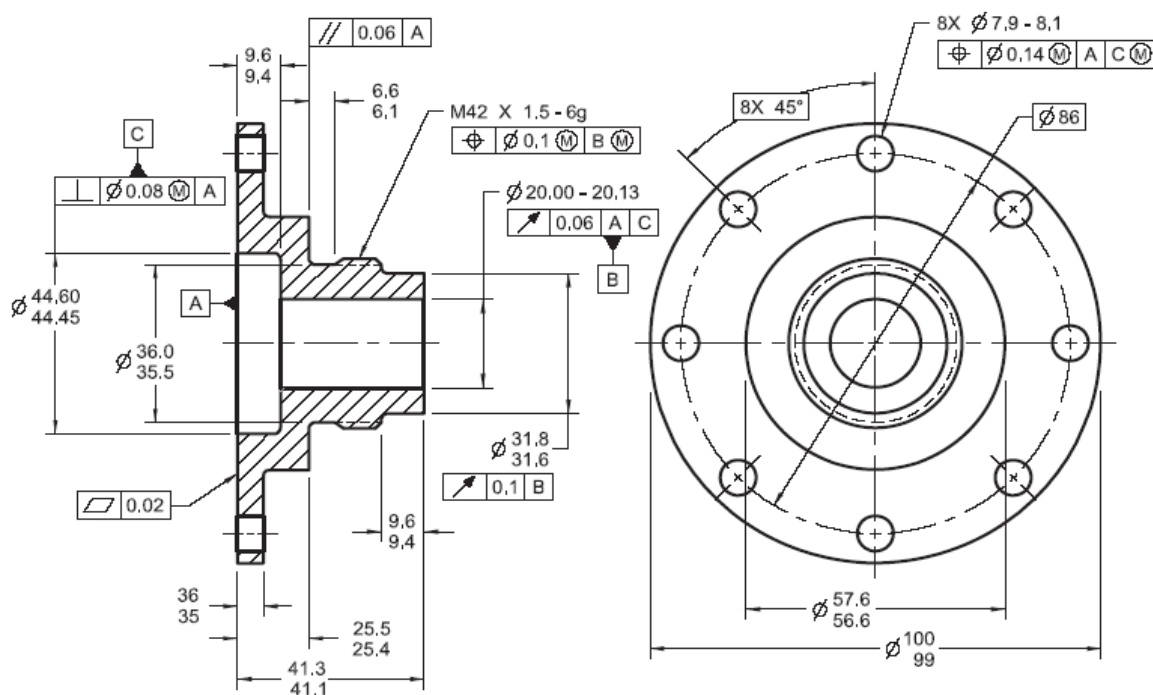


Figura 3.2 – Exemplo de desenho técnico com especificação GD&T (ASME, 2009)

Tolerância é, portanto, a quantidade total de variação permitida de uma dimensão especificada. Quando a tolerância é geométrica, as variações também incluem características de forma, posição, orientação, perfil e batimento circular (ASME, 2009).

O processo de toleranciamento é dividido classicamente em quatro atividades distintas: especificação, análise, síntese e verificação de tolerância. As três primeiras são sub-atividades do projeto de tolerância. A verificação de tolerância compreende os planos de inspeção e os procedimentos metrológicos para confirmação dos requisitos funcionais e de fabricação (KUNZMANN et al., 2005).

Em resumo, a especificação e verificação da tolerância, seja dimensional ou geométrica, são necessárias por que:

- o processo de fabricação não é perfeito;
- o processo de medição possui erros e, portanto não se consegue determinar o valor nominal com exatidão;
- sem tolerância não existem parâmetros para controle e como consequência, podem ocorrer falhas de montagem e de função da peça.

3.2 PRINCÍPIOS DE TOLERÂNCIA

Dois princípios de tolerância são usualmente classificados na literatura técnica: o princípio da tolerância tradicional ou cartesiana, limitada pela representação da forma da peça e os valores de suas dimensões com tolerância para mais e para menos (+/-) e o princípio denominado de zona de tolerância moderna ou simplesmente tolerância geométrica (FENG e HOPP, 1991, MAVROIDIS et al., 2002, KANDIKJANA et al., 2001) definida nas normas ISO/GPS e ASME/GD&T.

O filósofo e cientista René Descartes foi um dos precursores da especificação geométrica de produtos com a publicação, em 1637, do livro “Geometrie”, introduzindo o conceito de coordenadas cartesianas. Três séculos depois o engenheiro Stanley Parker, trabalhando em uma fábrica de torpedos da Marinha Britânica durante a Segunda Guerra Mundial, constatou que peças boas tinham sido rejeitadas quando da avaliação de tolerância de posição de furos com a cotação cartesiana. Stanley Parker verificou que a característica crítica na montagem era o afastamento em relação ao centro do furo e, portanto, o campo de tolerância deveria ser circular e não quadrado que limita a zona de tolerância de um valor 57% menor em relação a zona de tolerância circular.

Stanley Parker provou que a forma correta da zona de tolerância de posição de um furo deveria ser cilíndrica e não retangular, introduzindo o conceito de cotação funcional (WANDECK e SOUSA, 2008).

Na figura 3.3 está ilustrado o ganho em termos de variação possível da tolerância do furo sem que se perca a funcionalidade do produto. Verifica-se na figura que, por exemplo, o ponto “Q” não está numa condição limite como é o caso do ponto P. Entretanto, para a especificação de tolerância cartesiana, o ponto Q reprovaria a peça com respeito à tolerância de posição do furo, por exemplo. Esse foi o argumento utilizado por Parker para propor a cotação funcional.

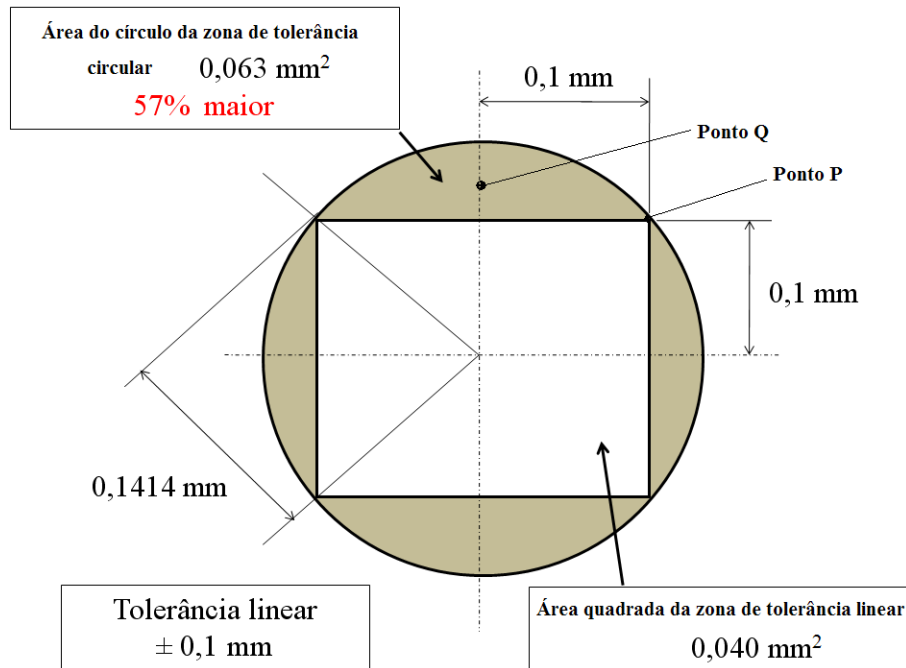


Figura 3.3 – Tolerância linear versus tolerância geométrica

Além da limitação da zona de tolerância linear, a especificação de tolerância pelo método tradicional não satisfaz totalmente as exigências e tecnologias atuais de projeto, fabricação e metrologia (ISO/TC 213, 2010, WANDECK e SOUSA, 2008). Apenas tolerâncias de tamanhos e casos simples de tolerâncias de posição são consideradas no método tradicional e por não abordar tolerâncias de forma, os requisitos de montagem e alinhamento não são possíveis de representar ou verificar. Outra limitação é a representação pobre nos desenhos face às potencialidades atuais dos sistemas CAD (FENG e HOPP, 1991).

A partir dos estudos do engenheiro Stanley Parker que constatou a limitação da cotação cartesiana deu-se início ao desenvolvimento de uma nova forma de especificação geométrica dos produtos que contemplasse as variações de forma e funcionalidade do

produto (WANDECK e SOUSA, 2008). Para especificar e expressar de forma adequada as características geométricas do produto foi necessário desenvolver uma linguagem padronizada que considerasse a simbologia para indicação gráfica e o que cada símbolo significa para interpretação do desenho técnico.

Essa linguagem associada aos desenhos tipicamente em duas dimensões foi amplamente difundida no meio industrial e ficou conhecida como GD&T (Geometrical Dimensioning and Tolerancing). O uso intenso dessa linguagem induziu o desenvolvimento de várias normas nacionais e internacionais com o objetivo de transmitir de forma clara, objetiva e uniforme as intenções do projeto.

Ao longo dos anos diversos fatores como, por exemplo, o uso intenso de computadores para auxílio aos projetos e a tecnologia para medição por coordenadas contribuíram para a fundamentação matemática do dimensionamento e especificação de tolerância. As normas atuais descritas na seção seguinte incorporaram diversos conceitos, a condição de independência, a zona de tolerância projetada, as zonas de tolerâncias compostas, referências, etc.

Nas figuras 3.4 e 3.5 consta um exemplo didático para ressaltar as diferenças entre os dois princípios de tolerância (tradicional e geométrica) e os possíveis erros de avaliação de conformidade devido à falta de referência para a inspeção (CHIABERT et al., 1998).

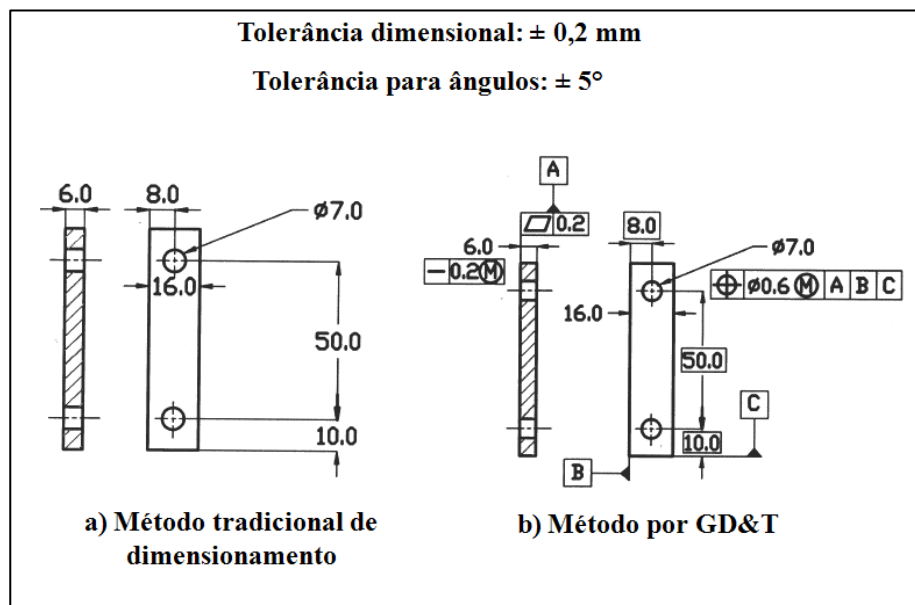


Figura 3.4 – Desenho de uma placa simples com dois furos (adaptada de CHIABERT et al., 1998).

À primeira vista, o desenho representado na figura 3.4 (a) parece fácil entender. A placa tem 6 mm de espessura com 16 mm de largura e 70 mm de comprimento. Possui dois furos simétricos com 7 mm de diâmetro. A distância entre os centros dos furos é de 50 mm. A tolerância (simétrica) permitida para as dimensões lineares é de $\pm 0,2$ mm e para as dimensões angulares $\pm 5^\circ$.

Por outro lado, analisando a figura 3.4 (b) a representação parece mais complicada e mais difícil entender (sem um conhecimento básico de GD&T ou GPS). Então porque a figura 3.4 (b) representa melhor as tolerâncias da peça em questão? A resposta está na possibilidade de uma correta e completa informação sobre a intenção do projeto, considerando os requisitos funcionais e de inspeção (ASME, 1994, ASME, 2009, CHIABERT et al., 1998).

Por exemplo, nas duas situações (a) e (b) da figura 3.4 a tolerância dimensional da espessura da placa está definida como $(6,0 \pm 0,2 \text{ mm})$. Entretanto, nada é dito sobre a variação de retitude da placa. A espessura da placa pode estar dentro dos valores de tolerância dimensional, no entanto, se possuir uma curvatura significativa pode comprometer sua montagem. Por outro lado, na figura 3.4 (b) a tolerância geométrica de retitude está claramente definida.

Com relação a localização dos furos na figura 3.4 (a), devido a acumulação de tolerância (soma linear), a máxima tolerância para o furo superior passa a ser de $\pm 0,4$ mm, ao invés de $\pm 0,2$ mm. Essa situação é desejável para o setor de fabricação, mas corre o risco das peças não se ajustarem na montagem. Considerando isso, o projetista assume desnecessariamente tolerâncias mais apertadas como prevenção para fabricação, mas que podem impactar nos custos de fabricação.

Finalmente, a falta de referência para a sequência de inspeção na figura 3.4 (a) pode levar a uma avaliação equivocada da peça com respeito aos requisitos de conformidade. Na figura 3.4 (b), a sequência de inspeção está definida pelos planos de referência A-B-C, onde a peça é apoiada em pelo menos três pontos no plano “A” e depois apoiada em pelo menos dois pontos no plano “B” e finalmente apoiada em pelo menos um ponto no plano “C”. Isto garante que os seis graus de liberdade da peça no espaço estejam devidamente fixados. Na medição por coordenadas, esse alinhamento é denominado de 3-2-1.

Na figura 3.5 consta um exemplo de diferentes resultados da inspeção devido à seqüência diferente de posicionamento (referências) da placa para a inspeção.

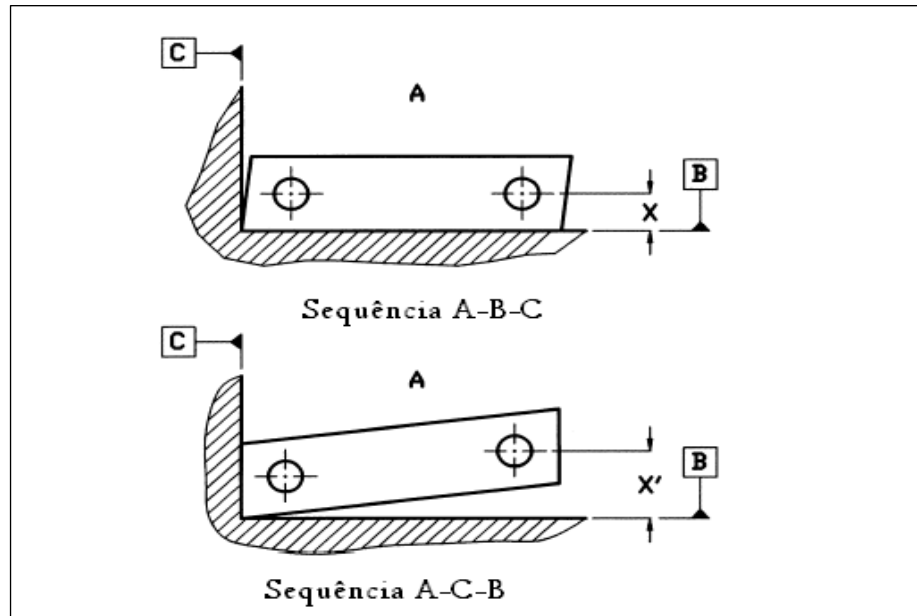


Figura 3.5 – Resultados diferentes devido a seqüência diferente de posicionamento para inspeção (adaptada de CHIABERT et al., 1998).

Hoje o projetista tem que observar uma quantidade de normas e regras técnicas relativas às tolerâncias geométricas e dimensionais, as quais são necessárias para produzir um projeto que não deve apenas ser consistente com a função da peça, mas também com as restrições de manufatura, limitações de montagem, plano de inspeção (metrologia) entre outros requisitos. Estas condições mais tarde determinam essencialmente a economia da indústria na fabricação das peças (GIGO, 1999).

A tolerância geométrica, portanto, fornece um conjunto compreensivo de símbolos e controles para especificar a geometria (forma, posição, orientação, etc.) de uma peça e garantir os requerimentos de funcionalidade, intercambiabilidade, montagem e alinhamento (CHIABERT et al., 1998). Ela é usada em conjunto com as práticas tradicionais da tolerância dimensional e permite ao projetista comunicar as características importantes da peça de uma forma clara para a fabricação e inspeção (FLACK e BEVAN, 2005).

Segundo FENG e HOPP (1991), o fundamento da tolerância geométrica está baseado em dois importantes princípios: o princípio Taylor e o princípio da independência nas normas ISO. Esses dois princípios fazem a diferença entre as duas normas internacionais de representação de tolerâncias, que serão abordadas neste capítulo.

3.3 ESTUDO DA TOLERÂNCIA

A quantidade de publicações nesta área tem sido extensa, tanto do ponto de vista de análise e síntese de tolerâncias (FLACK e BEVAN, 2005, GAO et al., 1998, MAVROIDIS et al., 2002, HANDSCHUH e BILL, 1991, DAVIDSON e SHAH, 2004, MANARVI e JUSTER, 2004) quanto da formalização de modelos matemáticos para representação de tolerâncias para CAD e sua integração com outros sistemas CAx (GOCH, 2003, PFEIFER et al., 2001, NASR e KAMRANI, 2006, ZHOU et al., 2007), até tolerância geométrica e planos de inspeção (FENG e HOPP, 1991, KANDIKJANA et al., 2001).

MAVROIDIS (2002) fez uma revisão dos métodos para análise de tolerância para montagem. Na atividade de análise de tolerância, parte-se das tolerâncias conhecidas de cada componente até a definição da tolerância total ou cumulativa na montagem do conjunto. Na sua revisão, o autor analisa criticamente os métodos: soma cumulativa, método estatístico e simulação de Monte Carlo para predizer a tolerância total.

Para o autor, o método da soma cumulativa é muito conservativo uma vez que a combinação de tolerâncias é linear. No caso da análise de tolerância por simulação de Monte Carlo, o autor afirma que a ferramenta é bastante poderosa inclusive para funções não lineares. Entretanto, segundo MAVROIDIS (2002), o método da simulação por Monte Carlos exige um esforço computacional intenso em função do grande número de amostras geradas.

Sobre os métodos para obter um modelo de representação de tolerância, o método da tolerância vetorial, segundo MAVROIDIS (2002), pode converter tolerância geométrica em tolerância paramétrica e, portanto ser facilmente integrada em sistema CAD. Outra vantagem é a boa fundamentação matemática que o método apresenta.

MAVROIDIS (2002) cita alguns dos principais programas computacionais comerciais para análise de tolerância. São eles: VSA (www.vsa-cad.de/html/), Saltire programa computacional (www.saltire.com), Cognition Coporation (www.ci.com), VALISYS (www.valisys.com/corp), e o CATIA (mscsoftware.com/products). Entretanto,

nenhum dos programas computacionais citados tem a capacidade de modelamento sólido 3D para peças complexas e análise de tolerância.

Sobre síntese e alocação de tolerâncias, MANARVI e JUSTER (2004) sistematizaram as informações disponíveis na literatura numa estrutura de um modelo de síntese de tolerância integrada com foco principal nas questões sobre fabricação, montagem, custos e qualidade. Essa estrutura, dividida em dois bancos de dados denominados de “Desenvolvimento e projeto do produto” e “Métodos e técnicas”, tem a intenção de prover fundamentos para o desenvolvimento de programa computacional de síntese de tolerância.

Os autores aplicaram essa estrutura em um estudo de caso de uma peça com geometria 2D simples, apesar de afirmarem que o método pode ser aplicado para peças complexas. Adicionalmente, MANARVI e JUSTER (2004) estudaram a aplicação da técnica de elementos finitos (FE), com programa computacional I-deas versão 8.0, para prever a influência da variação dimensional sobre distorção de peças complexas e projetos de montagem. Foram feitos estudos de casos com peças automotivas.

NASR e KAMRANI (2006) abordaram o problema da integração entre os sistemas CAD e CAM. Para os autores, o principal problema na integração de sistemas CAD/CAM é a indisponibilidade do arquivo de CAD para aplicações posteriores. Esses arquivos possuem informações detalhadas da geometria das peças. Os autores apresentaram uma nova metodologia de reconhecimento inteligente e extração de características geométricas de fabricação para sistema CAD denominada de IFRM (Intelligent Feature Recognition Methodology). O programa é aplicável para peças prismáticas e utiliza o formato de arquivo neutro IGES (Initial Graphics Exchange Specification) como entrada e um algoritmo de reconhecimento de características geométricas. A principal vantagem sobre os outros métodos propostos por outros pesquisadores é, segundo NASR e KAMRANI (2006), a aplicação em qualquer sistema CAD e em um ambiente de modelamento sólido 3D.

ZHOU et al.(2007) apresentaram um modelo de integração entre CAD e CAPP implementado sobre um programa computacional comercial para CAD, o UGS/SolidEdge. Para os autores, a ponte de ligação entre CAD e outros sistemas para aplicações posteriores é a característica geométrica (feature). Outra constatação dos autores é a pouca importância dada pelos programas computacionais comerciais para informações técnicas

como, tolerância geométrica, rugosidade, dureza, etc. Essas informações são fundamentais para o planejamento do processo.

DAVIDSON e SHAH (2004) apresentaram um estudo sobre o desenvolvimento de um protótipo programa computacional denominado de T-Map® para análise de tolerância 3D. Segundo os autores, o modelo proposto satisfaz completamente a norma ASME Y14.5, o que não ocorre com outros programas computacionais comerciais baseados em tolerância cumulativa e estatística. O fundamento do método é a criação de pontos hipotéticos no espaço obedecendo a uma relação linear e, portanto, formando uma zona de tolerância para controle das variações. A interrelação de todas as estruturas de referência da peça ou para montagem é baseada no conceito de graus de liberdade. Apesar do método abordar geometria 3D, ele não contempla tolerância de perfil para superfícies com formas livres.

O protótipo de DAVIDSON e SHAH,(2004) foi desenvolvido em C++ com os seguintes módulos: definição da peça (CAD paramétrico), definição de montagem, dimensionamento, tolerância “Default”, especificação de tolerância e cadeia de tolerância.

KANDIKJANA et al. (2001) propuseram um modelo computacional, através de relacionamento gráfico, para validação de esquemas de tolerância e dimensionamento em sistemas CAD. O modelo proposto é, segundo os autores, compatível com as práticas de projeto e as normas ISO e ASME. O modelo é baseado no conceito de DRF (Datum Reference Frame) que é a composição de três planos de referência para o controle da tolerância geométrica e fundamental para a inspeção. As tolerâncias relacionadas com DRF, e que, portanto, necessitam de referência são: posição, orientação, batimento e algumas vezes perfil. Tolerância de forma não necessita de elemento de referência.

FENG e HOPP (1991) fizeram uma revisão sobre as teorias de dimensionamento e tolerância e os algoritmos de análise de dados de inspeção. Segundo os autores, falta fundamentação matemática nos modelos de representação de tolerância para que seja possível incorporá-los nos sistemas CAD e em outros programas computacionais, como os de inspeção, por exemplo.

Também existem diversos trabalhos abordando algoritmos de inspeção de dados e suas relações com sistema CAD e tolerância geométrica. Atualmente essa relação é ainda mais forte por conta das modernas tecnologias de medição por coordenadas, modelamento sólido e as normas revisadas ISO e ASME.

Considerações sobre alguns trabalhos publicados nessa área constam no capítulo IV, no item sobre tecnologia de medição por coordenadas.

Com respeito à especificação de tolerância conforme os conceitos da norma ISO 1101(2004), ANSELMETTI e LOUATI (2005) propuseram uma metodologia iterativa para especificação de tolerâncias de fabricação conforme a linguagem ISO. Segundo os autores, as mudanças na norma ISO1101 impactam sobre as técnicas metrológicas, que devem se adaptar as novas especificações de tolerância dimensional e geométrica para as peças fabricadas.

Para ANSELMETTI e LOUATI (2005), a demanda atual é por ferramentas que auxiliem na geração de especificação de fabricação com base em requerimentos funcionais e normalização. Três atividades usualmente compõem a atividade de especificação:

- a) predição das variações geométricas da peça acabada, de acordo com os processos de fabricação e limites de erros;
- b) especificação geométrica da peça nas diversas fases de fabricação de acordo com a linguagem ISO/GPS;
- c) ajuste das dimensões nominais e otimização das tolerâncias de fabricação, considerando a capacidade do processo de fabricação e redução de custos.

A proposta dos autores foca no segundo item e considera a representação vetorial da zona de tolerância, representação gráfica das características das peças e plano de processo e definição de planos de referência para fabricação e medição denominado de DRF (Datum Reference Frame).

Com respeito a especificação de tolerâncias para engrenagens, a constatação é que existem poucos trabalhos publicados na área. Quando se deseja avaliar o impacto da tolerância sobre a qualidade da engrenagem, os projetistas simulam as influências da tolerância com respeito aos requisitos funcionais. Para isso utilizam as tabelas das normas pertinentes, que não consideram todas as tolerâncias e focam tipicamente no erro do passo e desalinhamento (DANTAN et al., 2007).

DANTAN et al. (2007) propuseram um modelo de tolerância para engrenagem cônica de dentes retos que considera as seguintes características: contempla as etapas do projeto de tolerância (especificação, análise, síntese ou alocação e verificação), satisfaz as práticas de projeto, pode ser integrado aos sistemas de projeto, fabricação e metrologia auxiliados por computador, pode ser controlado por máquina de medir por coordenadas e suporta análise de tolerância de forma automática. O trabalho focou na especificação e

verificação de tolerância para os desvios de flanco, passo e batimento radial. Para representação das tolerâncias, os autores utilizaram o modelo de linguagem denominada de “GeoSpelling”, que foi proposto para ISO como forma de padronizar a representação de tolerância. O modelo é usado para descrever superfícies ideais e não ideais (superfície real ou “model skin”). Segundo DANTAN et al.(2007), deve haver uma metodologia uniforme e não ambígua para especificação da tolerância geométrica de modo que não ocorra interpretação diferente entre a área de projeto, fabricação e metrologia. Segundo GOCH (2003), os esquemas de representação de tolerâncias para engrenagens não estão focados nos requisitos funcionais, mas nas práticas de controle metrológico.

3.4 NORMALIZAÇÃO PARA TOLERÂNCIA

Os primeiros esboços aplicados à engenharia nos remetem ao século XVIII com o uso da geometria descritiva. No século XX, especificamente nos anos de 1930 e 1990, surgiram os esboços de normas relativas à tolerância e o modelamento por característica (feature) para montagem, respectivamente. Na tabela 3.1 consta um resumo desse histórico.

Tabela 3.1 – Breve história da tolerância versus metrologia (VOELCKER, 1998)

ESPECIFICAÇÃO DE FORMA		SIMBÓLICA		MEDIÇÃO E CONTROLE DAS VARIAÇÕES	
1930	Primeiros projetos de normas			1940	Tolerâncias geométricas
1950	Máquinas de comando numérico			1950	Princípio da independência
1960	Desenho auxiliado por computador			1960	Tolerâncias estatísticas
1970	Wireframe CAD (Computer-Aided Design)			1970	Máquinas de medir por coordenadas
1980	Modelamento sólido: IGES (Initial Graphics Exchange Specification)			1980	Crise na metrologia (erros em algoritmos de ajustes e falta de padronização)
1990	Modelamento por “Feature”: STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data)			1990	Fundamentação matemática dos princípios de tolerâncias
2000	Normas ASME e ISO sobre GD&T			2000	Metrologia computacional

Atualmente os setores de projeto, fabricação e metrologia utilizam tecnologias digitais, como os sistemas CAD 3D e CAM e a tecnologia de medição por coordenadas. Esses avanços induziram a evolução das normas relativas à especificação e representação de tolerâncias dimensionais e geométricas com um formalismo matemático mais consistente.

Existem atualmente dois sistemas de normalização bastante difundidos nas empresas para padronização da linguagem do dimensionamento e da tolerância geométrica. A linguagem denominada de dimensionamento e tolerância geométrica ou GD&T (Geometric Dimensioning and Tolerancing) descrita nas normas ASME Y14.5 (2009) e ASME Y14.5.1M (1994), publicadas pela ASME (American Society of Mechanical Engineers) e a linguagem denominada de especificação geométrica de produto ou GPS (Geometric Product Specification), descrita em um conjunto de normas denominado genericamente “Sistema GPS“, relacionadas na ISO/TR 14638 (1995). Dentre as normas GPS, se destacam a ISO 1101 (2004) e a ISO 17450 (2002) que tratam de tolerância geométrica.

Historicamente os dois sistemas trilharam caminhos diferentes. A linguagem GD&T nasceu do princípio de Taylor em 1905, enquanto a linguagem GPS surgiu por volta de 1920 com princípio da independência entre dimensão e forma. Um breve histórico é apresentado na tabela 3.2. (CONCHERI et al., 2001)

Tabela 3.2 – Desenvolvimento histórico dos sistemas GD&T e GPS

GD&T		GPS	
1905	Regra 1# - Conceito de Taylor Princípio do Envelope	1920	Normas nacionais sobre limites e ajustes (exemplo UNIM 24)
1939 1945	MIL – STD 8A Form - positioning concepts	1940	ISA System on limits and fits
1966	USASI Y 14.5M (Primeira norma unificada para tolerância e dimensionamento)	1962	ISO/R 286 “limits and fits”
		1969	ISO/ R 1101/I Form - positioning concepts
1994	ASME Y 14.5 M Dimensioning and Tolerancing	1995	ISO/TR 14638 Geometrical Product Specifications (GPS) - Masterplan
2009	ASME Y 14.5 Dimensioning and Tolerancing	2004	ISO 1101 Geometrical tolerancing - form, orientation, location and run-out

3.4.1 A Linguagem GD&T versus GPS

Atualmente as duas linguagens têm princípios 90% a 95% similares corroborando com a tendência de harmonização dos dois sistemas de normalização ASME e ISO. Entretanto, ainda persistem algumas diferenças em aspectos fundamentais que podem levar a uma interpretação equivocada dos desenhos técnicos e procedimentos de medição (WANDECK e SOUSA, 2008, PASIN, 2003).

A filosofia da linguagem ASME/GD&T pode ser resumida pelo princípio do envelope (ou princípio de Taylor), que estabelece uma correlação (dependência) entre a variação de forma e dimensão (KRULIKOWSKI, 1999, WANDECK e SOUSA, 2008). Pela regra #1 da ASME Y14.5 (2009), quando somente a tolerância dimensional é especificada, os limites de tolerância de uma característica individual prescrevem o limite dentro do qual as variações da sua forma geométrica e de sua dimensão são permitidas. Esta regra tem uma relação direta com o limite de forma perfeita na condição de máximo material. Uma forma geométrica perfeita pressupõe que as características planeza, retitude, circularidade e cilindridade são perfeitas. A condição de máximo material é o limite no qual a peça (furo ou eixo) possui o máximo volume de material, dentro do seu limite de tolerância especificado. Na prática, é a condição na qual a peça apresenta o maior peso, e corresponde à condição mais crítica de montagem.

Por outro lado, a linguagem ISO/GPS, através da norma ISO1101 (2004), tem como filosofia o princípio da independência onde cada requisito dimensional ou geométrico especificado no desenho técnico da peça deve ser controlado individualmente, a não ser que alguma relação entre eles seja especificada. Na prática, isso significa que cada tolerância será verificada separadamente.

Segundo WANDECK e SOUSA (2008), o princípio da independência pode ser aplicado em todas as dimensões lineares (e suas tolerâncias), dimensões angulares (e suas tolerâncias) e tolerâncias geométricas. Cada dimensão linear é verificada com um instrumento de dois contatos. Não existe limite para os desvios de forma ou posição.

Na figura 3.6 consta a ilustração dos dois princípios de cotagem. No exemplo da figura 3.6 (a) há apenas a especificação de tolerância dimensional e pelo princípio da independência (norma ISO 1101/2004), o controle será feito nas seções de interesse com um instrumento de medição de dois contatos como, por exemplo, um micrômetro externo.

Aplicando o princípio de Taylor (norma ASME Y14.5), define-se um envelope na condição de máximo material (diâmetro máximo) que controla a dimensão e a forma do eixo (figura 3.6b). Portanto, para a ASME o princípio do envelope é automático. No caso da ISO é opcional. Logo, quando se deseja controlar tolerância geométrica pela ISO deve-se especificá-la no desenho técnico.

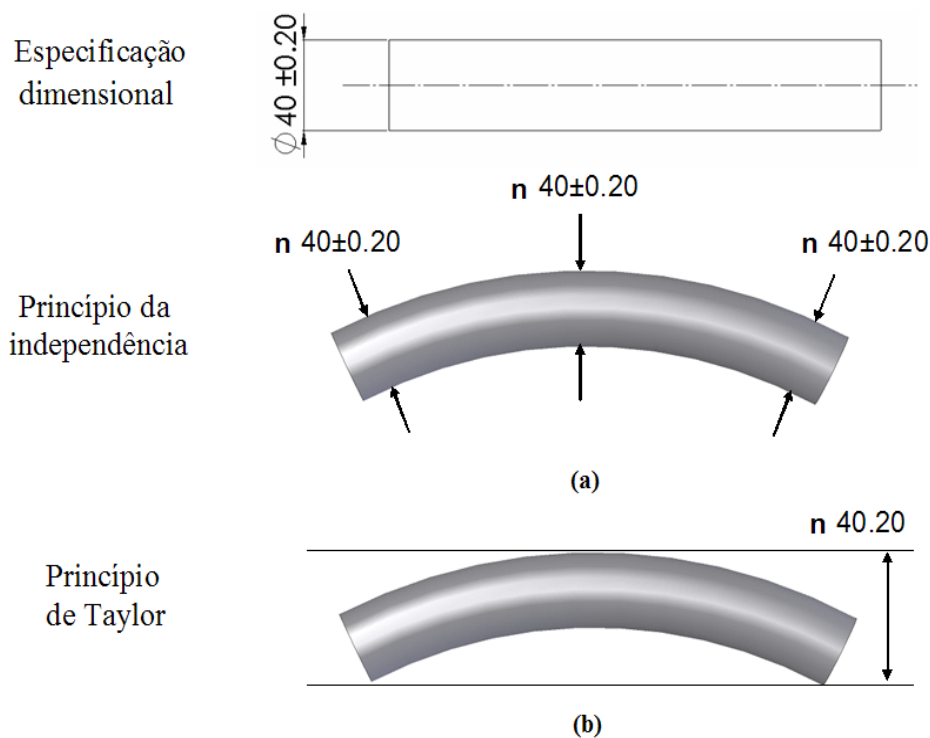


Figura 3.6 - Interpretação dos princípios de Independência e de Taylor (WANDECK e SOUSA, 2008)

Verifica-se no caso da avaliação pelo princípio da independência que não há controle da forma do eixo. Portanto, mesmo que o eixo esteja torto, este será aceito se os seus diâmetros estiverem dentro da tolerância dimensional.

Considerando que nem sempre é possível aplicar o princípio da independência ou do envelope para todos os casos, ambos os sistemas de normalização permitem exceção. No caso da norma ASME Y14.5.(2009), abre-se a possibilidade de uso do princípio da independência desde que venha indicado no desenho o termo “Forma perfeita não

requerida na condição de máximo material” (na norma em inglês, “Perfect Form Not Required at Maximum Material Condition”). A forma geométrica perfeita pressupõe que as características planeza, retitude, circularidade e cilindridade são perfeitas. Enquanto que a condição de máximo material significa que a característica de tamanho contém a porção máxima de material dentro dos limites estabelecidos.

No caso da ISO abre-se a possibilidade de ser aplicado o princípio de Taylor, através do recurso de envelope que deverá conter o símbolo E . Assim, a definição que é automática na norma ASME é opcional na norma ISO.

Na tabela 3.3 consta um resumo das principais diferenças entre os sistemas de normalização no domínio da especificação geométrica de produtos.

Tabela 3.3 – Diferenças fundamentais entre GD&T e GPS (CONCHERI *et al.*, 2001)

ASME 14.5 (GD&T)	NORMA ISO/GPS
Condição de Máximo Material (método do envelope)	Princípio da independência (método dos mínimos quadrados total)
Características associadas ou não com dimensão	Características associadas com várias geometrias
Macro-geometria Foco nas características finais do produto considerando a funcionalidade e verificação dimensional.	Macro e micro-geometria Foco em todo o processo: função, fabricação e verificação.
Aspectos metrológicos não são considerados	Aspectos metrológicos considerados, inclusive a incerteza da medição.

A normalização brasileira nesse domínio está restrita à norma NBR 6409 (1997) que estabelece os princípios gerais para indicação das tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento e a NBR ISO 10209-2 de 1993 que trata dos termos relativos aos métodos de projeção, com foco na documentação técnica de produtos. A norma 6409 segue o princípio da independência, pois está baseada na ISO 1101 de 1983, e, portanto, está desatualizada.

A linguagem simbólica é semelhante nos sistemas GD&T e GPS. Na tabela 3.4 são apresentados os símbolos agrupados em cinco categorias.

Tabela 3.4 – Símbolos de características geométricas (adaptado NBR 6409, 1997)

CATEGORIA	CARACTERÍSTICA	SÍMBOLO	USO DE REFERÊNCIA
FORMA	Retitude		NÃO
	Planeza		NÃO
	Circularidade		NÃO
	Cilindricidade		NÃO
PERFIL	Perfil de uma linha		SIM OU NÃO
	Perfil de uma superfície		SIM OU NÃO
ORIENTAÇÃO	Paralelismo		SIM
	Perpendicularidade		SIM
	Angularidade		SIM
LOCALIZAÇÃO	Posição		SIM OU NÃO
	Concentricidade		SIM
	Simetria		SIM
BATIMENTO	Batimento circular		SIM
	Batimento total		SIM

As duas linguagens de padronização são aceitas internacionalmente, podendo ser um contrato entre fornecedor e cliente. Um caso usual onde o desenho técnico é parte importante de um contrato ocorre nas relações entre montadoras automotivas e seus fornecedores; onde ambos normalmente possuem um sistema de garantia da qualidade

baseado na norma TS 16949 (antiga QS 9000), que é uma norma elaborada pela indústria automotiva (CONCHERI et al., 2001).

As duas linguagens ISO e GD&T possuem modernos recursos de cotação e expressão das tolerâncias geométricas com um nível de formalismo matemático que contribui para aplicação dentro da manufatura digital, integrando os conceitos e aplicação nos programas computacionais de auxílio ao projeto e à tolerância.

Com respeito a expressão de tolerâncias geométricas em modelos em três dimensões (3D), a ASME publicou em 2003 a norma ASME Y14.41 – definição de produtos digitais publicada e a ISO em 2006 publicou, baseado na ASME, a sua norma ISO 16792 dentro do comitê que trata de documentação técnica de produto (TPD).

Na figura 3.7 consta um exemplo de aplicação da tolerância geométrica para modelos em três dimensões. Na figura, a tolerância de perfil de superfície é aplicada unilateralmente (símbolo U) com valor de 0,3 mm, que deverá ser controlada para os três planos de referências (datum) denominados de A, B e C.

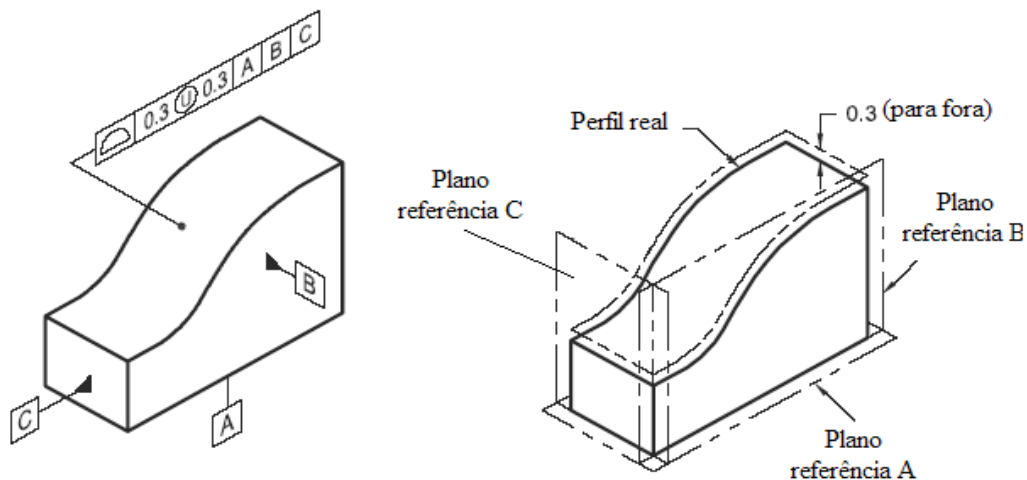


Figura 3.7 – Tolerância de perfil de superfície para modelo 3D (ASME Y14.5, 2009)

Outra característica da norma ASME Y14.5 (2009) é que a mesma não aborda requisitos de instrumentos de medição, rastreabilidade e aspectos de fabricação.

3.4.2 Nova geração de normas ISO/GPS

O Comitê Técnico ISO/TC 213 da ISO foi criado em 1996 com os objetivos de harmonizar internacionalmente uma linguagem para especificação geométrica de produtos (GPS); integrar os diversos Comitês de normalização nesse domínio e prover uma fundamentação matemática dos conceitos GPS, para integrá-los nos sistemas computacionais CAx (CAD, CAE, CAM, CAT, CAPP, CAI, etc.). A harmonização dos Comitês ISO/TC 3, 10 e 57 resultou na publicação do relatório técnico ISO/TR 14638 (1995), conhecido como Plano Mestre (Master Plan). A base para essa nova geração de normas resume-se na transmissão, sem ambigüidade, das características da peça ao longo dos setores de projeto, fabricação e de metrologia. Um exemplo de uma norma com essa filosofia é a ISO 14253-1(1998), que trata de regras para avaliação de conformidade frente às tolerâncias especificadas e a incerteza avaliada do processo de medição. Na tabela 3.5, os links relacionados com metrologia (4, 5 e 6) de todas as normas gerais da matriz GPS são influenciados pela ISO 14253-1.

Tabela 3.5 – Exemplo do relacionamento de normas na matriz GPS (adaptado de CONCHERI et al., 2001).

No. do link na Cadeia	PROJETO			VERIFICAÇÃO	MEDIÇÃO	RASTREABILIDADE
	1	2	3	4	5	6
Característica geométrica do elemento	Indicação da documentação do produto - Codificação	Definição das tolerâncias – Valores e definições teóricas	Definições do elemento real – Características ou parâmetros	Avaliação dos desvios da peça – Comparação com os limites especificados	Requisitos para os equipamentos de medição	Requisitos de calibração – Padrões de medição
Tamanho	129; 286-1	286-2; 286-2	286-1; 1938	1938	10360-X	3650
Distância	129; 406				10360-X	
.....						

Para a atividade de Fabricação

Matriz de normas GPS complementares

O conceito de cadeia de normas é aplicado nas diferentes etapas do ciclo de desenvolvimento do produto. Na tabela 3.6 consta a estrutura da matriz GPS. Essa matriz é

dividida em quatro grupos de normas: as normas fundamentais; as normas globais; as normas gerais e as normas complementares. O maior número de normas está no grupo das normas gerais, onde pra cada uma das dezoito cadeias, existem seis links relacionando a representação no desenho até a atividade de verificação (metrologia).

Tabela 3.6 - Modelo geral da matriz de normas GPS (adaptado ISO 14253-1,1998)

NORMAS FUNDAMENTAIS (a norma ISO 14638 e a ISO 8015)	NORMAS GLOBAIS							
	Possuem conteúdo que influenciam toda ou parte das normas gerais e complementares.							
	NORMAS GERAIS							
	Este grupo congrega o maior conjunto de normas para GPS onde são definidas as regras de indicação de desenho, princípios de tolerância e verificação para diferentes características geométricas.							
	GPS – Características geométricas		1	2	3	4	5	6
	1	Tamanho	Documentação técnica do produto – representação	Definições de tolerâncias – definições teóricas e valores	Definições das características reais (feature não ideal)	Avaliação dos desvios peças – comparação com os limites de tolerância	Requisitos para os equipamentos de medição	Requisitos de calibração – Normas de calibração
	2	Distância						
	3	Raio						
	4	Ângulo						
	5	Forma de uma linha independente de referência						
	6	Forma de uma linha dependente de referência						
	7	Forma de uma superfície independente de referência						
	8	Forma de uma superfície dependente de referência						
	9	Orientação						
	10	Posição						
	11	Batimento circular						
	12	Batimento total						
	13	Referências (Datums)						
	14	Perfil de rugosidade						
	15	Perfil de onda						
	16	Perfil primário						
	17	Defeitos em superfícies						
18	Arestas							
NORMAS COMPLEMENTARES								
Este grupo contém regras complementares para especificação nos desenhos e verificação de cotas e tolerâncias de processos de fabricação (usinagem, soldagem, fundição etc.) e categorias de elementos específicos, como engrenagens, rosas, cones etc.								

3.5 TOLERÂNCIA DE PERFIL

Como citado no primeiro capítulo deste trabalho, a especificação geométrica de produtos com geometria complexa e superfícies com formas livres está fundamentalmente relacionada com as tolerâncias de perfil de linha e superfície, com ou sem relação a referências definidas. A tendência de aplicação desse tipo de tolerância geométrica deve crescer com a disseminação do uso de geometrias complexas nos produtos industrializados e pela versatilidade desse tipo de tolerância que pode controlar a variação de dimensão, localização, orientação e forma de um elemento geométrico.

Segundo PASIN (2003), a tolerância de perfil de superfície é largamente utilizada na indústria da aviação. O mesmo ocorre na indústria automotiva, para controlar, por exemplo, o perfil de carroceria de caminhões. Em seu trabalho, PASIN (2003) citou alguns aspectos importantes na relação especificação de tolerância e metrologia que precisam ser melhorados. Entre eles se destacam: uma maior capacitação em GD&T/GPS para as pessoas da metrologia e projeto e necessidade de máquina de medir por coordenadas dotadas de programa computacional para medição de superfícies livres e comparação com modelo 3D.

Existem dois tipos de tolerância de perfil: de linha e de superfície. A primeira é restrita a linha e refino da tolerância de perfil de superfície. No caso da tolerância de perfil de superfície, esta pode ser aplicada para controlar superfície sem forma definida (free form), contornos e superfícies coplanares (PASIN, 2003).

De acordo com a norma ISO 1101 (2004), que trata de tolerâncias geométricas, as tolerâncias de perfil podem ser usadas para controle em três situações distintas: somente para forma (sem referência definida), para orientação (incluindo forma) e para localização (incluindo forma e orientação). Rigorosamente, todas as tolerâncias aplicadas em planos e linhas são casos particulares da tolerância de perfil de superfície (SOUSA, 2010).

3.5.1 Tolerância de perfil de linha

A zona de tolerância de um perfil de linha é uma região limitada por duas linhas envolvendo círculos de diâmetro “t” (valor da tolerância) cujos centros estão localizados em uma linha tendo a forma geométrica teórica exata. Se a tolerância não possui referência especificada (datum) o controle é somente da forma da linha. O perfil de linha pode ser

aplicado para peças com secção transversal constante ou secção transversal variável como, por exemplo, um perfil de asa de um avião.

Nas figuras 3.8 e 3.9 constam exemplos de zona tolerância de perfil de linha sem referência e com referência definida, respectivamente. Em cada secção, paralela ao plano de projecção no qual a indicação é apresentada, a linha do perfil extraída (medida na peça) deve situar-se entre duas linhas eqüidistantes envolvendo círculos de diâmetro de 0,1 mm cujos centros estão localizados em uma linha com forma geométrica teoricamente exata (perfil “verdadeiro”). No caso da figura 3.8, como não foi especificada referência, a zona de tolerância controla apenas a forma da linha.

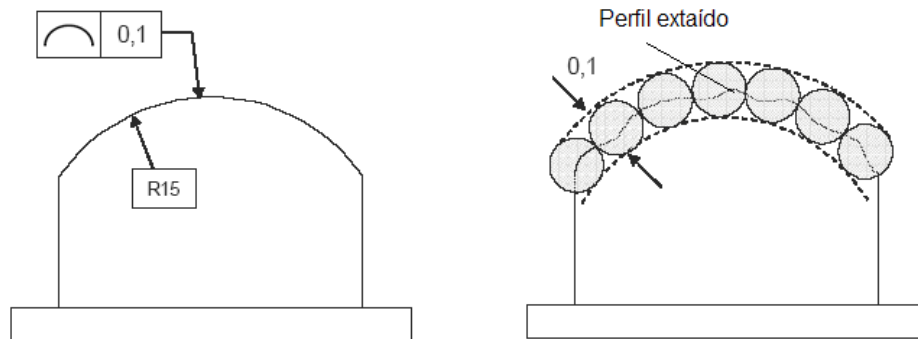


Figura 3.8 – Zona de tolerância de perfil de linha sem referência (datum) (SOUSA, 2010).

No caso da figura 3.9 onde foi especificada no quadro de controle uma referência (datum), a zona de tolerância controla a forma e a posição da linha com relação ao plano de referência A.

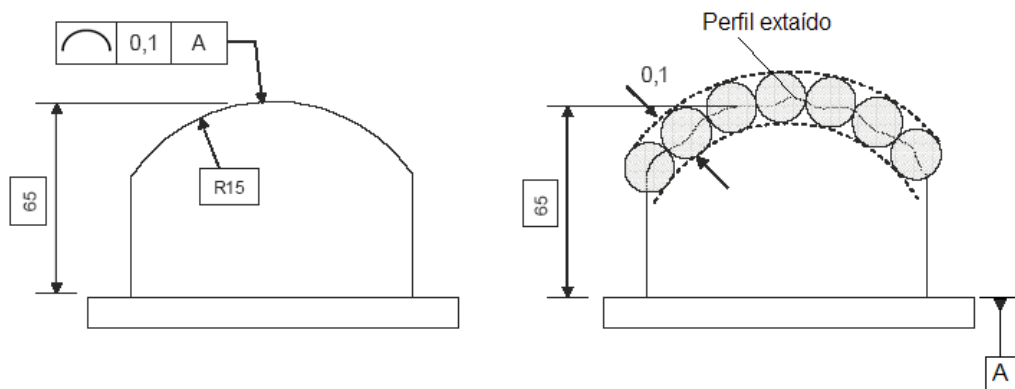


Figura 3.9 – Zona de tolerância de perfil de linha com referência (SOUSA, 2010).

3.5.2 Tolerância de perfil de superfície

A zona de tolerância de um perfil de superfície é uma região limitada por duas superfícies idênticas envolvendo esferas de diâmetro “t” (valor da tolerância) cujos centros estão localizados em uma superfície tendo a forma geométrica teórica exata. Se a tolerância não possui referência especificada (datum) o controle é somente da forma da superfície. A tolerância de perfil de superfície quando definidas as referências controla forma, orientação e posição.

Nas figuras 3.10 e 3.11 constam exemplos de zona tolerância de perfil de superfície sem referência e com referência definida, respectivamente. Em cada secção, paralela ao plano de projeção no qual a indicação é apresentada, a superfície do perfil extraída (medida na peça) deve situar-se entre duas superfícies equidistantes envolvendo esferas de diâmetro de 0,02 mm cujos centros estão localizados em uma superfície com forma geométrica teoricamente exata (perfil “verdadeiro”). No caso da figura 3.10, como não foi especificada referência, a zona de tolerância controla apenas a forma da superfície.

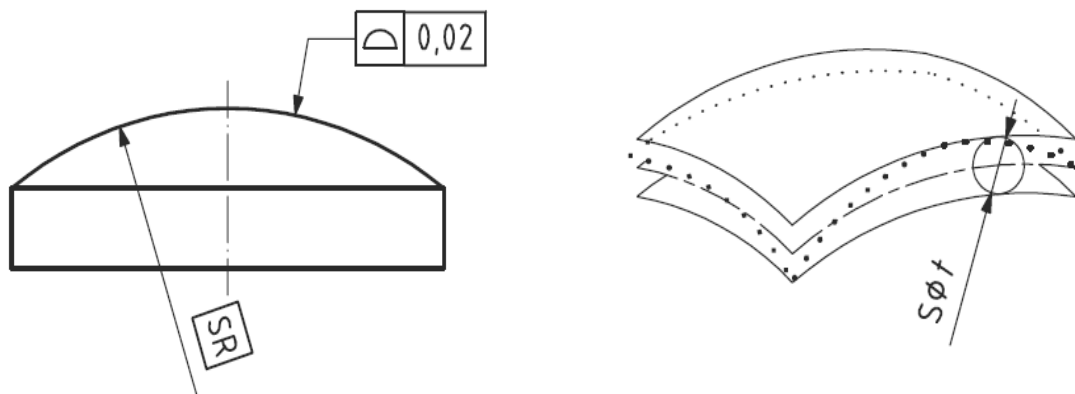


Figura 3.10 – Zona de tolerância de perfil de superfície sem referência (ISO 1101, 2004)

No caso da figura 3.11 onde foi especificada no quadro de controle uma referência (datum), a zona de tolerância controla a forma e a posição da superfície com relação ao plano de referência A.

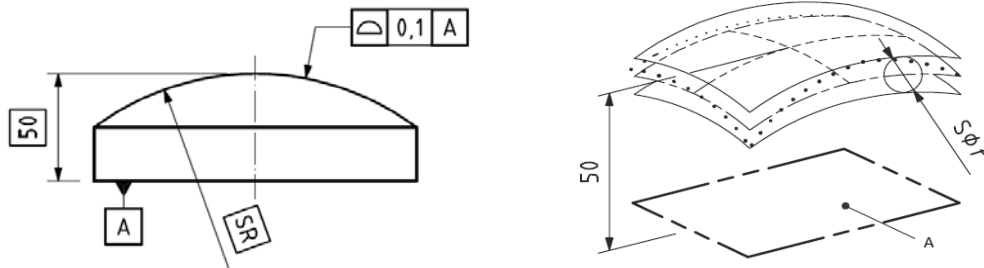


Figura 3.11 – Zona de tolerância de perfil de superfície com referência (ISO 1101, 2004)

3.5.3 Controle geométrico das tolerâncias de perfil

O controle de tolerância geométrica de perfil de linha e de superfície é tradicionalmente realizado através de instrumentos convencionais tais como relógios comparadores, traçadores de altura, gabaritos e calibres. De uma forma geral, esses meios de medição não são práticos para o controle de superfícies e contornos com forma livre que não seguem uma geometria matematicamente definida. Na figura 3.12 consta a aplicação de dois comparadores para o controle da tolerância de perfil de superfície com plano de referência definido (plano de medição). A distância entre o plano de medição e o plano auxiliar e a distância entre o plano de medição e a tolerância de superfície são controlados pela comparação dos pontos de medição obtidos com os valores que definem a superfície nominal e com os desvios de posição permitidos da posição teoricamente exata.

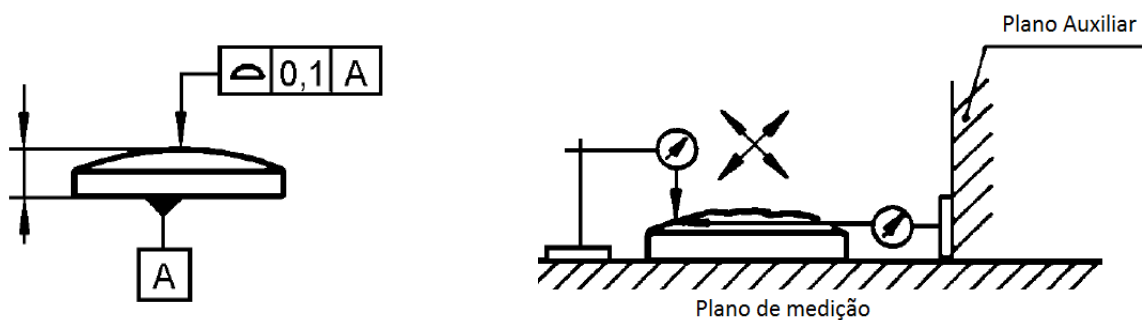


Figura 3.12 – Controle de tolerância de perfil de superfície com comparadores

O projetor de perfil dotado de retículo óptico no formato da linha pode ser uma opção para o controle de tolerância de perfil de linha. Um dos cuidados nesse processo de medição é a possibilidade de formação de sombras do perfil projetado que pode prejudicar a correta avaliação do perfil. Outra limitação é que peças transparentes não podem ser projetadas por esse método. Na figura 3.13 consta um exemplo de aplicação com projetor de perfil (ISO/TR 5460, 1985).

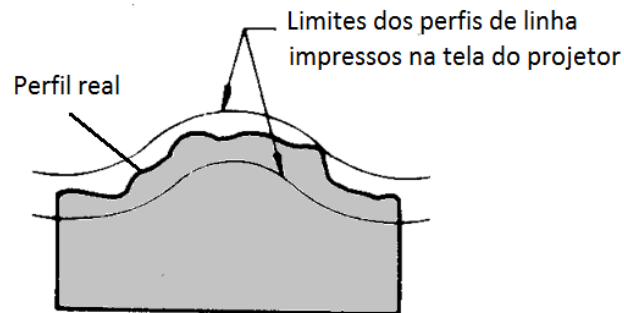


Figura 3.13 – Controle de tolerância de perfil de linha com projetor de perfil

Os calibres funcionais representam outra opção para o controle de tolerância de perfil de superfície quando aplicada a um elemento com dimensão denominada na linguagem do GD&T de FOS (Feature of Size). São exemplos de FOS: esferas, prismas, furos, pinos e rasgos. Nas figuras 3.14 a e 3.14 b constam respectivamente a especificação de controle de tolerância de perfil de superfície para um tubo e a forma de controle através de calibre funcional. Essa especificação de tolerância é válida para a norma ISO 1101 (2004).

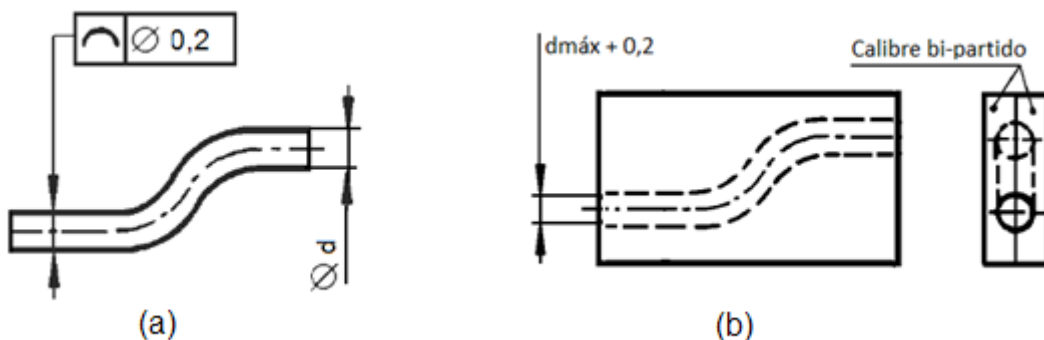


Figura 3.14 – Controle de tolerância de perfil com calibre funcional

Na figura 3.15 consta um exemplo de controle de tolerância de perfil de superfície de tubos onde o calibre funcional é usado para representar a contra-peça e, portanto realizar o controle da tolerância de uma forma mais realista com a montagem.

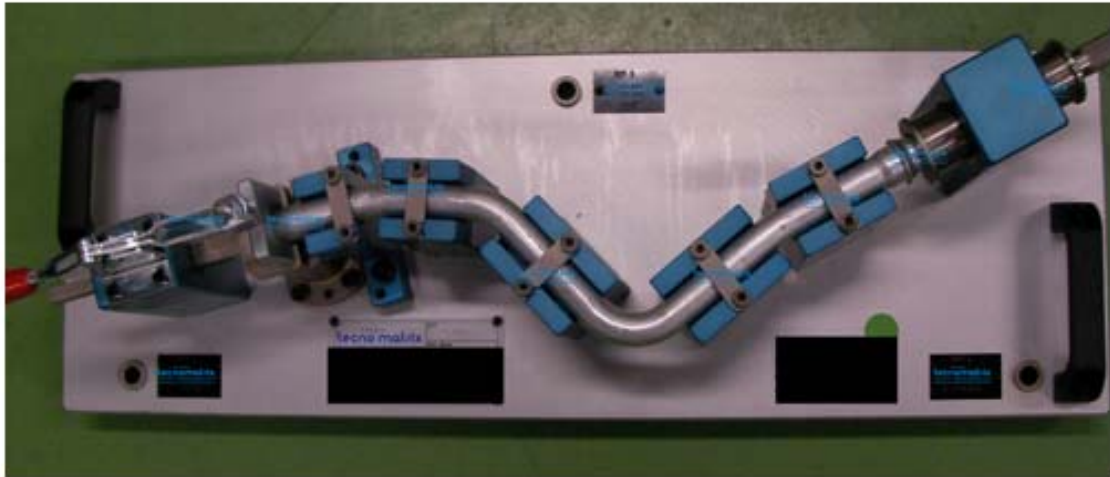


Figura 3.15 – Controle de tolerância de perfil com calibre funcional (Tecnomatrix, 2010)

O controle de tolerância geométrica de perfil utilizando a medição 3D é realizado com grandes vantagens operacionais especialmente no caso de linhas e superfícies de peças com formas livres, onde os métodos tradicionais com uso de comparadores, calibres e gabaritos já não satisfazem as exigências atuais de rapidez e flexibilidade.

Têm-se destaque para as tecnologias de medição por coordenadas onde é possível integrar equipamento de medição e programa computacional para comparação virtual das tolerâncias de projeto entre outras aplicações.

Programas computacionais comerciais como o SCANPAK®, LK CAMIO®, Polyworks®, RapidForm®, Geomagic®, Metris®, PowerINSPECT®, Capture3D®, entre outros, possuem a função de inspeção e comparação dos dados medidos com o modelo digital do projeto (LI e GU, 2004).

Nas figuras 3.16 e 3.17 constam exemplos de medição de perfil de uma superfície e sua comparação virtual com o contorno nominal da peça. Na figura 3.16 foi usado o programa computacional denominado de SCANPAK® da Mitutoyo. No caso da figura 3.17 o programa computacional utilizado foi o LKCAMIO® da empresa Nikon Merology.

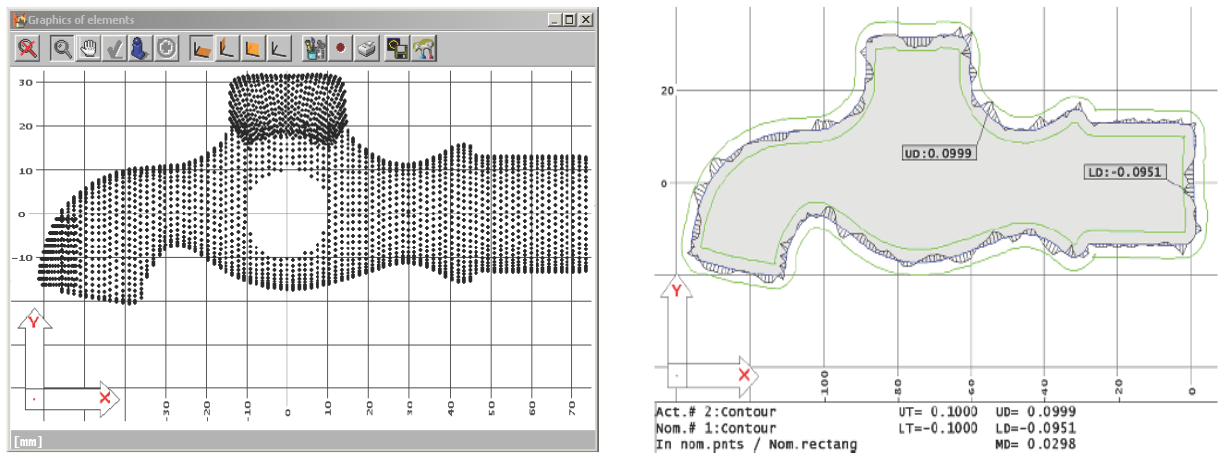


Figura 3.16 – Avaliação de perfil de superfície através da comparação com modelo CAD.

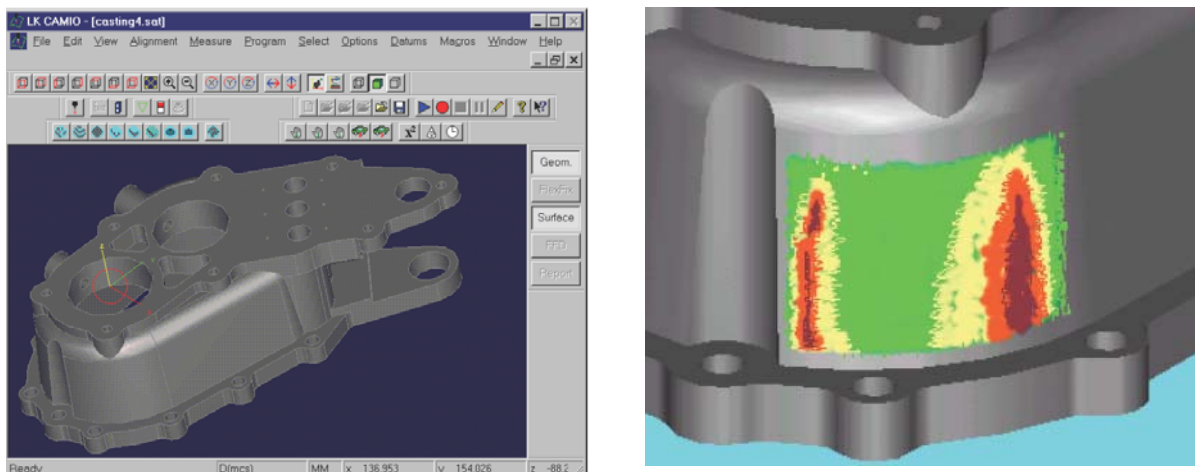


Figura 3.17 – Avaliação de perfil de superfície através da comparação com modelo CAD de uma peça fundida.

CAPÍTULO IV

REQUISITOS DE GARANTIA DA QUALIDADE NA MEDIÇÃO COM MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS

4.1 MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS –MMC

Uma máquina de medir por coordenadas, independentemente de qual seja sua estrutura mecânica, é a representação física de um sistema de coordenadas cartesiano. Nesse sistema de medição, a geometria da peça é obtida pela aquisição de pontos coordenados dispersos discretamente sobre a sua superfície a medir (MARTINEZ et al., 2000). Na figura 4.1 constam os componentes típicos de uma MMC (BOSCH, 1995).

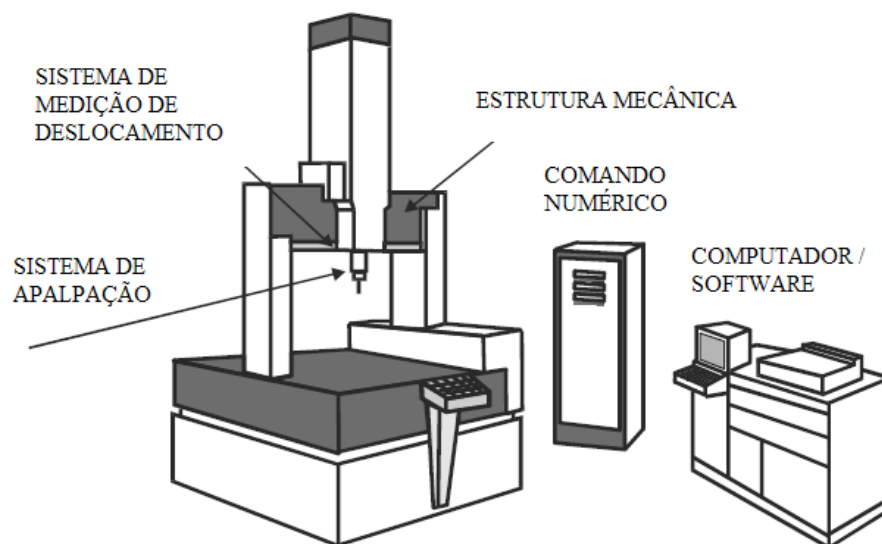


Figura 4.1 – Subsistemas de uma máquina de medir por coordenadas

De uma forma geral cada subsistema mostrado na figura 4.1 tem as seguintes funções (OLIVEIRA, 2003, VIANA, 2006, JÚNIOR, 2007):

- a) Estrutura mecânica: engloba as guias, mancais aerostáticos, colunas, mesa e sistema de acionamento dos eixos e do cabeçote de medição;
- b) Sistema de apalpação: envolve o cabeçote apalpador e o apalpador (sensor);
- c) Sistema de medição de deslocamento: consistem nas escalas eletro-ópticas;
- d) Sistema CNC: envolve a unidade de comando numérico computadorizado (CNC) responsável pelo monitoramento e controle dos sistemas mecânicos e eletrônicos da máquina, controle dos movimentos e interface de comunicação com o programa de medição;
- e) Programa computacional para medição: permite ao operador gerenciar o processo de medição, com edição e execução de programa CNC e emissão de relatório.

Além da máquina de medir com construção mecânica tipo portal mostrada na figura 4.1, outros tipos construtivos como tipo coluna, tipo braço horizontal e tipo ponte são usuais (BOSCH, 1995, JUNIOR, 2007). Essa variedade de construção mecânica aliada à rapidez e flexibilidade para medir diferentes formas geométricas contribuíram para a disseminação dessa tecnologia nas atividades de desenvolvimento de produtos, controle dimensional e geométrico e calibração de peças em laboratórios de metrologia.

Diversos recursos incorporados às máquinas contribuem para essa disseminação, dentre eles podemos destacar (OLIVEIRA, 2003, VIANA, 2006):

- a) Compensação dos erros geométricos da MMC via programa computacional;
- b) Edição e simulação do programa antes da tarefa de medição;
- c) Programa computacional para medição de formas livres e comparação dos dados obtidos com o modelo CAD;
- d) Processamento de diversos formatos de relatórios de medição (gráficos e numéricos), incluindo processamentos estatísticos dos resultados;
- e) Medição das tolerâncias geométricas conforme as normas atuais de GD&T;
- f) Interface DMIS (Dimensional Measuring Interface Standard), que pode ser utilizada em diferentes MMC e possibilita um formato de arquivo neutro de troca entre os sistemas CAD (Computer Aided Design) e as MMC;
- g) Integração do projeto do produto (modelo computacional) com o programa da MMC, facilitando a programação das medições;

4.2 FONTES DE ERROS NA MEDIÇÃO POR COORDENADAS

Apesar de todos os recursos e potencialidades oferecidas pelas máquinas de medir por coordenadas, diversas são as fontes de erros que contribuem para a incerteza do seu processo de medição.

Uma gama variada de publicações (BOSCH, 1995, ORREGO et al., 2000, WECKENMANN et al., 2001, BRITO, 2002, OLIVEIRA, 2003, 2004, VIANA, 2006, JUNIOR, 2007, SAVIO et al., 2007, FENG et al., 2007) aborda o comportamento metrológico das MMC e algumas normas (B89.4.10, 2000, ISO 10360, 2001, ISO DTS 15530-3, 2003) especificam critérios para avaliar seu desempenho.

Os efeitos das diferentes fontes de erros presentes numa MMC se combinam das mais diversas formas e se refletem, diretamente, nos pontos coordenados que definem as geometrias substitutas (ORREGO et al., 2000, OLIVEIRA, 2003, ARENHART, 2007).

É exatamente essa particularidade que torna extremamente complexa a análise dos erros e da incerteza do processo de medição de qualquer tipo de máquina de medir, pois cada ponto coordenado é influenciado de forma diferente (ORREGO et al., 2000).

Desse modo, o que normalmente se apresenta no resultado do ensaio de desempenho ou no certificado de calibração de uma MMC é o erro cometido na medição de comprimento (erros de posição) e os erros de ortogonalidade dos eixos dentro no seu volume de medição. Uma relação com algumas das principais fontes de erros, e o seu grau de influência sobre a medição dos vários tipos de características geométricas, é mostrada na tabela 4.1 (ARENHART, 2007).

Na tabela 4.1 foi arbitrada uma escala com o grau de influência para as fontes de erros onde o grau zero (0) significa não ter influência sobre os vários tipos de características geométricas e o grau quatro (4), indica uma influência significativa. Desse modo, verifica-se que para superfícies com formas livres, tipicamente representadas por tolerâncias de perfil (linhas e/ou superfícies), posição e orientação, os efeitos da estrutura da máquina e estratégia e avaliação de medição (que envolve o metrologista) podem ser significativos.

Tabela 4.1 – Grau de influência de cada fonte de erro nas características geométricas

Características GPS	Estrutura (temperatura e geometria)	Comprimento dos Sensores	Múltiplos Sensores (Indexação)	Geometria da Peça	Estratégia de Avaliação	Estratégia de Medição
Tamanho de Elemento	4	4	4	4	4	4
Comprimento	4	1	4	3	4	4
Ângulo (cone)	2	0	3	4	4	4
Ângulo (entre elem.)	4	0	3	4	4	4
Planeza	1	0	4	0	4	4
Retitude	1	0	4	0	4	4
Circularidade	1	0	4	0	4	4
Cilindricidade	1	0	4	0	4	4
Perfil Linha (sem referência)	2	3	4	0	4	4
Perfil Superfície (sem referência)	2	3	4	0	4	4
Paralelismo	4	0	0	4	4	4
Perpendicularidade	4	0	0	4	4	4
Inclinação	4	0	3	4	4	4
Posição (elemento de tamanho)	4	0	4	4	4	4
Posição (não elem. de tamanho)	4	4	4	2	4	4
Perfil Linha (com referência)	4	3	4	2	4	4
Perfil Superfície (com referência)	4	3	4	2	4	4
Batimento Circular	4	0	4	4	4	4
Batimento Total	4	0	4	4	4	4

Tradicionalmente a literatura classifica as fontes de erros em quatro grupos que se resumem em: máquina de medir, ambiente, peça e operador/estratégia de medição. Essas fontes de erros quando correlacionadas podem atuar em conjunto (WECKENMANN et al., 2001) tornando muitas vezes complexa a tarefa de avaliar a incerteza de medição nessas máquinas.

Segundo KLEN (2003), essas fontes de erros proporcionam desvios nos resultados de medição de diferentes proporções. Considerando as fontes: máquina de medir, ambiente e operador e estratégia de medição, a proporção pode ser estabelecida numa relação de 1:10:100.

Os grupos de fontes de erros e seus subgrupos estão mostrados na figura 4.2.

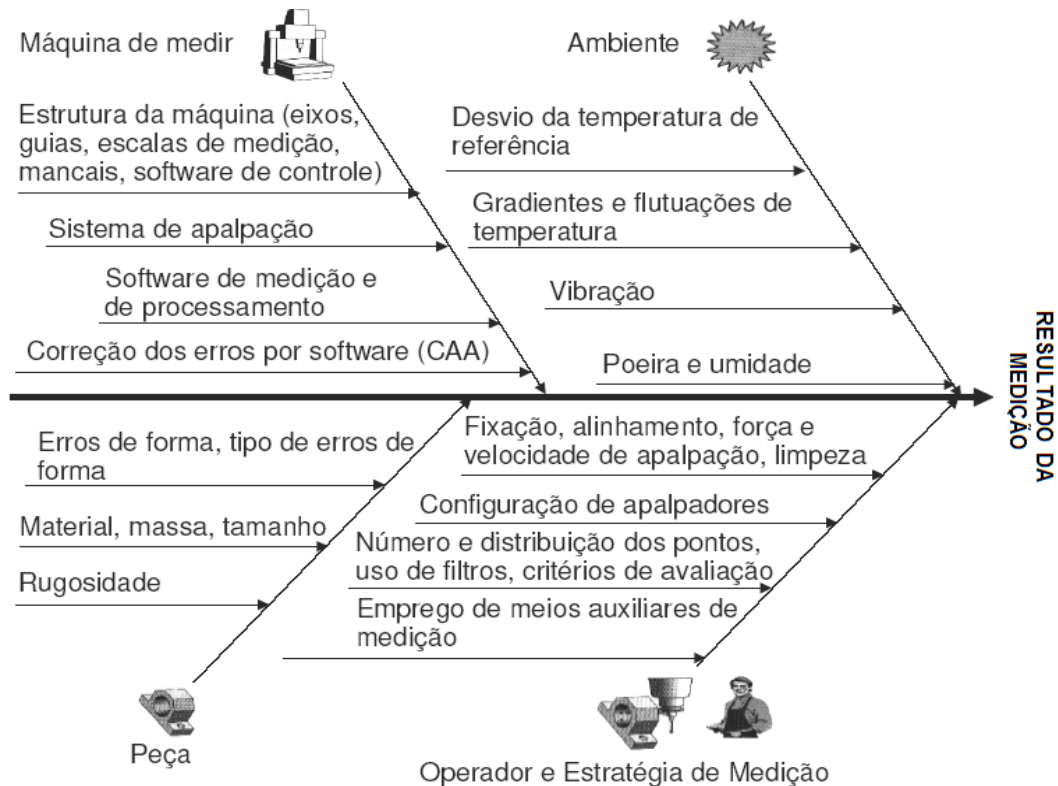


Figura 4.2 – Fontes de erros de medição em MMC (OLIVEIRA, 2003).

4.2.1 Erros relativos à estrutura da MMC

As fontes de erros relativas à estrutura da máquina de medir por coordenadas são geralmente oriundos dos aspectos estruturais mecânicos, construtivos, de montagem e de desgastes dos seus componentes como guias e mancais. São, portanto, erros intrínsecos as máquinas de medir por coordenadas.

Para fins de estudos cinemáticos e de inter-relacionamento dos erros geométricos da parte estrutural de uma MMC, as partes móveis são consideradas como modelos de corpo rígido (ORREGO et al., 2000, BOSCH, 1995).

Para descrever os erros geométricos (ou paramétricos), toma-se, por simplicidade, a análise apenas de uma guia da máquina (guia Y, da figura 4.3) e aplicando o modelo de corpo rígido, verifica-se que podem existir seis graus de liberdade de movimento onde cinco deles são restringidos e apenas um é liberado para movimento em uma única direção.

Os seis graus de liberdades são: um de rotação em torno do eixo Z (yrz), denominado “guinada” (yaw), outro em torno do eixo X (yrx), denominado de “arfagem” (pitch), e outro em torno do próprio eixo Y (yry), chamado este de “rolagem” (roll). Adicionalmente têm-se três movimentos de translação, que podem gerar erros de deslocamentos do sistema de apalpação em relação às escalas.

Na figura 4.3 consta o modelo dos erros paramétricos de uma guia rígida para o eixo Y.

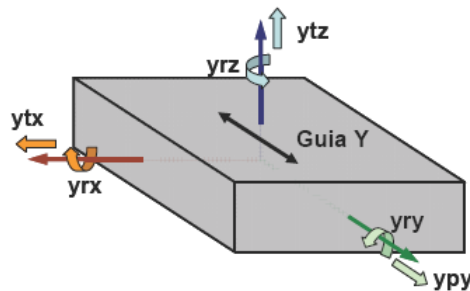


Figura 4.3 – Modelo de erros geométricos de uma guia rígida (ARENHART, 2007)

Como afirmado, cada guia em uma MMC com eixos ortogonais apresenta estes seis erros, um para cada grau de liberdade de movimento, constituindo, em uma máquina tipo portal, por exemplo, dezoito (18) erros geométricos. Além destes, existem ainda três erros de esquadro (perpendicularidade) entre as guias/escalas (xwy, ywz e zwx), totalizando os vinte e um (21) erros geométricos encontrados nas máquinas de medir por coordenadas com três eixos ortogonais. Esses erros geométricos podem ser advindos da fabricação (erros de planeza e retitude), montagem (e ajustes mecânicos) ou desgaste dos elementos (OLIVEIRA, 2003, ARENHART, 2007).

Na figura 4.4 estão representados os vinte e um erros geométricos de uma máquina de medir tipo portal.

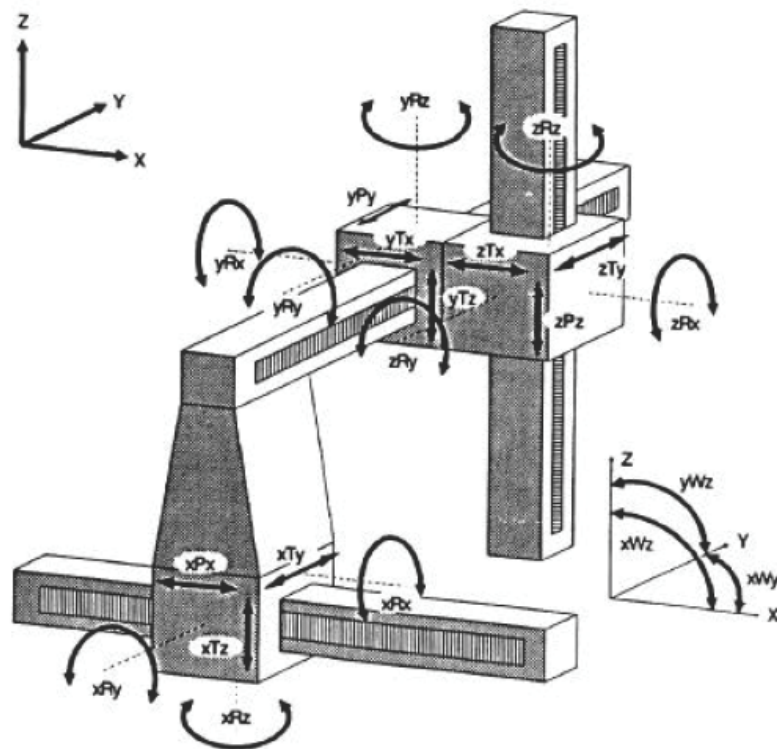


Figura 4.4 – Vinte e um erros geométricos de uma MMC (KLEN, 2003)

Outros fatores, como flexão mecânica (estática e dinâmica) e distorções causadas por gradientes de temperatura, podem provocar alterações estruturais na MMC. O peso próprio das guias e o peso excessivo da peça sobre a mesa da máquina podem provocar flexão mecânica.

Fabricantes de máquinas de medir por coordenadas oferecem opções de correção dos erros geométricos e das escalas através de programas computacionais específicos denominados de CAA (Computer Aided Accuracy). Esses programas utilizam as informações detalhadas dos erros da MMC obtidas pela aplicação de padrões de referência como placas de esferas, por exemplo. Uma limitação desse método é a garantia da estabilidade das condições da máquina e do ambiente para que a matriz de erros identificada no ensaio possa ser utilizada periodicamente. Essa é uma condição mais realística para máquinas instaladas em laboratório de referência.

Segundo ARENHART (2007), outras opções para garantia da confiabilidade metrológica da MMC são a verificação intermediária através de peças padrão ou padrões de referência usuais como blocos padrão, anéis, esferas, etc. e o uso das técnicas de rebatimento (onde a peça é medida em distintas orientações) e da substituição (onde artefatos de referência com características geométricas similares são medidos para compensação dos erros). Essas técnicas permitem minimizar a influência de alguns dos erros geométricos como erros de ortogonalidade e de escala e são mais comuns nos laboratórios de calibração da metrologia dimensional e não nos laboratórios de produção.

Os efeitos dinâmicos também estão presentes e incluem as distorções estruturais causadas pela variação do vetor velocidade quando, por exemplo, o portal de uma máquina desacelera para entrar em velocidade de apalpação, ou durante a aquisição contínua de pontos sobre uma superfície (usual na medição de formas livres), onde a direção do vetor velocidade está continuamente variando. Verifica-se, na prática, uma combinação destes efeitos, o que torna extremamente complexa a tarefa de tratar matematicamente todas essas fontes de erro para efeito de correção (ARENHART, 2007).

4.2.2 Erros relativos ao sistema de apalpação

O apalpador é o sistema de medição encarregado de tomar os pontos coordenados sobre a superfície da peça que está sendo medida. A parcela de erro introduzida por esse sistema no resultado de medição envolve erros sistemáticos e aleatórios sendo que o primeiro pode ser eliminado qualificando corretamente o sensor. A magnitude desses erros depende do princípio construtivo do conjunto cabeçote e sensor e das condições de utilização tais como: nível de poeira do ambiente, tempo e severidade de uso, força de medição selecionada, direção de apalpação, qualidade superficial da peça, etc.

Segundo BOSCH (1995), duas tecnologias são bem conhecidas para sistema de apalpação por contato. São eles: os apalpadores comutadores (touch trigger probes) e os apalpadores medidores (measuring probes).

O primeiro tipo funciona pelo princípio de chaveamento (três chaves de contato elétricas) ou cristais piezelétricos, que são acionadas quando o sensor toca a peça, sendo então adquiridas as coordenadas do ponto. Normalmente são acoplados a um cabeçote indexador (indexable probe head), que possui dois eixos de rotação, conferindo grande flexibilidade de orientação dos sensores de contato. Uma característica do apalpador comutador é o deslocamento do sensor além do ponto de contato na peça (ponto

coordenado) devido à flexão da haste do sensor. Esse efeito é denominado de pré-deslocamento (pre-travel). A compensação deste efeito é feita através da qualificação do sensor, medindo-se uma esfera padrão com diâmetro calibrado, onde se determina o diâmetro efetivo médio do sensor. Com os dados da qualificação também se determina a posição do centro do sensor em relação às escalas da máquina e, desse modo, é possível conhecer a coordenada do ponto de contato, compensando o raio do sensor na direção em que foi efetuada a medição (BOSCH, 1995, ARENHART, 2007).

Portanto, quando se faz medição de pontos individuais sobre a peça, a direção do sensor deverá ser o mais normal possível à superfície que está sendo avaliada. Segundo ARENHART (2007), quando uma apalpação é feita em uma direção distinta da normal, dá-se então origem a um erro de 2ª ordem (erro de cosseno), diretamente proporcional ao diâmetro do sensor conforme mostrado na figura 4.5. Este erro é particularmente significativo quando são medidas superfícies com formas livres (SAVIO et al., 2007, ARENHART, 2007) pela dificuldade de apalpação em muitos casos e por não existir geometrias substitutas para correção automática do ponto. Logo, na medição de elementos regulares isso não é problema, pois a correção de raio é feita após o calculo do elemento geométrico conhecido.

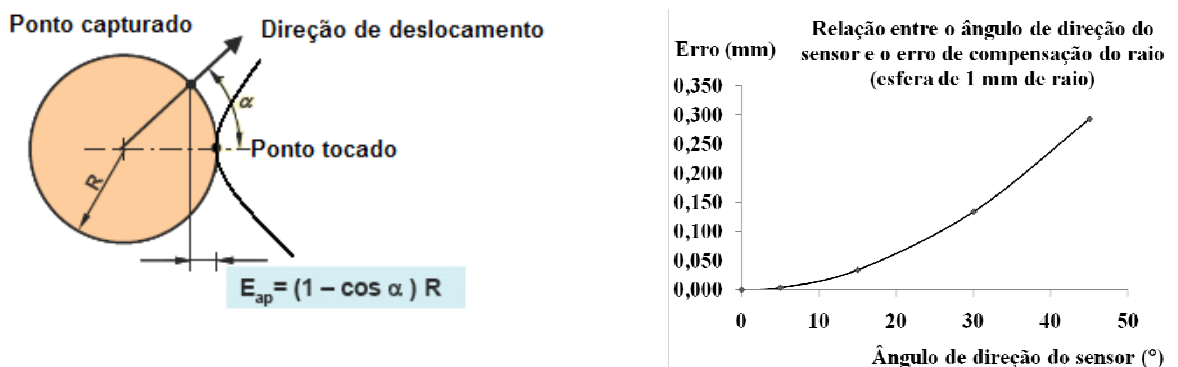


Figura 4.5 – Erro na compensação do raio do apalpador

Outro erro inerente aos apalpadores comutadores é o erro de lóbulos que pode chegar à mesma ordem de grandeza das tolerâncias da peça. Esse erro é causado pela variação da força para acionar as chaves de contato do apalpador que são dispostas a 120° e que resulta em valores de pré-deslocamento distintos dependendo da direção de apalpação e do comprimento da haste (BOSCH, 1995). Esse erro é potencializado pela

redução da rigidez da haste do sensor quando opera na direção perpendicular ao seu eixo. Na figura 4.6 estão apresentadas duas situações de variação da rigidez da haste com a direção de medição. Quando o plano de medição é perpendicular ao apalpador a rigidez é máxima.

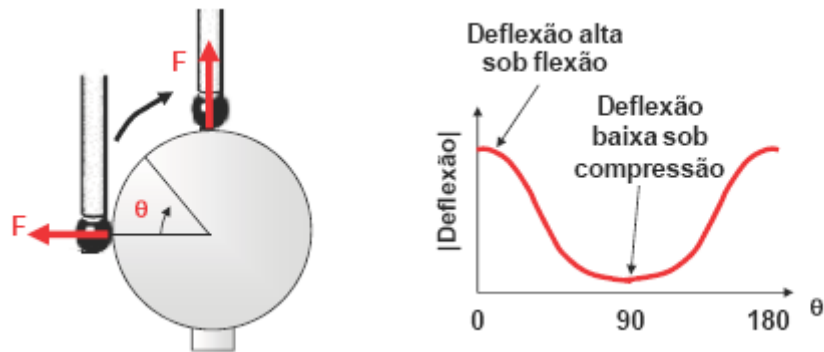


Figura 4.6 - Variação de rigidez de um apalpador com a direção de medição

Atualmente, com a utilização de chaves compostas de cristais piezelétricos ou extensômetros, o efeito dos lóbulos torna-se normalmente desprezível frente à repetitividade de apalpação (BOSCH, 1995).

No entanto, independentemente da tecnologia utilizada no cabeçote apalpador, quatro parâmetros podem influenciar na incerteza de medição relacionada ao sistema de apalpação. São eles: comprimento e configuração da haste do apalpador; força de medição; velocidade de medição e diâmetro do sensor.

A haste do apalpador deverá atender as necessidades da medição observando as seguintes regras básicas (SOUSA et al., 2010):

- uma configuração de haste mais simples possível produz resultados mais confiáveis que uma montagem com diversas juntas e conexões;
- utilizar uma configuração de haste curta e rígida. Hastes longas causam maiores flexões e introduzem erros de pré-deslocamento;
- na impossibilidade de uso de hastes curtas, e quando a incerteza esperada não for compatível com a tolerância especificada, pode-se realizar uma medição de um padrão que tenha semelhança com a geometria e dimensão da peça a medir, utilizando a mesma

montagem, orientação e estratégia de apalpação para avaliar a incerteza do processo de medição.

A força de medição (ou de apalpação) pode ser ajustada nos apalpadores comutadores e medidores. Os erros de apalpação são proporcionais à força de medição selecionada para operação. Não há uma regra única para se estabelecer a força de medição, pois esta depende de cada aplicação, do tipo de apalpador e suas configurações. Como regra geral deve-se ajustar a força de medição para valores pequenos, sem comprometer o funcionamento do apalpador (SOUSA et al., 2010, VIANA, 2006):

- de um modo geral, o aumento da força de medição torna o apalpador menos sensível, adquirindo as coordenadas dos pontos somente após ultrapassar a força pré-estabelecida;

- para apalpadores comutadores, o aumento da força de medição só deverá ocorrer quando forem utilizadas hastes muito longas, pontas com diâmetro maior e velocidades de deslocamento da MMC maiores;

- deve-se ajustar pequena força de medição quando a incerteza de medição for crítica e para peças com pouca rigidez.

Com respeito à velocidade das máquinas de medir, que envolve a velocidade de deslocamento (velocidade em que a MMC se desloca entre pontos de segurança) e de medição (velocidade em que a MMC se desloca entre um ponto de segurança e o ponto sobre a peça), deve-se dar atenção quando se utiliza com valores elevados. Velocidade de medição elevada aumenta a força de apalpação e diminui a exatidão dos resultados.

A distância do ponto de segurança até a peça também é um parâmetro que deve ser observado, uma vez que haverá uma mudança de velocidade antes do contato com superfície da peça e, por conseguinte uma desaceleração da máquina. Essa distância deve ser sempre maior quando se trabalha com velocidades de deslocamento maiores especialmente para garantir que o apalpador adquiria o ponto coordenado numa condição mais estável (SOUSA et al., 2010). Como regra básica, deve-se manter a mesma velocidade de medição utilizada na qualificação do apalpador.

Para minimizar os efeitos da velocidade de deslocamento e de medição da MMC pode-se fazer uso de anéis padrão de diferentes diâmetros, em diferentes direções e velocidades da MMC. Outra opção, porém sofisticada, é a tecnologia introduzida pela empresa Carl Zeiss, conhecida pela sigla D-CAA (Dynamic Bending Computer Aided Accuracy), que descreve o comportamento dinâmico-estrutural da máquina para cada

localização dentro do volume de medição. Essa ferramenta é desenvolvida individualmente para cada tipo e tamanho de MMC e integrada ao controlador da máquina, não sendo necessários ajustes periódicos como os programas computacionais utilizados para compensação dos desvios geométricos (ARENHART, 2010).

Com respeito à geometria e diâmetro da ponta do apalpador, estes têm grande influência sobre os elementos geométricos integrais extraídos da medição. O apalpador funciona como um filtro mecânico, onde o efeito (desejável ou não) depende dos comprimentos e das amplitudes das ondas presentes na superfície real da peça.

A filtragem mecânica não deve atenuar frequências de interesse para avaliação das propriedades funcionais sob investigação. Por exemplo, quando se avalia erro de forma de circularidade definida em relação um determinado tipo de filtro, por exemplo, 150 UPR (frequências por rotação), o diâmetro do apalpador deve ser selecionado de forma que não sejam atenuadas as ondulações da peça na sua máxima amplitude.

A série de normas VDI/VDE 2631 (1999) especifica os parâmetros necessários para a correta seleção do tamanho do sensor a ser utilizado na medição de forma levando em conta a amplitude da ondulação da superfície. As normas ISO/TS 12780-1-2 são mais conservativas e consideram apenas a relação diâmetro da peça e raio do apalpador. Na figura 4.7 estão representados os diferentes efeitos de filtragem mecânica para um mesmo comprimento de onda contendo uma mesma amplitude e três diferentes diâmetros de apalpadores.

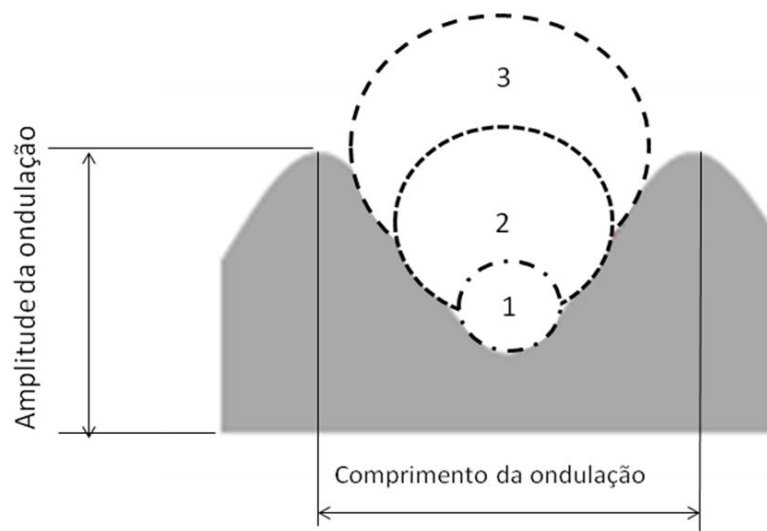


Figura 4.7 – Efeito da filtragem mecânica pelo sensor (adaptado VDI/VDE 2631 – 1, 1999)

A outra tecnologia de cabeçotes denominada de apalpadores medidores (ou apalpadores analógicos) tem um projeto de construção e funcionamento mais complexo que os apalpadores comutadores. Segundo ARENHART (2010), esses apalpadores podem adquirir dados de uma superfície em dois modos distintos: aquisição de pontos individuais e aquisição por contato contínuo (scanning). O sistema consiste de três transdutores indutivos que são utilizados para medir deslocamentos nas três direções ortogonais, sendo mantidos na posição zero por molas planas também orientadas nas direções das escalas da máquina. Portanto, quando o sensor toca a peça, o transdutor indutivo mede a deformação da mola, e faz a aquisição das coordenadas nas escalas (e nos transdutores) quando se atinge uma deformação que corresponde uma determinada força de medição definida previamente pelo usuário da máquina de medir (BOSCH, 1995). No modo de aquisição por pontos individuais, a medição é realizada apenas pelas escalas da MMC.

Com essa tecnologia de apalpador, a compensação do raio do sensor é feita no momento que ocorre o contato com a peça onde o próprio cabeçote medidor começa a atuar de modo a corrigir o sentido de aplicação da força. Da mesma forma que no apalpador comutador, a compensação do efeito da flexão dinâmica da haste e do raio do sensor é também através da qualificação com esfera padrão calibrada.

Na figura 4.8 (a), (b) e (c) consta respectivamente um modelo de apalpador medidor e o princípio de medição no modo de aquisição ponto a ponto e por contato contínuo (ARENHART, 2010).

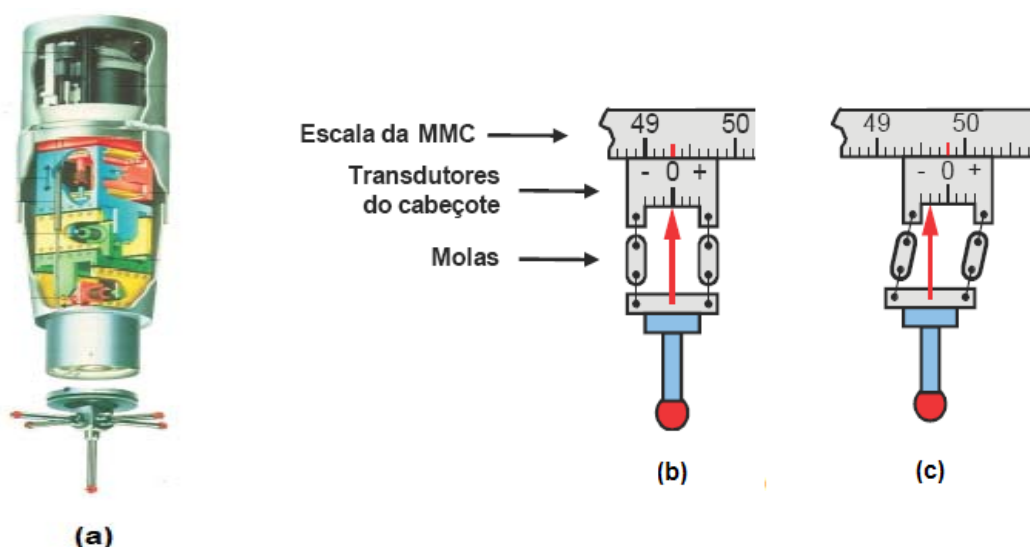


Figura 4.8 – Apalpador medidor da Zeiss (a) e modos de medição por pontos (b) e por contato contínuo (c).

Outros tipos de sonda que utilizam princípios ópticos ou optoeletrônicos (triangulação, reflexão, processamento de imagens, etc.) para determinar os pontos coordenados são largamente aplicados para medição de peças sensíveis ao contato ou de peças especialmente finas, cuja medição por contato requer esforços adicionais.

Seja qual for o princípio de medição, por contato ou óptico, os erros sistemáticos podem ser, eventualmente e sob condições bastante específicas, modelados e compensados através de programas computacionais (ORREGO et al., 2000).

4.2.3 Erros relativos à peça e operador

No que diz respeito à peça a ser medida, são normalmente considerados fatores de influência o acabamento superficial (rugosidade), as propriedades termomecânicas do material (coeficiente de expansão térmica e módulo de elasticidade) e erros dimensionais, de forma e posição dos elementos de interesse da peça. Outros fatores como a correta limpeza da peça e sua fixação na máquina devem ser observados para uma correta medição. Cabe ressaltar que os fatores de influência normalmente atribuídos à peça estão sempre associados a outras condições, de origem externa à máquina de medição. Grande parte dessas condições está presente ou por necessidade de projeto (propriedades de material, massa elevada) ou por serem propriedades inerentes ao processo de produção (rugosidade, erros de forma), não podendo ser minimizados diretamente no nível da metrologia (ARENHART, 2007).

Com respeito à geometria da peça, sabe-se que ela não é perfeitamente conhecida e nem perfeitamente estável (WANDECK e SOUSA, 2008). Os desvios de forma da peça podem ser fontes consideráveis de incerteza, especialmente se o número de pontos medidos sobre a superfície é reduzido (que é uma situação comum) ou se esses pontos estão mal distribuídos sobre a peça, seja por questão de dificuldade de acesso imposta pela geometria da peça ou por uma estratégia de medição inadequada (ARENHART, 2007, KLEN, 2003).

Com respeito a dilatação da peça, deve-se atentar que a temperatura de referência para medição linear é 20°C e que peças com temperatura distantes desse valor podem invalidar o resultado da medição. As variações de temperatura são mais críticas pela própria natureza aleatória e a impossibilidade de eliminação dessa fonte de erro. Peças com pequena massa são mais sensíveis as variações da temperatura no ambiente de medição.

A limpeza da peça é um item que deve ser observado, especialmente quando as tolerâncias dimensionais e geométricas são estreitas. Materiais estranhos à peça como rebarbas e grãos de areia podem comprometer o resultado da medição e danificar a ponta do apalpador particularmente na medição por contato contínuo.

Com respeito à rigidez da peça, deve-se atentar para peças com baixa rigidez que podem se deformar-se no momento da fixação, por peso próprio ou por achatamento no momento da apalpação. Painéis de automóveis, carcaças de celulares, hélice de ventiladores, etc. são exemplos de peças com baixa rigidez e partes com formas livres. Segundo SAVIO et al. (2007), a estratégia de fixação pode ser uma fonte significativa de erro quando se trata de peça com forma livre pela sua própria complexidade geométrica. Para essas peças, o projeto do dispositivo deve idealmente representar a condição de montagem da peça onde os pontos de fixação devem equivaler aos pontos de apoio na montagem e a posição de medição deve ser o mais próximo possível da condição de trabalho da peça. Essa proposta de fixação, denominada de fixação funcional, simula a montagem da peça como apresentado na figura 4.9.



Figura 4.9 – Fixação funcional de um pára-choque de um carro (Tecnomatrix)

Vale ressaltar que mesmo peças com elevada rigidez podem sofrer deformações elásticas se submetidas à força excessiva na fixação. Outra questão importante é a escolha da localização do dispositivo de fixação ou da própria peça sobre a mesa da MMC. A localização deve facilitar o acesso para medição das características geométricas e evitar desmontagens desnecessárias. Sempre que possível, as peças devem ser fixadas próximas

as escalas da máquina onde se tem menores erros geométricos proveniente das deformações da estrutura da MMC.

Ao metrologista da MMC cabe a responsabilidade de realizar a limpeza da peça, posicioná-la e fixá-la de modo que não se deforme durante a medição, selecionar o sensor e montar o cabeçote apalpador. É também responsabilidade do metrologista a correta seleção dos seguintes parâmetros:

- Número de pontos;
- Distribuição de pontos na superfície;
- Velocidade de apalpação;
- Seleção de filtros que auxiliem na medição;
- Métodos de avaliação da medição e forma de apresentação dos dados finais.

Na definição desses parâmetros, o metrologista deve observar os requerimentos de tolerâncias dimensionais e geométricas e as referências com base na funcionalidade da peça. Verifica-se que a definição da estratégia de medição não é tarefa trivial, especialmente quando se inspecionam peças com geometrias complexas. Segundo ARENHART (2007), o metrologista além de profundo conhecimento operacional da máquina deve estar capacitado para desempenhar uma série de tarefas, tais como:

a) Definição dos procedimentos de preparação da medição (tempo de estabilização térmica das peças, periodicidade de qualificação dos sensores, meios de fixação, etc.);

b) Interpretação dos desenhos técnicos (especificações geométricas do produto);

c) Análise das características de acabamento e forma das peças;

d) Definição das estratégias de medição (sensores utilizados, parâmetros do equipamento, métodos de apalpação, número e distribuição dos pontos, etc.), utilizando práticas que minimizem a influência das fontes de erros;

e) Definição das estratégias de avaliação (eliminação de pontos espúrios, filtros, tipos de ajustes matemáticos, referências da peça para inspeção, método de avaliação das especificações, etc.), utilizando os métodos que forneçam uma avaliação o mais coerente possível com a funcionalidade da peça, de acordo com as especificações do desenho;

f) Validação do processo de medição (análise estatística do processo, estimação da incerteza de medição, verificação da adequabilidade frente às tolerâncias e/ou variação do processo de produção);

g) Execução de alterações necessárias quando for verificada necessidade.

VIANA (2006) realizou uma ampla pesquisa em algumas montadoras no Brasil e constatou uma qualificação deficiente dos funcionários nas montadoras e nas empresas fornecedoras. As deficiências referem-se principalmente à definição dos parâmetros da estratégia de medição por coordenadas, à utilização dos sistemas de medição, à avaliação das fontes de erros no processo de medição e à interpretação das especificações de tolerâncias dimensionais e geométricas nos desenhos técnicos.

4.2.4 Erros relativos à estratégia de medição e de avaliação

De uma forma geral, a maioria dos usuários de máquinas de medir acredita que os erros de medição são provocados principalmente pela própria máquina e pelas condições ambientais, especificamente os efeitos da temperatura (OLIVEIRA, 2003).

Entretanto, diversos trabalhos (MAAS, 2001, WECKENMANN et al., 2001, OLIVEIRA, 2003, DATAM, 2007, ARENHART, 2007, ARENHART, 2010, BRITO, 2002, LIMA, 2006, VIANA, 2006, WANDECK e SOUSA, 2008) ressaltam a importância de uma adequada estratégia de medição e de avaliação para garantia de uma qualidade mínima na inspeção geométrica do produto. Neste trabalho, a estratégia de medição compreende o número e distribuição de pontos e alinhamento da peça. A estratégia de avaliação abrange os diferentes tipos de algoritmos de ajustes e suas relações com os elementos geométricos de interesse.

Portanto, na medição por três coordenadas, sabe-se que o conhecimento dos pontos coordenados não é suficiente para avaliar os parâmetros das peças (diâmetros, distâncias, ângulos, etc.). É necessário que a máquina de medir por coordenadas tenha associado um programa computacional com algoritmos matemáticos adequados que ajustam os pontos coordenados adquiridos às geometrias regulares conhecidas (plano, linha, esfera, cone, toro, etc.) que modelam geometricamente a peça medida. Essas geometrias regulares estão dispostas nos programas computacionais e são denominadas de geometrias substitutas.

As características ou parâmetros principais das geometrias substitutas ou da sua combinação são então comparados às dimensões e tolerâncias do projeto da peça. No caso de medição de peças com superfícies com forma livre a comparação ocorre usualmente com o modelo digital da peça disposto no programa computacional da MMC ou em outro programa para esta finalidade. Esse fato ocorre porque não há geometria substituta padronizada para peças com forma livre.

Na figura 4.10 está ilustrada a natureza das medições com uma máquina de medir por coordenadas.

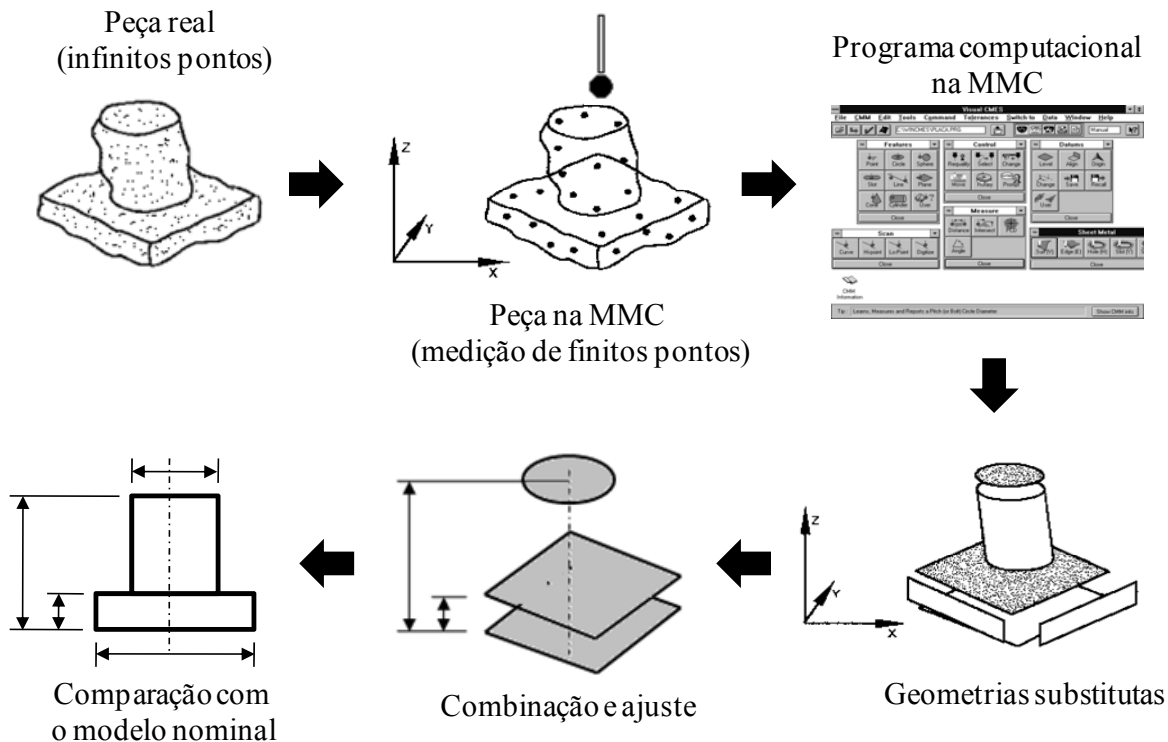


Figura 4.10 – A natureza da medição com uma MMC

A função do ajuste de dados é aplicar um algoritmo apropriado para ajustar uma geometria perfeita (linha, plano, círculo, cilindro, elipse, esfera, cone, etc.) sobre os dados reais coletados sobre a peça. A aproximação da geometria perfeita é denominada de geometria substituta. Esses algoritmos de ajuste normalmente são implementados através de técnicas iterativas, devido a não-linearidade na maioria dos casos. Segundo ORREGO et al. (2000), devido à alta demanda computacional para a resolução de rotinas iterativas, alguns desenvolvedores acabam por lançar mão de aproximações lineares, o que pode levar a resultados incorretos.

Há mais de duas décadas, especialistas e institutos de metrologia têm pesquisado a consistência de programas computacionais para sistemas de medição por coordenadas, dentro de uma subárea denominada metrologia computacional (HOPP, 1993).

FENG e HOPP (1991), relataram que em agosto de 1988, um documento publicado dentro do programa de troca de informação indústria-governo nos Estados

Unidos alertou para o fato de que certos algoritmos usados nos programas de MMC apresentavam inconsistências. Diferentes técnicas de medição, usando os mesmos algoritmos de dados, resultavam em diferentes resultados de medição. Ao passo que diferentes algoritmos de análise de dados calculavam diferentes resultados de medição para a mesma técnica de medição. Esse problema foi denominado de “método da divergência”. No artigo, os autores analisaram seis tipos de algoritmos utilizados para gerar as geometrias substitutas e avaliação de tolerância. Dentre os fatores que contribuíram ao mesmo tempo para este problema na época destacam-se:

- a) Interpretação conflitante da norma ASME Y14.5 por parte de projetista e metrologistas com relação aos princípios de GD&T;
- b) Falta de métodos padronizados para medição;
- c) Problemas no desempenho dos programas computacionais de medição de MMC, especialmente no processamento dos dados depois da medição.

Como sugestões para melhoria dos algoritmos pós-inspeção FENG e HOPP (1991) citaram quatro linhas de estudo:

- a) Definição mais rigorosa de tolerância e dimensionamento;
- b) Projeto robusto, pós-inspeção e análise de algoritmos de dados;
- c) Especificação mais confiável de práticas de medição e amostragem;
- d) Avaliação do desempenho de programa computacional de máquina de medir por coordenadas.

Ainda sobre problemas em algoritmos de ajuste, ORREGO et al., (2000) afirmaram que o problema residia no fato de que a interpretação geométrica das definições contidas na norma ASME Y14.5 não estava baseada no uso de ajustes por mínimos quadrados mas, de zona mínima ou Chebychev.

Pela ASME Y 14.5, para o caso de um furo, por exemplo, especifica-se o maior círculo inscrito e no caso de um cilindro, o menor cilindro circunscrito; porém, como a maioria das MMC define as geometrias usando o ajuste por mínimos quadrados, os programas não fornecem, em muitos casos, os resultados mais adequados.

O ajuste por mínimos quadrados é mais difundido porque não necessita de recursos computacionais mais intensos para seu cálculo e não é sensível a pontos individuais atípicos como é o algoritmo de zona mínima. Este último é recomendado para a medição de tolerâncias geométricas de forma segundo a norma ISO 1101 (2004).

SHAKARJI et al. (2003) reforçam a questão sobre problemas nos algoritmos, afirmando que podem ser fontes significantes de incerteza da medição e contribuir para resultados incorretos em função do objetivo do ajuste aplicado (mínimos quadrados, mínimo círculo circunscrito, máximo círculo inscrito, zona mínima, etc.). Os autores alertam para o fato de que existem erros e, por conseguinte incerteza nos programas computacionais de cálculo e que normas como a ISO/IEC 17025 (para laboratórios) e ISO 14253 (para indústria) citam a necessidade de validação de algoritmos de cálculos desenvolvidos.

SHAKARJI et al. (2003) afirmam também que a maioria dos usuários aceita sem questionamento os resumos gráficos e estatísticos resultantes das medições efetuadas. Segundo os autores, não se conhece com clareza quais os caminhos tomados pelo programa computacional para se chegar aos resultados. Em seu trabalho, os autores fazem um relato histórico dos problemas encontrados em programas computacionais comerciais e citam iniciativas de Institutos como o NIST (National Institute of Standards and Technology) e o NPL (National Physical Laboratory) para auxiliar na avaliação de desempenho de programas computacionais de medição. Por exemplo, o algoritmo do NIST para mínimos quadrados, denominado de ATEP-CMS, está disponível para comparação dos resultados provenientes dos programas computacionais de referência e do cliente, informando os erros máximos obtidos.

Como os programas computacionais são complexos, uma análise completa de sua confiabilidade por parte do usuário é algo impossível. Portanto, as seguintes sugestões são úteis para que o usuário possa avaliar sua confiabilidade metrológica (ORREGO et al., 2000):

- a) Solicitar do fornecedor do programa os testes realizados para validação;
- b) Fazer testes dos dados com algoritmos de referência como o do NIST;
- c) Usar artefatos calibrados para avaliação de incerteza em tarefas específicas;
- d) Comparar os resultados com outros programas computacionais comerciais;
- e) Utilizar casos de geometrias simples para os testes;
- f) Usar a intuição de metrologista.

SAVIO et al. (2007), afirmaram que além do programa computacional de análise e medição, outras fontes como o procedimento de alinhamento dos dados medidos com o modelo nominal da peça e a troca de dados entre diferentes sistemas para CAD, CAM e Metrologia podem ser fontes significativas de erros. Nesse último caso, os autores citam o

exemplo da esfera que pode ser representada como uma superfície NURBS (Non Uniform Rational Basis Spline) quadrática, mas pode ser representada em outro sistema tipicamente através do seu raio e centro. Ainda segundo os autores, alguns programas computacionais de máquinas de medir por coordenadas utilizam curvas de Bézier que podem não ser totalmente compatíveis com sistemas CAD mais atuais que utilizam modelos matemáticos para representações geométricas complexas através de NURBS.

Alguns programas computacionais comerciais de empresas renomadas como o Metrolog XG (www.metrologic.fr), MCosmos (www.mitutoyo.com.br), PowerINSPECT (www.metris.com), PC-DMIS (www.wilcoxassoc.com) entre outros, oferecem de um modo geral as seguintes funcionalidades:

- a) Módulo de medição geométrica para todas as tarefas de medição comuns;
- b) Módulo para digitalizações, análises de perfis e comparações 2D com perfis nominais (CAD ou modelos padrão) e engenharia reversa exportando os vários formatos de arquivos;
- c) Módulo para análise de superfícies 3D a partir de modelos CAD, permitindo a inspeção em formas complexas a partir de sua forma nominal.
- d) Módulo para medição e análise dos principais parâmetros de engrenagens com rotina de inspeção.
- e) Módulo estatístico com análise de cartas e testes.
- f) Módulo para programação de rotinas de inspeção off-line utilizando o modelo CAD como base, oferecendo ao usuário interface gráfica.
- g) Módulo de inspeção de perfis com formas livres como hélices aerodinâmicas, componentes de turbinas, compressores, etc.

Como apresentado até o momento, verifica-se que ainda existem problemas relativos aos algoritmos pós-inspeção que influenciam e são influenciados pela seleção da estratégia de medição. O trabalho de PASIM (2003) reforça essa afirmação. Em seu trabalho foi estudado a análise de tolerância geométrica disposta em um programa computacional comercial de uma MMC, que resultou na constatação de algumas deficiências com relação ao cálculo de bônus de tolerância para condição de máximo material, criação de referências (datums) para avaliação de tolerâncias de localização e avaliação de tolerâncias de superfície.

Entre as recomendações apresentadas por FENG e HOPP (1991) e reforçada em diversos trabalhos, cita-se a necessidade de uma maior formalização matemática dos conceitos e da forma de avaliação das características geométricas tais como planos, cilindros, esferas, círculos, etc. Esse fato ganha mais força com a proliferação da denominada metrologia computacional e dos desenhos na forma digital.

Nesse sentido, a ISO e a ASME têm publicado ou revisado diversas normas mais específicas que a ISO 1101 e ASME Y 14.5 no campo da especificação e avaliação de características geométricas. A ISO 17450 (2002), por exemplo, define um modelo denominado de skin model ou modelo de superfície não-ideal que representa a geometria imperfeita da peça resultado, por exemplo, do processo de fabricação. Esse modelo de superfície não ideal é usado para simular as variações da superfície em um nível conceitual e permite ao projetista otimizar ao máximo as tolerâncias admissíveis de cada característica da peça.

No modelo proposta pela ISO 17450 (2002) são diferenciadas as características integrais que podem ser as nominais e as reais (superfícies da peça) das características derivadas (definidas a partir das características integrais, como centros, eixos ou planos de simetria). As características integrais nominais só existem no desenho técnico e não estão afetados por desvios dimensionais e geométricos. Em resumo, representam a imaginação do projetista.

Entretanto, como na vida real as imperfeições dos processos de fabricação existem, as peças resultantes apresentam desvios nas suas características. Como o objetivo de avaliar quantitativamente esses desvios reais em relação ao modelo nominal, é extraído um conjunto finito de pontos sobre a superfície real da peça a partir de um sistema de medição como, por exemplo, uma máquina de medir por coordenadas. Esses pontos definem as características extraídas da peça. Entretanto, somente esses pontos extraídos da superfície não são suficientes para se obter a magnitude dos desvios de peça. É necessário, portanto, relacionar computacionalmente as características extraídas com geometrias regulares conhecidas (planos, linhas, cones, esferas, etc.) através de ajustes matemáticos que definem as características associadas. Essas características associadas são então comparadas com o modelo nominal para quantificar os desvios das características de interesse na peça.

Na figura 4.11 constam as diversas representações das características geométricas de uma peça à luz da norma ISO 17450 (2002).

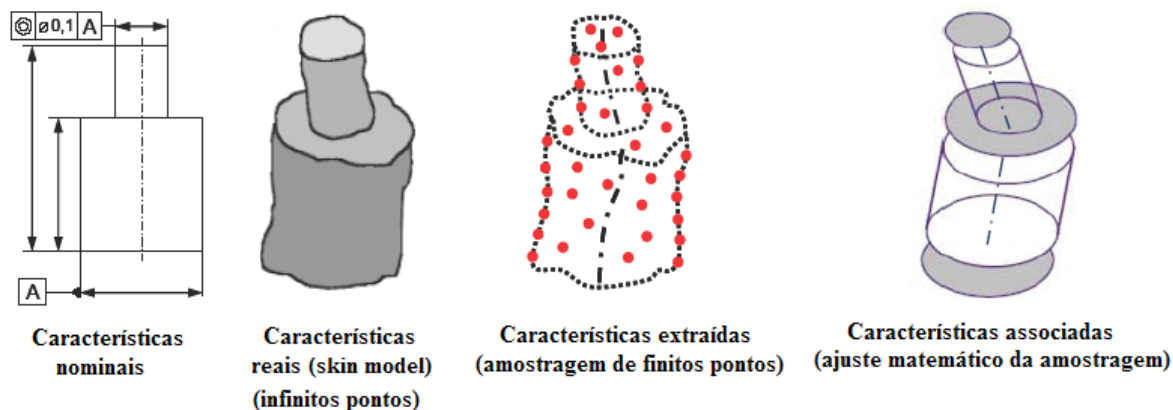


Figura 4.11 – Diversas características geométricas à luz da ISO17450 (adaptado OLIVEIRA, 2003).

Verifica-se pela figura 4.11 que os erros provenientes do uso de estratégias de medição inadequadas estão relacionados diretamente à qualidade e à quantidade dos pontos adquiridos na extração das características a serem avaliadas.

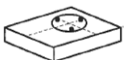
Com respeito à qualidade dos pontos adquiridos, uma adequada seleção dos sensores (tipos e dimensões) e da haste (comprimento e junções) é fundamental na definição de uma boa estratégia de medição. Esses fatores foram abordados no item 4.2.2.

O outro aspecto associado à definição da estratégia de medição é a quantidade e a distribuição de pontos sobre a superfície real da peça a ser medida. Como regra geral, quanto maior for o número de pontos distribuídos sobre a superfície do elemento de referência ou do elemento medido, melhor será o grau de concordância entre a característica extraída e a característica integral real (SOUSA et al., 2010). Uma tendência na medição por coordenadas é a estratégia medição orientada a característica geométrica a ser avaliada. Isso significa que é necessário observar as informações de referências no desenho técnico, as tolerâncias da peça, as características do programa computacional da MMC, velocidade de medição, aplicação da peça, etc.

Por exemplo, para peças com geometria regular como um cilindro ou um cone, a quantidade de pontos poderá ser a mínima que define matematicamente a geometria. Para peças com geometria complexa e superfície com forma livre vale a regra da maior quantidade possível de pontos, observadas as limitações de tempo e custo da medição.

A regra anterior é fortemente influenciada pela magnitude dos erros de forma na superfície da peça. Portanto, onde os erros de forma não exercem influência direta sobre os resultados de medição, o número mínimo de pontos necessários para definir a característica associada poderá ser suficiente. Apesar dos diversos fatores que podem influenciar a escolha e distribuição dos pontos sobre a peça, na tabela 4.2 constam recomendações do número mínimo de pontos para avaliação das geometrias básicas na medição por coordenadas segundo a norma inglesa BS 7172 (1989).

Tabela 4.2 – Número de pontos recomendados para a avaliação das geometrias básicas na medição por coordenadas (adaptado de FLACK, 2001).

ELEMENTO GEOMÉTRICO		Mínimo matemático	NÚMERO DE PONTOS RECOMENDADOS
			NORMA BS 7172:1989
LINHA		2	5
PLANO		3	9 (aproximadamente três linhas de três pontos)
CIRCULO		3	7 (para detecção acima de seis lóbulos)
ELIPSE		4	12
CILINDRO		5	12 (círculos de três pontos em quatro planos paralelos para informação da retitude) 15 (cinco pontos em cada círculo para informação da circularidade)
ESFERA		4	9 (aproximadamente três círculos de três pontos em três planos paralelos)
CONE		6	12 (círculos de três pontos em quatro planos paralelos para informação da retitude) 15 (cinco pontos em cada círculo para informação da circularidade)
CUBO		6	18 (pelo menos três pontos em cada face)

Segundo FLACK (2001), as recomendações da tabela 4.2 são de ordem geral e não devem ser aplicadas para todas as situações. A norma BS 7172 apresenta duas abordagens para determinar o número e a distribuição de pontos na caracterização do elemento geométrico de interesse. A primeira abordagem é o uso das recomendações da tabela 4.2 como regra geral e a segunda é medir e avaliar em mais detalhes uma peça real representativa, de forma a estimar a distribuição de erros e definir uma quantidade e distribuição de pontos sobre a peça que satisfaça o equilíbrio entre economia de tempo e confiabilidade da medição.

Com relação ao alinhamento matemático da peça, o mais usual é o denominado de 3-2-1, que consiste em três pontos para definir a superfície espacial, dois pontos para rotacionar a peça no plano e por último um ponto para definir o ponto zero no terceiro eixo. A partir dessa operação matemática, as coordenadas da peça ficam relacionadas às coordenadas da máquina de medir. É o que está apresentado na figura 4.12.

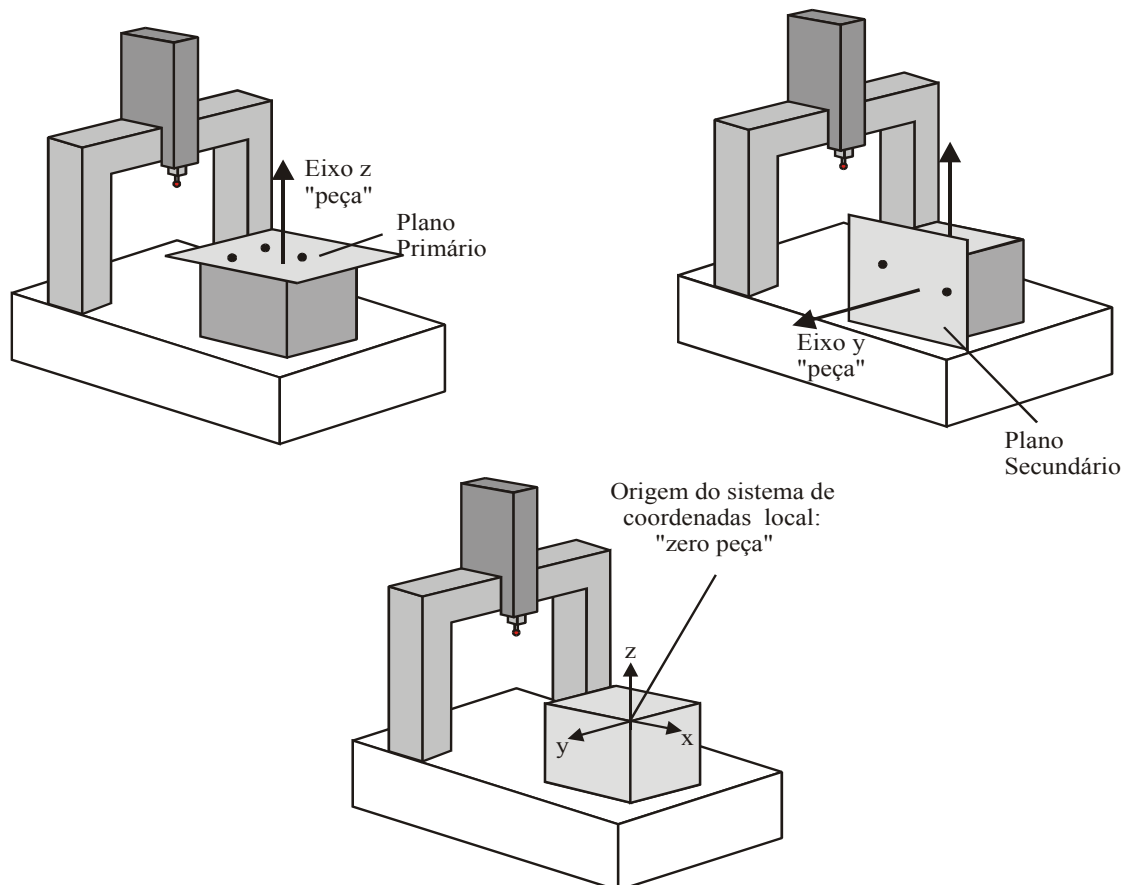


Figura 4.12 – Alinhamento matemático da peça na MMC (CERTI, 2002)

Para o desenvolvimento de uma estratégia de medição confiável e robusta, é fundamental que o metrologista conheça as potencialidades da máquina de medir por coordenadas, especialmente o seu programa computacional. Saber quantificar o impacto que as alterações dos parâmetros ajustáveis do equipamento (velocidade de medição, distância de posicionamento, força de contato, método de qualificação dos sensores, etc.) causarão na qualidade dos pontos adquiridos, permite operar o equipamento em condições de melhor exatidão.

Também é importante que o metrologista conheça as características da peça e interprete corretamente as referências (datums) especificadas no desenho técnico. Essas referências são orientadas pela geometria da peça, sua função, condição de montagem e de medição (VIANA, 2006).

Segundo SOUSA et al. (2010), é comum encontrar nas empresas desenhos técnicos sem definição de referências ou com definições inadequadas. Nesses casos, o metrologista pode ser induzido a erros de interpretação com definição inadequada do procedimento de alinhamento da peça que pode comprometer o resultado da medição. Nessas situações, quando não existem referências definidas, pode-se partir das seguintes recomendações:

- Definir juntamente com o setor de projetos as referências;
- Estudar a seqüência de montagem da peça na contra-peça;
- Analisar os desenhos e verificar de onde partem as cotas.

Para peças com baixa rigidez (peças plásticas e estampadas) e que serão montadas, a definição da estratégia de medição parte da análise da função da contra-peça que a rigor define a referência de medição.

É também usual na prática de medição por coordenadas a medição sobre a própria peça para definição das referências de alinhamento. Quando a peça possui baixo erro de forma esse procedimento não é crítico. No entanto, quando a peça possui erro de forma significativo, pouca rigidez e adicionalmente utiliza-se o ajuste por mínimos quadrados, esse procedimento pode tornar-se pouco confiável uma vez que o ajuste resultará em um plano médio pelos pontos apalpados, não sendo real a representação da geometria física da peça (VIANA, 2006).

Uma recomendação para esses casos é o alinhamento a partir de referência de peças com baixo erro de forma como, por exemplo, a própria mesa de desempenho da máquina, cantoneira, esquadro padrão, etc. Na figura 4.13 consta um resumo das recomendações de número de pontos e algoritmo para medição de superfícies de referência considerando a magnitude do erro de forma.

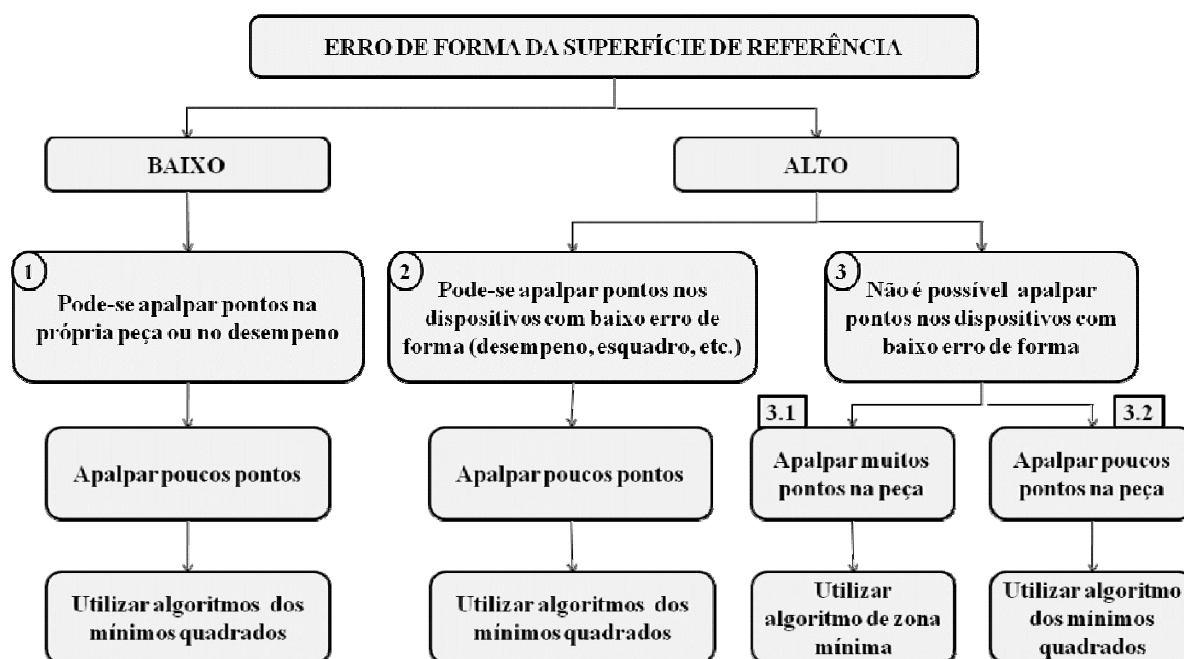


Figura 4.13 – Recomendações para medição de superfície de referência (VIANA, 2003)

Segundo VIANA (2003) e SOUSA et al. (2010), a situação do item 3.2 da figura 4.12 é a de maior ocorrência na prática metrológica, especialmente em medições para a produção. Nesse caso, o metrologista deve estar ciente que o sistema de referência criado causará uma influência no resultado da medição que deverá ser avaliado.

Com respeito à estratégia de avaliação das especificações geométricas bem como o relacionamento entre elas, verifica-se que os algoritmos de ajuste matemáticos que definem as características associadas à peça, devem ser adequados do ponto de vista funcional, para representarem corretamente os mensurandos. Um exemplo clássico é a medição de circularidade em máquina de medir por coordenadas onde a recomendação é adquirir uma grande quantidade de pontos (para reduzir a repetitividade) e avaliar o desvio

de forma através do algoritmo de zona mínima para círculo (MZC) recomendado na norma ISO 1101(2004) anexo B.

Entretanto, é prática comum o uso do algoritmo por mínimos quadrados para avaliação de círculos porque representa de fato uma média dos pontos avaliados e, portanto, possuem baixa sensibilidade à presença de pontos extremos. Nesse método, todos os pontos apalpados participam do cálculo de modo que a influência de cada ponto será menor no resultado final. Por outro lado, no algoritmo por zona mínima os elementos associados são gerados com uma quantidade bem menor de pontos extremos. Dessa forma o uso do algoritmo de zona mínima ou Chebychev é influenciado por pontos atípicos e erros de forma, resultando na necessidade de uma maior quantidade de pontos apalpados que no método por mínimos quadrados. Na figura 4.14 está representado o círculo associado resultante do ajuste por mínimos quadrados (a) e os círculos associados resultantes do ajuste por zona mínima.

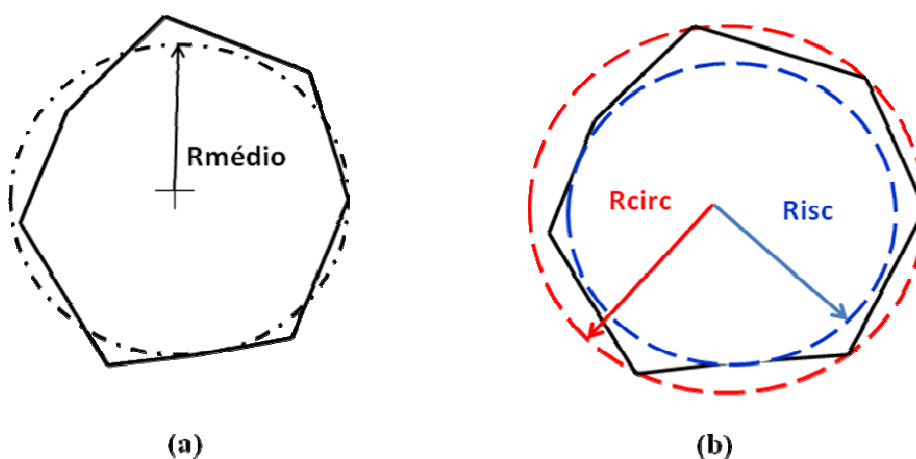


Figura 4.14 – Ajuste por mínimos quadrados (a) e por zona mínima (b)

Portanto, para medição de furos e pinos como referências (datums), e/ou com modificadores de material (envelope, máximo e mínimo material), ou ainda para tolerâncias assimétricas, recomenda-se o uso, respectivamente, dos algoritmos máximo círculo inscrito e mínimo círculo circunscrito, os quais representarão o diâmetro funcional de montagem da característica.

Para planos, recomenda-se o uso dos ajustes pelos planos tangentes. O não uso do ajuste por zona mínima leva, todavia, a erros de não-conformidade com a especificação geométrica, também podendo ser definidos como erros devido a interação entre desvios de forma da peça e estratégia de avaliação. A figura 4.15 é um exemplo de erro na avaliação de perpendicularidade por conta da escolha do tipo de algoritmo de ajuste utilizado na referência da peça (OLIVEIRA, 2003).

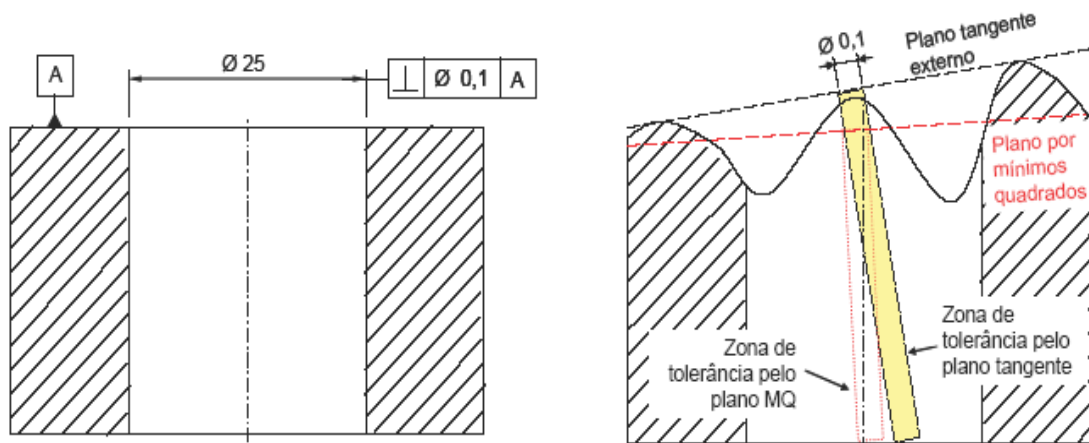


Figura 4.15 - Erro na avaliação de perpendicularidade por conta da escolha do tipo de algoritmo de ajuste.

Para maiores detalhes sobre os tipos de algoritmos de ajustes para as diversas características geométricas de interesse pode-se consultar as seguintes referências: OLIVEIRA, 2003, SOUSA et al., 2010, VIANA, 2003, ARENHART, 2010, ARENHART 2007, FLACK, 2001 e nas normas série ISO e ASME nesse domínio.

Para medição de peças com geometria complexas e superfícies com forma livre (rígidas ou não) verifica-se pelo que foi apresentado até o momento que as orientações sobre estratégias de medição são bastante escassas. Segundo SOUSA et al. (2010), para essas geometrias, o alinhamento matemático é realizado em áreas pequenas da peça indicadas no desenho técnico que limitam a quantidade de pontos para o alinhamento. Uma forma de compensar esse número reduzido de pontos do alinhamento é apalpar uma densa quantidade de pontos sobre toda a superfície que permita fazer a comparação com o modelo digital da peça com maior exatidão. Se os erros de forma são grandes ou a peça é flexível, recomenda-se utilizar como estratégia de alinhamento, contra-peça, gabaritos, desempenho e outros dispositivos com erro de forma baixo.

4.3 RASTREABILIDADE METROLÓGICA NA MEDIÇÃO POR COORDENADAS

Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia (INMETRO, 2009), rastreabilidade refere-se à propriedade de um resultado de medição pela qual tal resultado pode ser relacionado a uma referência através de uma cadeia ininterrupta e documentada de calibrações, cada uma contribuindo para a incerteza de medição.

Verifica-se, portanto, uma estreita relação entre rastreabilidade, incerteza da medição e calibração. A rastreabilidade implica na demonstração formal de uma cadeia de comparações pela qual as medições são referenciadas ao SI (Sistema Internacional) de unidades. Na prática essas comparações são realizadas através da calibração que deve expressar um faixa de dúvida ou incerteza de medição dos resultados para que seja possível a comparação ininterrupta nos diferentes níveis hierárquicos dos padrões utilizados.

Dentre os fatores que justificam a importância do tema, podemos citar (SAVIO et al., 2002):

- a) a rastreabilidade é um requisito mandatório nas normas de garantia da qualidade ISO 9001, ISO/TS 16949 e ISO/IEC 17025;
- b) a avaliação de incerteza através do Guia para expressão da incerteza da medição – ISO GUM é de difícil aplicação para medição de peças complexas.
- c) o procedimento de avaliação da incerteza de medição para MMC descrito na norma 15530-3 (descrita mais adiante) não aborda medição de geometrias complexas;
- d) os métodos atuais de avaliação de máquina de medição por coordenadas estão limitados às geometrias regulares e não garantem rastreabilidade de medidas para todas as tarefas de medição no seu volume de trabalho.

A garantia da rastreabilidade para máquina de medir por coordenadas é tema de muitos trabalhos ainda hoje. Pela sua flexibilidade de aplicação, possibilitando a medição de uma gama extensa de mensurandos com diferentes estratégias de medição, a avaliação e expressão da incerteza de medição nessas máquinas tornam-se complexas (BOSCH, 1995, MAAS, 2001, WECKENMANN et al., 2001, OLIVEIRA, 2003, SOUSA et al., 2010, ARENHART, 2010). Desse modo, o resultado da medição da circularidade de um furo e sua incerteza de medição pode variar significativamente em função da máquina utilizada, da estratégia de medição e avaliação e das condições ambientais. Como consequência dessa gama de possibilidades de resultados diferentes, o termo “incerteza de medição para

tarefas específicas” é geralmente utilizado. O objetivo do uso desse termo é ressaltar a diferença entre os resultados de um teste de aceitação e de verificação (testes realizados na entrega do equipamento e testes entre as calibrações periódicas) e a incerteza associada à medição de uma determinada característica de uma peça, sob condições específicas.

Fabricantes de MMC, laboratórios de calibração e usuários em geral se baseiam em normas e diretrizes internacionais de aceitação e verificação de máquinas de medir, como, por exemplo, a ISO 10360-2, VDI/VDE 2617, EAL - G17 entre outras. Estas normas não tratam de calibrações, mas sim de verificações para ensaios bem definidos como erros para medição de comprimentos, posição e forma calibrados. No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT utiliza-se das normas e guias internacionais acima citados nesse domínio.

No nível internacional, o comitê técnico TC 213 da ISO, que trata de especificação geométrica de produtos – GPS publicou a série de normas ISO 15530. A norma ISO/DTS 15530-3 (2003) descreve uma metodologia para estimar incerteza de medição utilizando-se uma peça ou padrão calibrado similar as peças normalmente medidas na MMC e, portanto prover evidência formal de rastreabilidade no processo produtivo. A própria norma declara como fatores limitantes do método, a disponibilidade de peças padrão com exatidão suficiente, estabilidade, custo razoável e incerteza de calibração suficientemente pequena. Outra limitação é que a norma não trata de medição de peças com geometrias complexas.

A norma ISO/TS 15530-4 (2008) descreve técnicas de simulação computacional onde são introduzidas informações sobre vários fatores que influenciam o desempenho da MMC, tais como, erros geométricos, erros de apalpação, etc. que quando combinados, dão como resultados, estimativas dos erros e das incertezas de tarefas de medição específicas executadas pela máquina. O PTB (Physikalisch – Technische Bundesanstalt) foi pioneiro no uso de simulação computacional para calibração de MMC, pelo denominado método da “CMM Virtual” (VIANA, 2006). A norma não explicita o método de Monte Carlo para simulação computacional e não aborda a medição de geometria complexas. Entretanto, essa metodologia ganha força uma vez que pode ser aplicada para medição de peças complexas porque o modelo CAD e o programa CNC representam bem o modelo geométrico do processo de medição.

Uma contribuição recente no campo da rastreabilidade metrológica para peças complexas e na linha da norma ISO 15530-3 foi proposta SAVIO et al. (2002). Os autores

desenvolveram o conceito de MFG (Modular FreeForm Gauge), que basicamente é a combinação de padrões regulares calibrados, como por exemplo, blocos e cilindros padrão com o intuito de simular o quanto possível a geometria complexa que se deseja medir com essas peças regulares. O experimento focou na inspeção de uma pá de turbina, onde o MFG foi composto de um cilindro padrão e duas placas com boa planeza conforme figura 4.16.

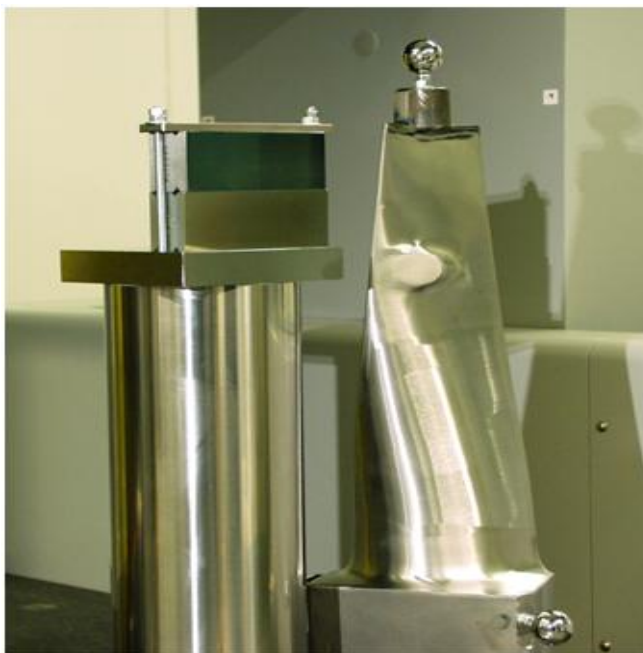


Figura 4.16 – Experimento montado: MFG (esquerda) e a pá de turbina (direita).

Um modelo CAD de “referência” foi gerado com as posições calibradas do MFG. As incertezas de medição foram da ordem de 2 a 3 micrometros, utilizando-se uma MMC de referência. A principal vantagem citada pelo autor foi a possibilidade de calibrar o MFG por métodos bem conhecidos da metrologia dimensional e, portanto, com boa exatidão e completa rastreabilidade metrológica e um custo relativamente baixo se comparado aos artefatos padrão com forma livre.

Dentre as limitações da proposta apresentada consta a impossibilidade de generalização do método uma vez que o estudo focou numa geometria relativamente simples e a dificuldade de manter a similaridade geométrica do MFG com a peça a medir.

4.3.1 Rastreabilidade na medição de engrenagens

Os parâmetros característicos das engrenagens são comumente os desvios de forma (erros no perfil), na orientação (linha de flanco) do dente da engrenagem, erros na espessura e no passo dos dentes, bem como o batimento radial (SATO et al., 2010). Esses desvios são medidos em máquinas de medir engrenagens controladas numericamente ou por máquinas de medição por coordenadas com características adicionais como mesa rotativa. Os resultados de medição devem ser validados sob um rigoroso sistema de rastreabilidade e os equipamentos de medição, calibrados contra padrões corporificados que exigem níveis de incerteza bastante reduzidos. Na Figura 4.17 consta exemplo de padrões corporificados para calibração de máquinas de medir engrenagens.

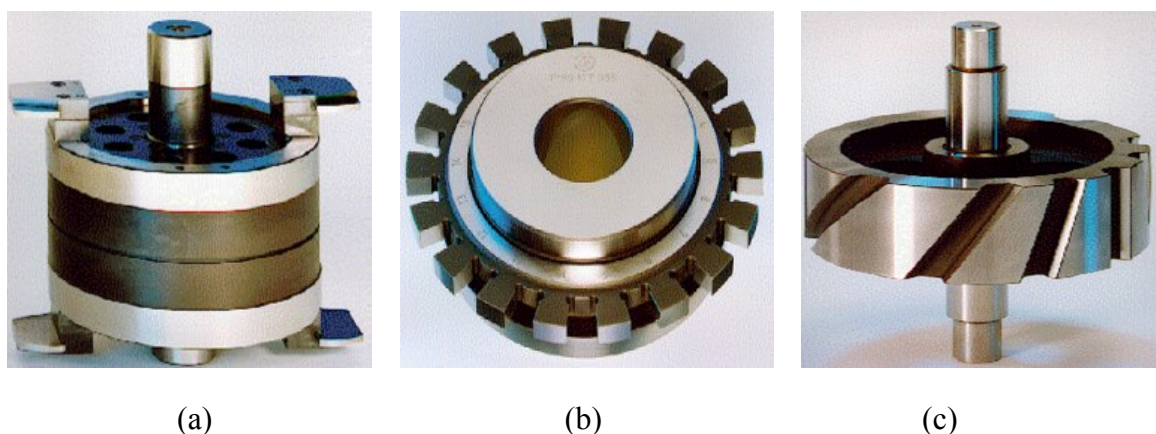


Figura 4.17 – Padrões corporificados: (a) perfil envolvente, (b) passo e (c) ângulo de hélice.

Devido ao custo de aquisição e manutenção da calibração desses padrões, é recomendado que o usuário mantenha uma engrenagem padrão (réplica padrão) para monitoramento da confiabilidade do processo de medição (BRITO, 2002). Apesar da norma 15503-3 não abordar geometria complexa como, por exemplo, engrenagens, autores como GOCH (2003) e DATAN (2007) têm proposto metodologias para avaliação de incerteza e evidência da rastreabilidade metrológica, utilizando o método de medição por substituição com peças padrão baseado na norma ISO 15530-3.

Outra tendência na metrologia de engrenagens é o controle, por métodos ópticos, de toda a superfície do flanco da engrenagem e não apenas a medição do perfil, linha de flanco e passo simples, como é feito na metrologia convencional de engrenagem (GOCH, 2003). A descrição 3D do flanco do dente e seu relacionamento geométrico com o passo e

a espessura do dente permitem a descrição tridimensional completa de toda engrenagem. No entanto, as normas atuais de engrenagens não abordam a análise 3D do flanco e tampouco a teoria de GD&T (DATAN, 2007).

4.4 AVALIAÇÃO DA CONFORMIDADE COM A ESPECIFICAÇÃO

Dada à preocupação atual de se considerar a incerteza de medição nas relações formais de comprovação de conformidade com a especificação entre cliente-fornecedor, merecem destaques as normas internacionais ISO 14253-1 (1998) e ISO/TS 14253-2 (1999), que estabelecem, respectivamente, regras para provar a conformidade ou não conformidade com a especificação e avaliar a incerteza de medição em nível industrial de forma iterativa.

No sistema de garantia da qualidade, a norma ISO 14253-1 pode ser um contrato entre as partes (cliente/fornecedor), definindo a forma de avaliação de conformidade dos produtos. Essa recomendação se aplica muito bem nas situações onde a empresa define suas tolerâncias conforme as normas GPS (Geometrical Product Specification) e não existem condições legais ou regulamentos definindo o critério de avaliação de conformidade.

Os princípios gerais da ISO 14253-1 aplicam-se para outras especificações e podem ser resumidos em:

a) A incerteza de medição é avaliada conforme o ISO-GUM (1995) ou a ISO/TS 14253-2 e refere-se à incerteza expandida (U) com fator de abrangência (k) tipicamente igual a 2;

b) Para provar conformidade com a especificação, o fornecedor deve usar a incerteza real do seu processo de medição. A mesma regra vale para o cliente e para o revendedor;

Na figura 4.18 consta a representação da relação entre a especificação de tolerância do produto e a incerteza do processo de medição estimada com base nos princípios da norma ISO 14253-1.

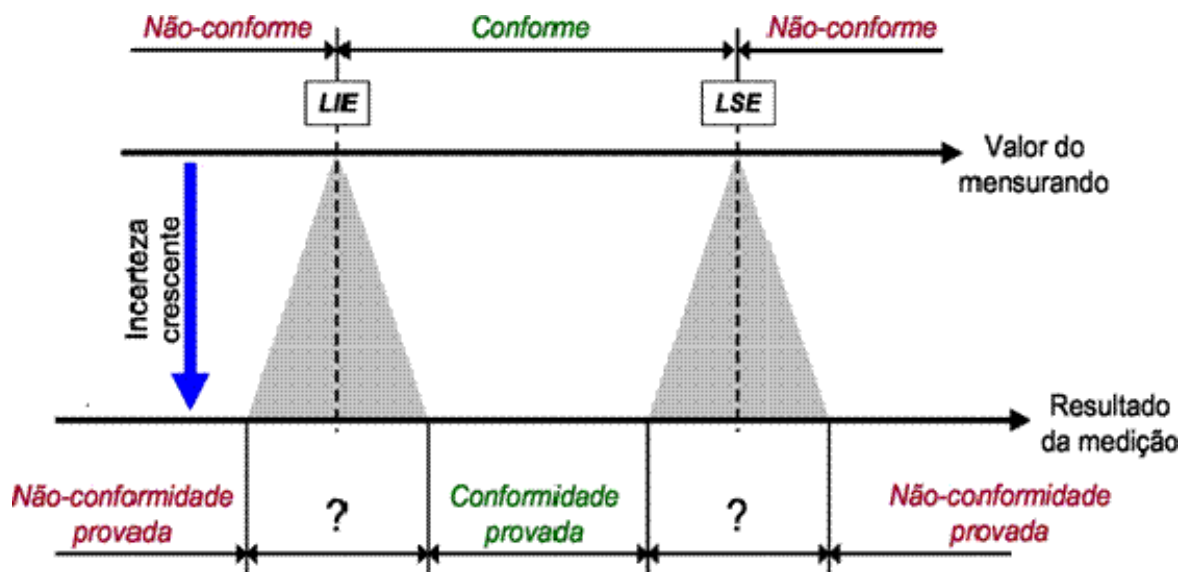


Figura 4.18 – Influência da incerteza de medição na zona de conformidade especificada

Analisando a figura 4.18, observa-se que na fase de projeto idealmente não há incerteza associada aos valores especificados do produto. Tem-se o desenho com as dimensões e geometrias nominais.

Entretanto, ao longo do ciclo de desenvolvimento do produto os valores especificados da característica (mensurando) são compostos de incertezas provenientes das diversas etapas de produção e medição, culminando na fase de medição final na qual a faixa de especificação ou de tolerância especificada (T) está reduzida da faixa de incerteza estimada ($2U$) associada ao processo de medição final. A faixa restante representa a faixa de conformidade com a tolerância especificada.

A incerteza estimada do processo de medição (U) é composta dos erros máximos admissíveis dos instrumentos ou sistemas de medição envolvidos (se não há correção da tendência) e todos os componentes de incertezas julgados significativos. Isso pode incluir, por exemplo, a estimativa da reprodutibilidade dos operadores envolvidos, efeitos das condições ambientais sobre o instrumento e sobre o mensurando, entre outros.

A avaliação de incertezas, seja pelo método do ISO-GUM ou ISO/TS 14253-2, deve garantir a relação adequada entre a tolerância e incerteza, de modo que o processo de medição seja capaz de discriminar o mensurando conforme ou não conforme, dentro dos riscos de erros definidos pela empresa.

Quando não for possível decidir sobre a conformidade ou não conformidade da grandeza específica medida através dos resultados medidos, faz-se necessário estabelecer nos procedimentos formais critérios de tomada de decisão.

Outra consequência imediata da aplicação da norma 14553-1 é a exigência de rastreabilidade formal para as medições realizadas no produto. O requisito de rastreabilidade, que é prática padrão nos laboratórios de calibração, traz consequências significativas sobre a metrologia industrial.

Assim, pode se estabelecer algumas propriedades que um bom plano de inspeção geométrica deve possuir (adaptado DONATELLI et al. (2005):

- a) Deve atender os requisitos próprios da etapa do desenvolvimento de produto em que a medição é executada, no que diz respeito a tipo de informação gerada, tempo e custo de execução da medição (apoio a P&D ou produção);
- b) Deve fornecer resultados comparáveis com as especificações geométricas de produto;
- c) Deve ser rastreável, no sentido moderno do termo;
- d) Deve atender os requisitos de estabilidade (consistência no tempo) e capacidade (a incerteza deve ser pequena quando comparada com a tolerância e/ou a variação do processo de fabricação).

CAPÍTULO V

SISTEMÁTICA PARA GARANTIA DA QUALIDADE NA MEDIÇÃO DE PEÇAS COM GEOMETRIAS COMPLEXAS E SUPERFÍCIES COM FORMAS LIVRES EM MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS

5.1 INTRODUÇÃO

O surgimento de novas tecnologias na informática, eletrônica, novos materiais, etc., deram um grande impulso no desenvolvimento de máquinas automatizadas para fabricação e de programas computacionais genericamente denominados de CAX (CAD/CAPP/CAM/CAQ/CAE/CAT/CAI/CIM) para auxiliar as diversas etapas de desenvolvimento de um produto.

Em decorrência dessas inovações, é possível fabricar peças com geometrias mais complexas e tolerâncias mais estreitas. No campo da representação da geometria da peça, os desenhos técnicos em três dimensões ganham espaço em decorrência do desenvolvimento de modeladores sólidos 3D. Esses, por sua vez, induzem a atualização e ampliação dos conceitos nas normas que tratam de dimensionamento e tolerância geométrica (GD&T e GPS), exigindo um formalismo matemático mais consistente na definição dos elementos geométricos e das tolerâncias. Esse formalismo matemático auxilia no desenvolvimento de programas computacionais para medição e extração de características geométricas em 3D.

No campo da metrologia geométrica, os instrumentos de medição convencionais deram lugar as tecnologias de medição por coordenadas, em especial as máquinas de medir por coordenadas. Com isso foi possível medir peças complexas em menos tempo, com menor incerteza e com a possibilidade de integrar a tecnologia digital nas diversas fases do desenvolvimento de um produto.

Apesar dos avanços tecnológicos relatados, a medição de peça com geometria complexa não é uma tarefa trivial, exigindo, portanto, equipamento de medição adequado, metrologista qualificado e estratégia de medição que considere as características que se deseja avaliar.

Nesse capítulo são apresentadas as principais limitações no contexto da medição de peças com geometria complexa, utilizando a máquina de medir por coordenadas e proposta uma sistemática para garantia da qualidade de medição para peças complexas com aplicação de dois estudos de casos com as recomendações do trabalho.

As limitações constatadas são baseadas no estudo bibliográfico apresentado nos capítulos anteriores, na troca de informações com especialistas da área, na experiência do autor e nas visitas realizadas no período de março a agosto de 2010 em seis (06) empresas de médio e grande porte que utilizam a tecnologia de medição por coordenadas. Na tabela 5.1 constam os setores de atuação das empresas visitadas e quantidade de empresas por setor.

Tabela 5.1 – Empresas visitadas por setor de atuação

SETOR DE ATUAÇÃO	NÚMERO DE EMPRESAS VISITADAS
METALMECÂNICO	03
ENERGIA EÓLICA	01
AUTOMOTIVO	02

Duas empresas aceitaram a aplicação de um questionário (modelo em anexo) que teve como objetivo principal investigar de forma mais detalhada os problemas apontados nos capítulos anteriores e sua confirmação. Adicionalmente, a pesquisa contribuiu para a definição da forma de abordagem e dos módulos e submódulos da sistemática proposta neste trabalho.

Das empresas que aceitaram participar da aplicação do questionário uma atua no setor metalmecânico com forte atuação no mercado interno e eventualmente no mercado externo. A segunda empresa é fornecedora de produtos para grandes montadoras no Brasil

e do exterior. Todas as empresas são, pelo menos, certificadas segundo a norma ISO 9001: 2008 e desenvolvem projetos, produzem e medem seus produtos com máquina de medir por coordenadas.

Cabe destacar que o uso da tecnologia de medição por coordenadas no Ceará está em franco crescimento. Em 2005 havia apenas uma máquina de medir no Ceará. Atualmente existem em operação 12 (doze) máquinas de medir por coordenadas, entre braço de medição e máquina cartesiana.

Por fim, são relatadas as principais constatações que justificam a importância de se sistematizar informações que auxiliem o metrologista na tarefa de medir peças com geometrias complexas e superfícies com forma livre, de uma maneira confiável do ponto de vista metrológico.

5.2 CONSTATAÇÕES SOBRE OS ASSUNTOS ESTUDADOS

Dos estudos realizados constatou-se que:

a) O projeto do produto ainda é um dos maiores problemas da indústria. Muitos desvios de qualidade relativos ao projeto somente vão ser descobertos na fabricação ou mesmo no estágio de inspeção final ou uso do produto (DONATELLI et al., 2005, MAZIERO, 1997);

b) Usualmente no controle geométrico de peças, as especificações de projeto e o desenho estão orientados ao cumprimento da função, não havendo compromisso maior com a inspeção. Isso implica em problemas na medição por coordenadas pela falta de referências adequadas;

c) A norma brasileira NBR 6409 que trata de tolerância e dimensionamento geométrico está obsoleta. Existe uma gama variada de normas atuais ISO que tratam de especificação de tolerância e seus relacionamentos com verificação e rastreabilidade metrológica;

d) Cotação baseada no sistema cartesiano ainda é bastante utilizada nas empresas, ao invés da utilização de tolerâncias geométricas, que aumentam a zona permissível da tolerância (WANDECK e SOUSA, 2008);

e) No meio industrial, em especial, na indústria automotiva, verifica-se um aumento na exatidão de medição de tamanho e de forma, especificados no projeto. Isto

acarreta em uma maior complexidade nas tarefas de medição e equipamentos de medição para avaliar a conformidade com a especificação (WECKENMANN et al., 2001);

f) São frequentes no setor automotivo as discordâncias quanto à conformidade do produto geradas por especificações geométricas inconsistentes e dúvidas na sua interpretação, falta de conhecimento das variações do processo de fabricação e das definições inadequadas do processo de medição (VIANA, 2006);

g) Normas sobre avaliação de incerteza de medição em MMC não abordam com clareza as situações de medição de peças complexas (SAVIO et al., 2002);

h) É necessário considerar as incertezas de medição desde a concepção do projeto até a avaliação geométrica do produto final. Pode-se estar aprovando peças ruins e reprovando peças boas. As normas ISO 14253 partes 1-2 e 3 abordam esse tema;

i) Os métodos normalizados de avaliação de desempenho de MMC atuais não garantem a avaliação de incerteza de medição em todo volume de medição da máquina e, por conseguinte, não permitem a demonstração formal da rastreabilidade metrológica para peças com formas livres (ISO/DTS 15530-3, 2003, SAVIO et al., 2002);

j) Existe uma vasta quantidade de programas de medição em máquinas de medir por coordenadas disponíveis no mercado, mas o usuário não conhece como são tratados os conceitos de GD&T/GPS e nem a incerteza da medição do ponto adquirido (ORREGO et al., 2000);

k) Muitos programas para medição em máquinas de medir por coordenadas ainda não contemplam a análise de tolerância de perfil com geração do modelo 3D (ZHOU, 2007);

l) Falta integração entre os programas de CAD e os de análise de tolerância. Em muitos sistemas CAD os arquivos não estão disponíveis para aplicações posteriores (NASR e KAMRANI, 2006, MAVROIDIS, 2002);

m) Algoritmos para alinhamento dos dados medidos com o modelo nominal da peça e a troca de dados entre diferentes sistemas para CAD, CAM e Metrologia, podem ser fontes significativas de erros (SAVIO et al., 2007);

n) A seleção do algoritmo para ajuste (alinhamento) dos pontos medidos com as coordenadas do modelo nominal deve ser pelo critério da função do elemento avaliado (ARENHART, 2007);

o) Algoritmos pelos mínimos quadrados são usados indistintamente nas MMC. Porém, a norma ISO 1101 recomenda o uso do algoritmo de mínima zona para característica geométrica forma (ARENHART, 2007);

p) As estratégias de medição e avaliação podem ser fontes significativas de erros na medição por coordenadas (MAAS, 2001, BRITO, 2002, LI e GU, 2004);

q) A formação atual do metrologista em máquina de medir por coordenadas requer um amplo conhecimento sobre interpretação de tolerância geométrica e processos de fabricação (ARENHART, 2007, SOUZA, 2007);

r) Apesar da importância das engrenagens no contexto industrial, verifica-se que existe pouca literatura sobre projeto de tolerância focado em engrenagem (DATAN, 2007).

5.3 SISTEMÁTICA PROPOSTA

A sistemática consiste de um conjunto de diretrizes, focadas nas principais fontes de erros na medição por coordenadas abordadas no capítulo 4, que auxiliarão profissionais e empresas que utilizam a medição em qualquer das fases de desenvolvimento de um produto.

O objetivo geral da sistemática é propor recomendações fundamentadas em normas com foco na importância do planejamento adequado da estratégia de medição, minimizando as principais fontes de incertezas e aumentando a confiabilidade metrológica do processo de medição.

Essa sistemática não tem a pretensão de apresentar soluções para todos os problemas identificados neste trabalho e nem ser a única forma de resolvê-los; de modo que o usuário das informações contidas na sistemática proposta pode modificar, por exemplo, a seqüência de ações para a implementação, satisfazendo situações particulares.

A sistemática deverá ter como características básicas:

a) ser de fácil entendido pelas pessoas responsáveis envolvidas com as atividades de metrologia, qualidade e projeto;

b) ser a mais genérica possível de modo que possa ser aplicável a qualquer empresa, independente do porte e atuação, mas que utiliza máquina de medir por coordenadas;

c) ser consistente com normas e/ou documentos de referência que correlacionam metrologia, garantia da qualidade e tolerância geométrica.

A sistemática proposta foi estruturada em três módulos que contemplam aspectos relacionados com recursos humanos, comunicação, documentação, normalização, características do produto, planejamento e estratégia de medição e confirmação metrológica.

Na figura 5.1 constam os módulos da sistemática proposta para garantia da qualidade das medições em máquina de medir por coordenadas.

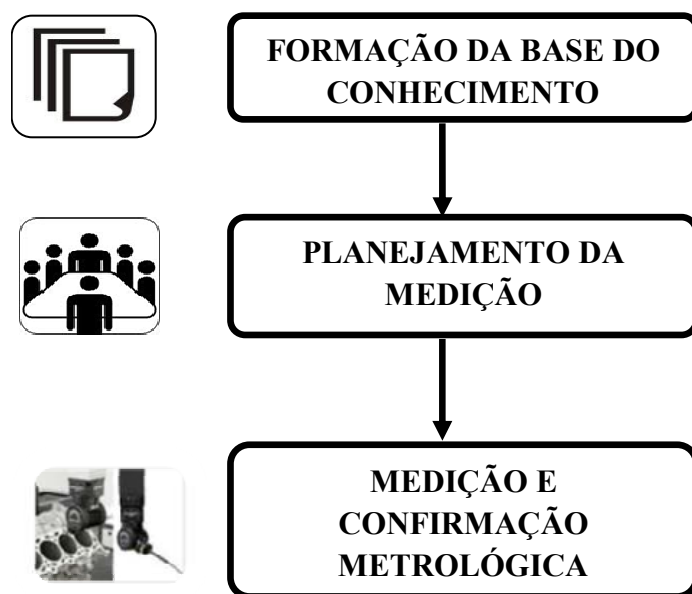


Figura 5.1 – Módulos que caracterizam a sistemática proposta

5.3.1 Formação da base do conhecimento

Esse módulo consiste de uma base de informações preferencialmente documentada, oriunda da análise das questões detalhadas a seguir:

- a) Interação entre os setores de metrologia, de projeto e o de fabricação.

A discussão de aspectos de projeto, de fabricação e de metrologia das características do produto ainda na fase de desenho e desenvolvimento é fundamental. Como mostrado na figura 1.8, no primeiro capítulo deste trabalho, grande parte dos desvios com referência à qualidade desejada pelo cliente surge na etapa de desenvolvimento do produto, onde se exige alta exatidão das medições e um profundo conhecimento da função da peça e suas cotas críticas. Esses erros são transferidos ao longo da cadeia de desenvolvimento do produto cabendo uma atitude mais preventiva do que corretiva nessa cadeia.

Nas visitas realizadas se constatou que as pessoas responsáveis pelas áreas de metrologia, de projeto e fabricação têm consciência da importância dessa interação, mas, o que normalmente se verifica é que a discussão ocorre por uma reação a problemas na fabricação ou desenho do produto, usualmente detectados pelo setor de metrologia. Sugere-se que as pessoas encarregadas de compor esse grupo de estudo tenha profundo conhecimento do assunto da sua área e livre acesso e reconhecimento entre funcionários e a alta administração.

Entre os benefícios dessa interação pode-se citar:

- alinhamento de objetivos de cada setor focados na função do produto;
- uniformização de termos e conceitos das diversas áreas e em especial de metrologia. Nas visitas, verificou-se que o vocabulário internacional de metrologia (INMETRO, 2009) ainda é pouco utilizado.
- melhor entendimento dos fatores de influências de cada fase de produção do produto com respeito à avaliação da conformidade.

b) Relacionamento com cliente e fornecedor e documentação (incluindo registros)

Esse item ressalta a importância de se sistematizar as atividades de avaliação da especificação definidas pelo cliente e que tais discussões sejam documentadas uma vez que cada pedido é formalmente um contrato entre as partes. Entre os inúmeros aspectos a serem atendidos destaca-se, a evidência formal da conformidade do produto com as especificações.

Entre as empresas visitadas constatou-se que a atividade de medição por coordenadas é mais intensa na medição rotineira para aprovação das primeiras peças para produção diária e para o controle de algumas cotas críticas com o objetivo de monitorar a estabilidade do processo de produção. A medição mais detalhada e a discussão sobre os resultados e sobre o desenho técnico ocorrem normalmente na fase de desenvolvimento do produto ou de aprovação da amostra da peça para ser enviada ao cliente.

Essas constatações concordam como o trabalho de VIEIRA (2006), que investigou a relação fornecedor-cliente sob o foco da metrologia. Segundo VIEIRA (2006), essa relação ocorre através das avaliações dos protótipos e amostras iniciais, além do processo de aprovação de peça de produção denominado de PPAP, definido na especificação técnica ISO/TS 16949 (2009). Esse documento define os requisitos do sistema de garantia da qualidade baseados na ISO 9001:2008 sendo aplicável nas empresas do setor automotivo.

Com respeito à documentação formal e registro das atividades de medição, sugere-se a sistemática de registrar minimamente informações que permitam repetir a medição dentro de uma condição próxima àquela feita anteriormente. Isso inclui: operador; temperatura de medição e estratégia de medição. O que se constatou nas empresas visitadas foi o registro eletrônico das medições através do modelo de relatório do programa computacional da máquina de medir, que não contempla as condições ambientais de medição, com uma estrutura de apresentação do relatório eletrônico que dificulta uma rápida consulta ou mesmo uma análise detalhada. Esse fato pode ser crítico quando se está na fase de desenvolvimento do produto, onde as medições precisam ser mais detalhadas. Recomenda-se uma organização dos arquivos por cliente e tipo de peça medida.

A despeito da importância dos registros da estratégia de medição e dos resultados para análise e melhoria, verificou-se na maioria das empresas pesquisadas que essas informações não são solicitadas pelos clientes e, portanto ficam arquivadas eletronicamente. A empresa do setor automotivo visitada realiza sistematicamente estudo de repetitividade e reprodutibilidade na máquina de medir e de alguns instrumentos convencionais como o medidor interno com relógio. Também utilizam cartas de controle estatístico da qualidade para acompanhar o processo de produção.

Também se sugere para a formação da base do conhecimento a manutenção atualizada de um acervo de normas, catálogos, livros e de desenhos técnicos para todos os envolvidos com medição. A forma, o meio de disposição e a localização desse acervo é uma decisão da empresa. Nesse ponto, verificou-se em todas as empresas visitadas o uso de documentos em meio eletrônico e em papel e a afirmação que são feitas regularmente cópias de segurança dos registros de medição eletrônicos.

c) Recursos computacionais e equipamentos de medição

Outra constatação pelos assuntos estudados e visitas as empresas é a dificuldade de transferência de dados entre os diversos programas computacionais utilizados nas empresas. Mais especificamente com relação à importação, exportação e edição de dados medidos e desenhos em 3D no programa de medição da máquina de medir por coordenadas.

Praticamente todos os fabricantes de máquinas de medir por coordenadas possuem programas para comparação de superfícies com modelo CAD, relatório estatístico, digitalização de peças, medição de engrenagens e de pás de hélice entre outros. Entretanto,

esses módulos são fornecidos separadamente em função da necessidade do usuário que muitas vezes desconhece as potencialidades e limitações do programa adquirido.

Os formatos de arquivos mais comuns pesquisados nos diversos programas comerciais instalados nas máquinas de medir são: VDA-FS (*.vda), IGES (*.ige, .igs) STEP (*.stp), Solidworks (*.sldpr); Parasolid (*.x_t), Unigraphics (*.prt); CATIA (*.fic, *.dvl) e Pro-E (*.prt).

A recomendação é identificar as potencialidades do programa da máquina de medir e as necessidades atuais e futuras. Outros programas comerciais para modelamento de sólidos 3D e para superfícies são comuns no setor de projeto da empresa. Eles podem ser uma opção para a avaliação de desvios entre os pontos extraídos e o modelo digital 3D.

Com respeito à infra-estrutura de equipamentos de medição, a recomendação é identificar todos os acessórios e instrumentos auxiliares disponíveis que podem ser úteis na medição por coordenadas. Isto inclui, por exemplo, dispositivos de fixação, cantoneiras de precisão, cilindros padrão, mesa divisora, régua de granito, blocos padrão, etc. Apesar de a empresa dispor de controle patrimonial, é uma boa prática identificar a localização desses dispositivos e instrumentos na empresa para utilização quando necessário.

d) Análise da peça

O objeto a medir pode induzir erro no processo de medição decorrente, por exemplo, da sua geometria, tamanho, peso, rigidez e de fatores externos à peça como a especificação geométrica no desenho técnico.

Portanto, esse item envolve a coleta de informações relacionadas com:

- Características intrínsecas da peça:

Normalmente compreende a forma da peça, peso, material e as propriedades termomecânicas do material (coeficiente de expansão térmica e módulo de elasticidade).

A forma da peça (sua geometria) deve ser considerada para definição da estratégia de medição. A forma da peça influencia na definição da quantidade e distribuição de pontos sobre a superfície a medir. A dimensão da peça também deve ser analisada, pois dimensão além da capacidade volumétrica da máquina pode exigir sistema de fixação específico, nova montagem e concatenação de sistemas de coordenadas para medição das cotas do desenho. Peças com dimensões reduzidas também podem exigir fixações especiais e cuidados com deformação causada pela força de apalpação.

O peso da peça deve ser considerado no planejamento da medição uma vez que pode causar deformação excessiva na máquina e na própria peça em função da posição de fixação.

A rigidez da peça deve ser observada, pois pode exigir cuidados especiais na fixação, na força de apalpação e na distribuição dos pontos sobre a superfície, particularmente para peças flexíveis e delgadas (peças plásticas ou estampadas).

As deformações de origem térmicas podem induzir erros na medição pela dilatação não homogênea da peça. Não há como alterar o coeficiente de dilatação térmica da peça e, portanto, nas situações que exigem maior rigor dimensional, recomenda-se o controle das condições ambientais da sala de medida.

- Características funcionais:

Esse item compreende a identificação das características funcionais e geométricas da peça, das tolerâncias dimensionais e geométricas e dos processos de fabricação envolvidos. Essas informações são importantes para o planejamento da medição.

A equipe formada por pessoal da metrologia, fabricação e da área de projeto deverá analisar que a função da peça e que características da peça são críticas para o cumprimento dessa funcionalidade. Isto pode incluir, por exemplo, folga mínima para encaixe entre peças, planeza entre faces, batimento circular, etc. Por conseguinte, deverão ser discutidos os tipos de tolerâncias e suas magnitudes.

As tolerâncias definidas são resultantes das imperfeições geométricas das máquinas ferramentas. O conhecimento dessas fontes de erros auxilia na definição de ações preventivas para minimizar as variações do processo de fabricação que se refletem nas variações dimensionais e geométricas da peça.

- Desenho e projeto da peça

As informações contidas nos desenhos técnicos e no projeto detalhado da peça devem ser claras, objetivas e sem ambigüidades. Tolerâncias inconsistentes e referências de medição inadequadas contribuem para o aumento de retrabalhos, peças refugadas e conflitos entre fornecedor e cliente.

Nas visitas realizadas nas empresas foram constatadas exigências de valores de tolerâncias incompatíveis com a capacidade do processo de fabricação e falta de referências nos desenhos ou definição inadequada. Para algumas empresas que recebem o desenho do produto pronto, verificou-se que possuem liberdade para definição da

estratégia de medição e registros dos resultados. Entretanto, também foi constatado, em algumas situações, mudança nas exigências por parte do cliente com respeito ao que medir, sugerindo que pode existir falha de informação entre as partes.

Para as empresas que desenvolvem produtos, a interação entre fornecedor e cliente é crucial para evitar tomada de decisões que impactem negativamente na qualidade do produto. Situações como tolerâncias muito largas ou muito apertadas, definição inadequada do alinhamento da peça e a medição de características que não estejam bem cotadas ou que não representam a função e a montagem da peça, não terá significado, incorrendo em maiores custos e desperdício de tempo.

5.3.2 Planejamento da medição

O planejamento da medição envolve as informações relevantes obtidas do módulo “Formação da base do conhecimento” que contribuem para a elaboração da estratégia de medição e o relatório de medição. Portanto, informações sobre a função da peça, processo de fabricação, cotas críticas e tolerâncias especificadas, características da peça e outras informações como normas e requisitos adicionais do cliente são utilizados nessa fase.

Não há um modelo único para se planejar uma medição e tampouco se padronizar a estratégia na medição por coordenadas. Os procedimentos devem levar em conta o nível de detalhe de informações e requisitos do cliente e os requisitos constantes no sistema de garantia da qualidade da empresa conforme sua certificação. Por exemplo, para empresa fornecedora de peças para montadora automotiva é usual ter pelo menos as seguintes certificações: ISO 9001 (qualidade), ISO/TS 16949 (automotiva) e ISO 14001 (ambiental).

No setor automotivo, segundo relato de VIEIRA (2006), há falhas no relacionamento entre fornecedor e cliente com respeito à elaboração do plano de medição. VIEIRA (2006) afirma que o plano de medição deveria ser encaminhado aos fornecedores juntamente com o desenho do produto, antes mesmo da seleção do fornecedor. Essa é uma prática pouco comum e não foi evidenciado na empresa visitada do setor automotivo.

Portanto, neste trabalho parte-se do pressuposto que não há um plano de medição, conforme se descreve neste trabalho, disponível para o fornecedor e que o mesmo deverá construí-lo em comum acordo com o cliente.

Na tabela 5.2 constam aspectos importantes que deverão ser considerados no planejamento de cada tarefa de medição em máquina de medir por coordenadas. Os aspectos e tarefas apresentados na tabela não são exaustivos, isto é, outros aspectos poderão ser incluídos como, por exemplo, requisitos contratuais entre fornecedor e cliente.

Tabela 5.2 – Aspectos a serem considerados na elaboração do planejamento da medição (adaptado de BRITO, 2003)

TAREFAS	ASPECTOS A SEREM CONSIDERADOS									
	Geometria da peça	Micro e macro geometria da peça	Programa de medição	Características da peça (massa, rigidez, material, dureza, etc.)	Projeto da peça (cotas funcionais, referências, etc.)	Incerteza da máquina de medir	Nível de incerteza desejado	Qualificação Recursos humanos	Tempo de medição	
	Posição da peça no volume da MMC	X					X	X	X	
	Fixação da peça	X			X	X			X	
	Seleção do apalpador	X	X		X				X	
	Diâmetro do sensor	X	X						X	
	Haste e comprimento do apalpador	X							X	
	Velocidade de apalpação	X			X			X	X	X
	Força de apalpação				X			X	X	
	Acessórios de fixação	X							X	
Sistema de coordenadas (alinhamento)					X			X		
Referências (datuns)		X			X			X		
Definição do número de pontos	X	X					X	X	X	
Distribuição dos pontos de medição	X	X					X	X		
Seleção do algoritmo de avaliação	X		X				X	X		
Temperatura de medição				X			X	X		
Número de medições							X	X	X	
Avaliação da incerteza						X	X	X		

Na figura 5.2 consta uma representação das informações gerais que compõem o módulo “Formação da base do conhecimento” e do módulo “Planejamento da medição”. Cada bloco pode estar relacionado em maior ou menor grau com outros blocos de informações.

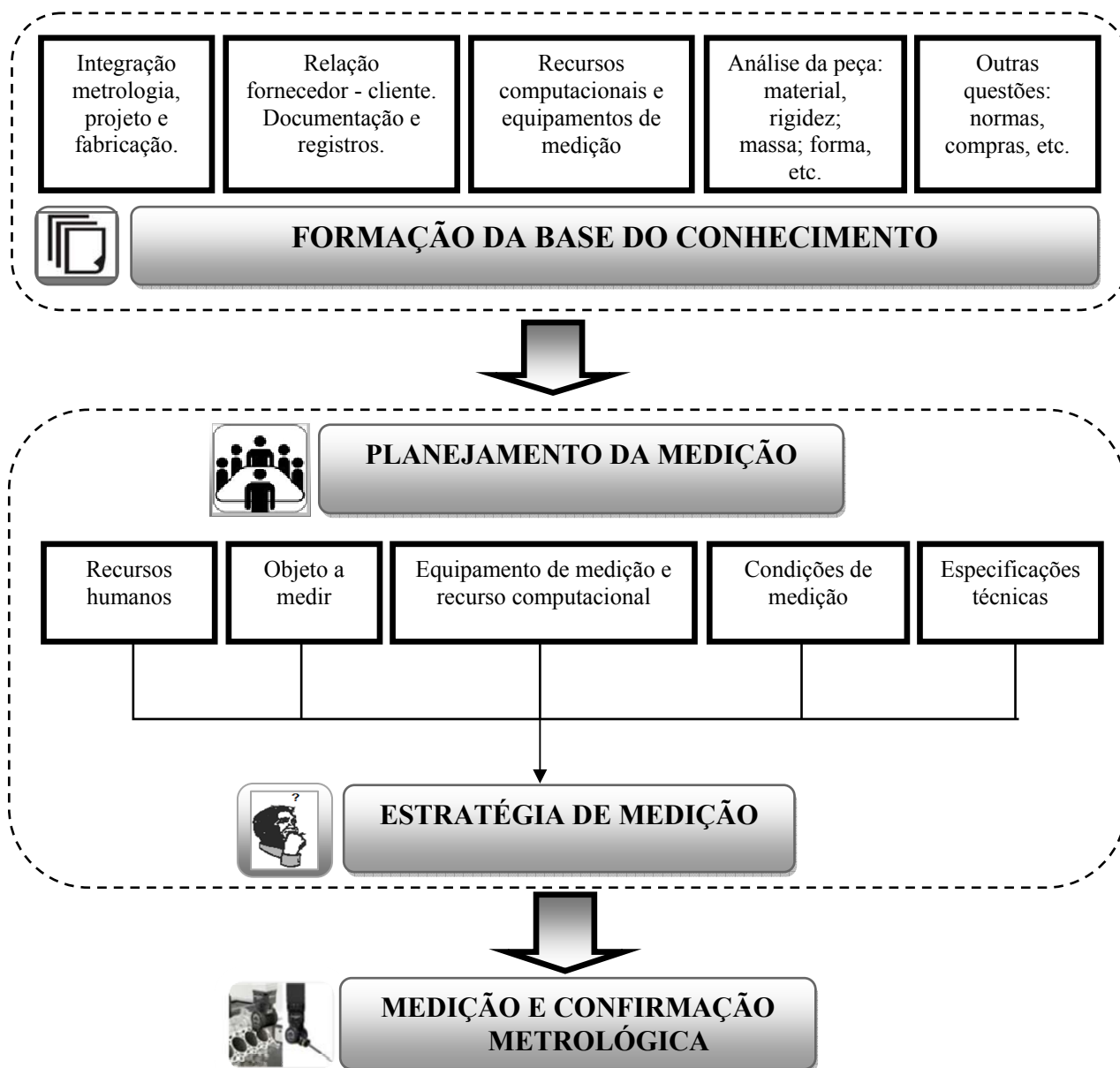


Figura 5.2 - Informações gerais que compõem os módulos “Formação da base do conhecimento” e “Planejamento da medição”.

5.3.3 Estratégia de medição

Após a discussão e entendimento de todos os aspectos que compõem o planejamento da medição, a tarefa seguinte é a elaboração da estratégia de medição para cada característica a ser medida. Na figura 5.3 constam os aspectos a serem considerados na elaboração da estratégia de medição e sequência da medição por coordenadas.

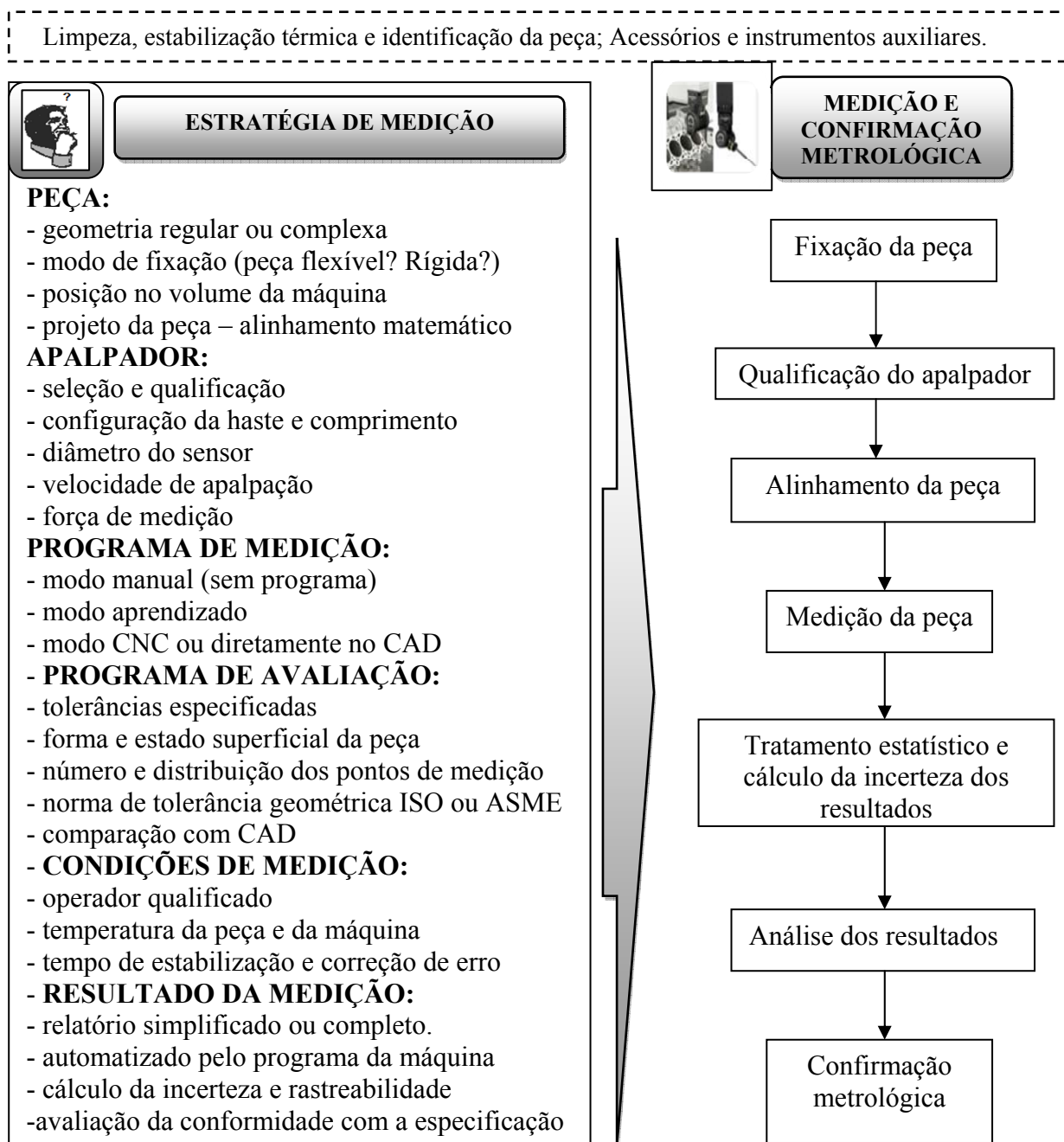


Figura 5.3 – Aspectos a serem considerados para estratégia de medição e sequência da medição por coordenadas.

Pela figura 5.3 apresentada verifica-se a diversidade de fatores que devem ser analisados para se estabelecer uma estratégia de medição adequada. Portanto, não é possível padronizar a estratégia de medição para todas as situações possíveis, uma vez que para elementos geométricos diferentes existirão estratégias de medição distintas. A medição deve, portanto, ser orientada à característica do elemento geométrico a ser medido. Ainda assim, para um mesmo elemento geométrico como um furo, por exemplo, existirá estratégia de medição distinta quando se deseja saber seu diâmetro e posição e quando se deseja saber seu erro de circularidade. Entretanto, na tabela 5.3 constam algumas orientações para as tarefas usuais na medição por coordenadas, oriundas do estudo teórico, normas e recomendação de especialistas.

Tabela 5.3 - Orientações para as tarefas usuais na medição por coordenadas.

TAREFA	RECOMENDAÇÕES
Fixação da peça	- A fixação deverá garantir que a peça não se desloque durante a medição devido à força de apalpação; - O acesso às características a serem medidas seja feito preferencialmente em uma única montagem; - Sistema de coordenadas da peça alinhado aos eixos coordenados da máquina.
Força e velocidade de apalpação	- Mesma utilizada no processo de qualificação do apalpador; - Baixa força de apalpação para medição de peça pouco rígida.
Número e distribuição de pontos de medição	- Como regra geral quanto mais pontos medidos melhor; - Se a superfície da peça está em bruto, mais pontos de medição devem ser coletados; - Nas peças rígidas e com baixo erro de forma, a distribuição dos pontos não é crítica. O contrário é verdadeiro; - Nas peças estampadas, lanternas, painéis, etc. quando a medição é feita por comparação como modelo CAD, o alinhamento 3-2-1 pode ser feito nas referências e posteriormente coletado um número suficiente de pontos para comparação; - Observar o número de pontos e sua distribuição definidos na norma inglesa BS 7172.
Diâmetro do sensor	- Como regra geral utilizar o maior diâmetro; - Utilizar diâmetro de ponta pequena quando houver maior interesse no erro de forma da peça; - Para peças com superfície em bruto, utilizar diâmetro da esfera maior.

Tabela 5.3 - Orientações para as tarefas usuais na medição por coordenadas (continuação).

TAREFA	RECOMENDAÇÕES
Haste e comprimento do apalpador	- Utilizar uma configuração de haste mais simples possível; - Utilizar uma configuração curta e rígida. Quanto mais longa a configuração do apalpador, maior a flexão e erro de apalpação; - Quando for necessário utilizar haste mais longa, deve verificar se a incerteza de medição atende a tolerância especificada da característica medida; - Se for utilizar haste longa, deve-se aumentar a força de medição para evitar a comutação do apalpador.
Alinhamento da peça	- O alinhamento deve seguir a seqüência definida pelas referências (datums) no desenho; - Quando não existir referências no desenho, analisar de onde partem as cotas ou qual é a seqüência de montagem da peça; - Quando os erros de forma e a rigidez da peça são críticos utilizam-se elementos de referência externos à peça (mesa da máquina, contra-peça, esquadros, etc.)
Algoritmo de avaliação	- Método por mínimos quadrados é adequado para o cálculo das referências de alinhamento e para qualquer elemento geométrico que não tenha erro de forma elevado; - O método de Mínimo/Máximo deve ser utilizado para condição de montagem. Uma quantidade maior de pontos deve ser utilizada para o ajuste; - O método Chebychev deve ser utilizado quando a medição objetiva determinar os erros de forma.
Seleção da posição da peça no volume da máquina	- Peça próxima as escalas da MMC que não disponha de programa para correção automática de erros geométricos; - Local com menor incerteza de medição; - Uso de técnicas para avaliação à priori do local com menores níveis de incerteza.

Com respeito ao relatório de medição, este deve ser claro e adequado às necessidades do cliente, seja ele interno ou externo. No último caso, o relatório é usualmente mais completo. O relatório deve também possuir informações suficientes que permita a repetição da medição dentro das condições próximas à inicial. Outra questão importante é explorar toda capacidade de automatização do programa de medição da máquina de medir para elaborar o relatório, evitando o uso de programas externos para esse fim.

5.3.4 Medição e confirmação metrológica

O procedimento de medição, definido a partir do planejamento da medição, segue o estabelecido pelo fluxograma da figura 5.3. A qualificação do metrologista é fundamental para garantia da qualidade dos resultados da medição, de modo que o processo de medição somente deve ser continuado se não houver dúvidas em cada etapa.

O termo confirmação metrológica utilizado neste trabalho compreende as ações para confirmar se o processo de medição realizado atende as especificações de tolerância estabelecidas ou limites de variabilidade do processo de fabricação. Para tanto, são realizados estudos de avaliação da incerteza do processo de medição através de documentos da ISO ou através de estudos de repetitividade, reprodutibilidade e estabilidade constantes no manual MSA (documento complementar a norma ISO/TS 16949).

Quando a incerteza do processo de medição satisfizer o critério especificado pelo cliente ou norma, o processo de medição é dito validado ou se confirmou metrologicamente aquele processo de medição. Outra atividade importante é a confirmação operacional do processo de medição que compreende a análise da praticidade e rapidez do procedimento definido em relação às limitações de tempo e recursos disponíveis.

CAPÍTULO VI

APLICAÇÃO DA SISTEMÁTICA PROPOSTA

6.1 INTRODUÇÃO

Como afirmado no capítulo 5 deste trabalho, a implementação de uma sistemática ou metodologia necessita ser testada para sua validação operacional e metrológica. Adicionalmente, os testes experimentais realizados foram importantes para a identificação de limitações da sistemática e oportunidades de melhorias.

Entre as dificuldades encontradas ao longo do trabalho, a limitação de tempo para uso da máquina nas empresas/laboratórios e a confidencialidade das informações são exemplos que tiveram que ser vencidos, em todo ou em parte, para conclusão deste trabalho.

Este capítulo apresenta as peças selecionadas para medição que auxiliaram na construção e validação da sistemática proposta neste trabalho. As peças foram selecionadas considerando sua complexidade de medição, interesse da empresa participante do estudo e disponibilidade do desenho em CAD da peça. Para cada peça selecionada é discutida a sistemática proposta em detalhes.

As medições foram realizadas no Laboratório da empresa participante do estudo de caso.

6.2 Experimento 1

O objetivo principal desse experimento foi medir os principais parâmetros de uma de uma engrenagem cilíndrica de dentes retos de aço, utilizando a metodologia proposta neste trabalho. A engrenagem é utilizada como gabarito para avaliação em processo do fresado interno no cubo de roda conforme apresentado na figura 6.1, onde as cotas foram propositalmente retiradas por solicitação da empresa participante do estudo de caso, mas que não prejudicam o objetivo do trabalho.

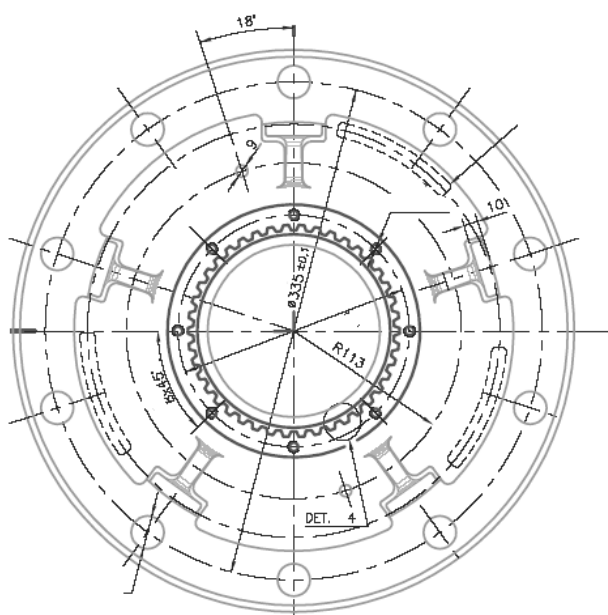


Figura 6.1 – Vista superior e detalhe do fresado do cubo de roda

As principais tarefas realizadas neste experimento foram:

- Análise do desenho da engrenagem, suas características e preenchimento do formulário da estratégia de medição que consta nos anexos deste trabalho;
- As características selecionadas para medição da engrenagem foram baseadas na norma alemã DIN 3961 que é mais rigorosa em termos de tolerâncias que a norma ISO 1328-1-2. Entretanto, ambas estão alinhadas em termos de conceitos e simbologia;
- Avaliação das tolerâncias de projeto e dos limites de processo de fabricação e da incerteza do processo de medição por coordenadas;

- Verificação da existência de estudos de Repetitividade e Reprodutibilidade da peça uma vez que a empresa é certificada pela norma ISO/TS 16949 para o setor automotivo;

- Análise dos procedimentos de fixação, localização da peça sobre a máquina e dos pontos de medição e alinhamento.

Na figura 6.2 consta a foto da engrenagem padrão montada sobre uma placa de três castanhas na mesa da máquina de medir por coordenadas no laboratório da empresa.



Figura 6.2 – Medição da engrenagem selecionada para o experimento 1

Na tabela 6.1 constam os dados gerais da engrenagem medida extraídos do desenho técnico.

Tabela 6.1 – Dados da engrenagem padrão cilíndrica externa

DADOS DA ENGRENAGEM CILÍNDRICA EXTERNA		
Termos	Símbolos	Valores nominais
Numero de dentes	z	35
Módulo	m_n	3,150 mm
Angulo de pressão	α	25,000 °
Largura da face	b	15,000 mm
Diâmetro primitivo	d_a	113,600 mm
Espessura dos dentes	s_n	4,9480 mm

Na tabela 6.2 constam os parâmetros medidos e seus respectivos valores admissíveis extraídos do desenho técnico.

Tabela 6.2 – Parâmetros e valores admissíveis da engrenagem

PRINCIPAIS PARÂMETROS MEDIDOS		
Parâmetros	Símbolos	Valor admissível (mm)
Desvio de passo total	Fp	0,030
Desvio de passo individual	f _{pt}	0,010
Desvio total de perfil	F α	0,025
Desvio total da linha de flanco	F β	0,020

Na tabela 6.3 constam as condições de medição da engrenagem selecionada para o estudo de caso.

Tabela 6.3 – Condições de medição da engrenagem cilíndrica de dentes retos

CONDIÇÕES DE MEDIÇÃO	
Termos	Valores
Diâmetro da esfera de medição (mm)	1,9975
Numero de dentes medidos	35
Numero de pontos medidos por passo	1
Numero de pontos medidos por linha de flanco	10
Numero de pontos medidos por perfil	12
Diâmetro mínimo do perfil medido (mm)	109,0116
Temperatura média da medição (°C)	22,0

A medição foi realizada numa máquina de medir Mitutoyo modelo BLN C710 com faixa nominal 700x1000x500 mm com cabeçote PH-10M e apalpador TP-2. O programa computacional para medição da engrenagem foi o Gearpak versão 2.4 com o GeopakWin versão 2.4 R8.

A realização da medição exige que sejam introduzidos no programa os principais parâmetros de projeto da engrenagem tais como número de dentes, módulo normal, ângulo

de pressão, ângulo de hélice entre outros. À medida que esses parâmetros são informados, o programa calcula os demais parâmetros necessários para a medição.

Nessa fase é fundamental dispor das informações de projeto da engrenagem e as tolerâncias dos parâmetros a serem medidos. De posse dessas informações, o programa pode emitir um relatório com a comparação entre os valores de projeto e os valores medidos.

É usual o controle apenas de quatro a sete dentes da engrenagem. Neste caso, optou-se em medir todos os dentes por ser uma engrenagem utilizada como padrão (gabarito) e por se tratar da primeira avaliação da engrenagem em máquina de medir.

A engrenagem foi alinhada utilizando a face plana superior para o alinhamento do eixo “Z” e o furo central para definição da origem do sistema de coordenadas “XY”. Não foram avaliados erros de forma dos elementos selecionados para o alinhamento uma vez que a engrenagem é retificada.

Na tabela 6.4 constam os resultados dos desvios de perfil máximos informados pelo programa computacional que correspondem aos dentes de número 33 e 14.

Tabela 6.4 – Resultados da medição do desvio de perfil

Valores Máximos (μm)			
	Fa Desvio total de perfil	Ffa Desvio de forma de perfil	fHa Desvio angular de Perfil
Perfil esquerdo	18,6	11,1	-13,3
Perfil direito	8,7	8,8	-3,3

Na figura 6.3 constam os resultados dos desvios de perfil máximos informados pelo programa computacional que correspondem aos dentes de número 33 e 14. Os valores estão em micrometros.

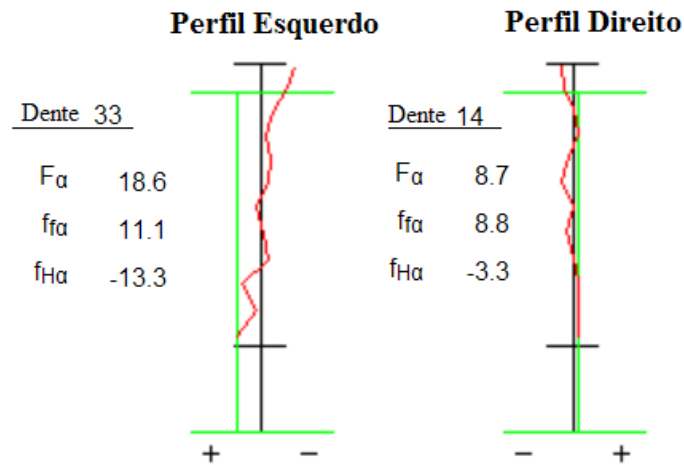


Figura 6.3 – Gráfico dos desvios de perfil da engrenagem

Na tabela 6.5 constam os resultados dos desvios de flanco máximos informados pelo programa computacional que correspondem aos dentes de número 07 e 15.

Tabela 6.5 – Resultados da medição do desvio de flanco

Valores Máximos (μm)			
	Fβ Desvio total da linha de flanco	Ffβ Desvio de forma da linha de flanco	fHβ Desvio angular da linha de flanco
Linha de flanco esquerdo	10,1	9,8	8,2
Linha de flanco direito	10,8	8,1	9,7

Na figura 6.4 constam os resultados dos desvios de linha de flanco máximos informados pelo programa computacional que correspondem aos dentes de número 07 e 15. Os valores estão em micrometros.

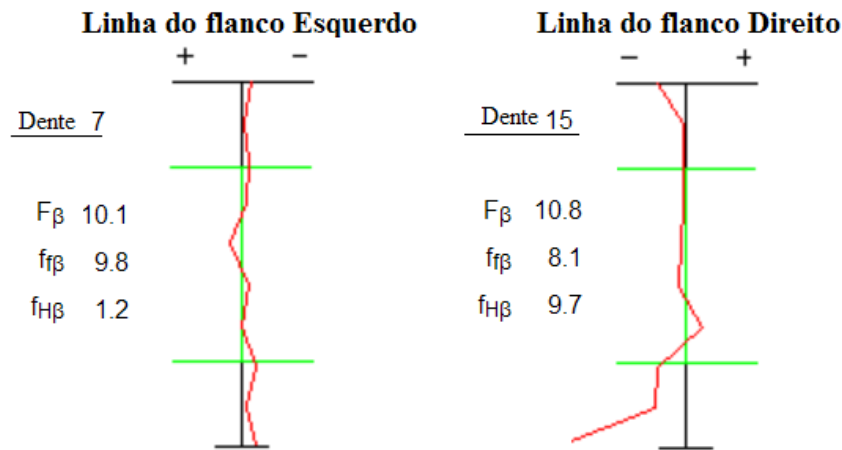


Figura 6.4 – Gráfico dos desvios de flanco da engrenagem

Na tabela 6.6 constam os resultados dos desvios máximos de passo informados pelo programa computacional.

Tabela 6.6 – Resultados da medição do desvio de passo

	Valores Máximos (μm)	
	F_p Desvio total de passo	f_{pt} Desvio de passo individual
Desvios de passo direito	47,2	8,5
Desvios de passo esquerdo	48,6	24,1

O programa também fornece os desvios de passo individual, acumulado e total no relatório automatizado. Esses dois últimos são calculados a partir dos desvios dos passos individuais.

Segundo GEMAQUE (2004), o passo total é mais importante, pois fornece o desvio entre dois flancos de dentes quaisquer, ou seja, o maior desvio possível entre dois dentes.

Nas figuras 6.5 e 6.6 constam os gráficos dos resultados dos desvios em milímetros de passo individual à esquerda e à direita informado pelo programa computacional. Os gráficos foram elaborados no Excel® para uma melhor visualização dos desvios.

Nesses gráficos, cada retângulo corresponde ao desvio de passo individual obtido pela máquina de medir por coordenadas. Os retângulos com valores na ordenada positiva significam que os flancos estão adiantados em relação ao seu valor teórico, e vice-versa, um flanco atrasado em relação ao seu valor teórico é representado por retângulo com valor na ordenada negativa do gráfico.

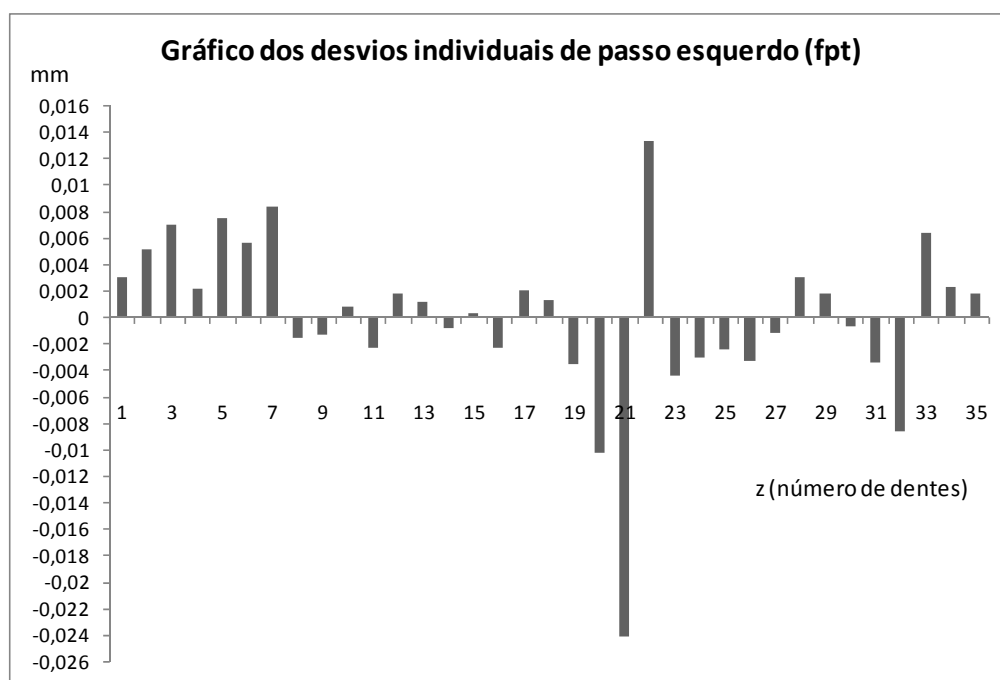


Figura 6.5 – Gráfico dos desvios individuais de passo esquerdo

Nos gráficos dos desvios individuais pode-se verificar uma distribuição relativamente igual dos desvios positivos e negativos indicando respectivamente que podem ocorrer acelerações e desacelerações no engrenamento. Na figura 6.5 o desvio para o dente 21 apresenta um valor atípico em relação aos demais. A causa pode ser sujeira ou algum ponto oxidado na engrenagem especificamente no ponto apalpado.

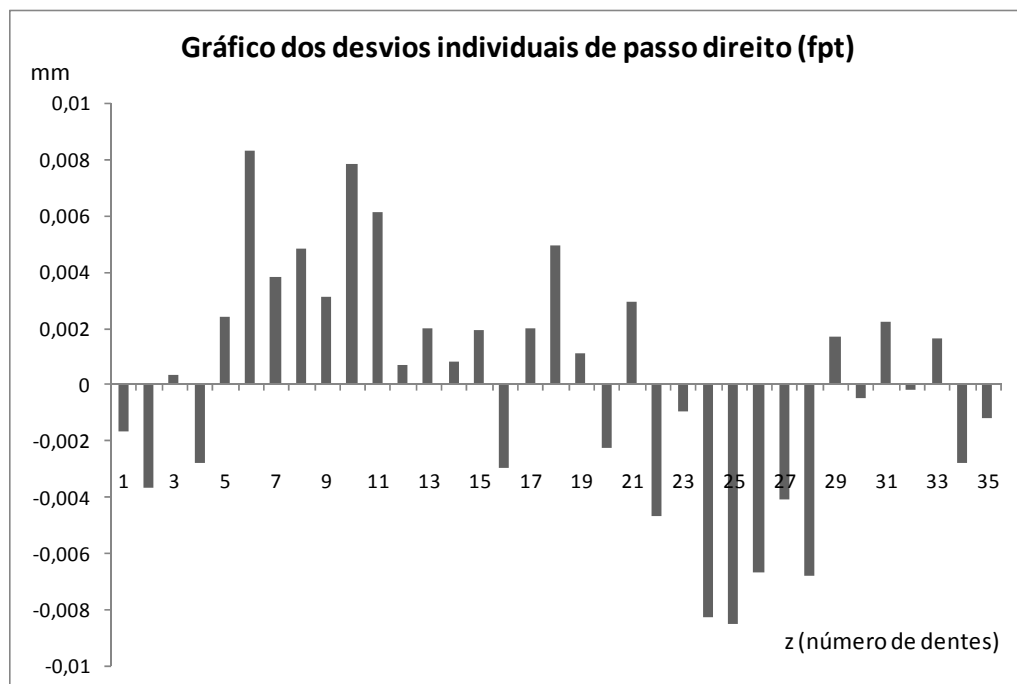


Figura 6.6 – Gráfico dos desvios individuais de passo direito

Na figura 6.7 está representado o desvio de passo individual positivo medido no flanco esquerdo, indicando que o flanco está adiantado com relação ao seu valor teórico marcado em vermelho.

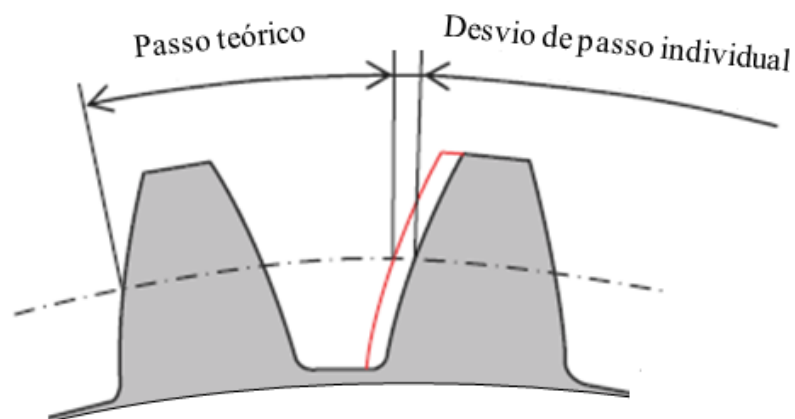


Figura 6.7 – Representação do desvio de passo individual

Nas figuras 6.8 e 6.9 constam os gráficos dos resultados dos desvios acumulado e total, em milímetros, de passo à direita e à esquerda informado pelo programa computacional. Esses dois parâmetros são calculados a partir dos desvios dos passos individuais.

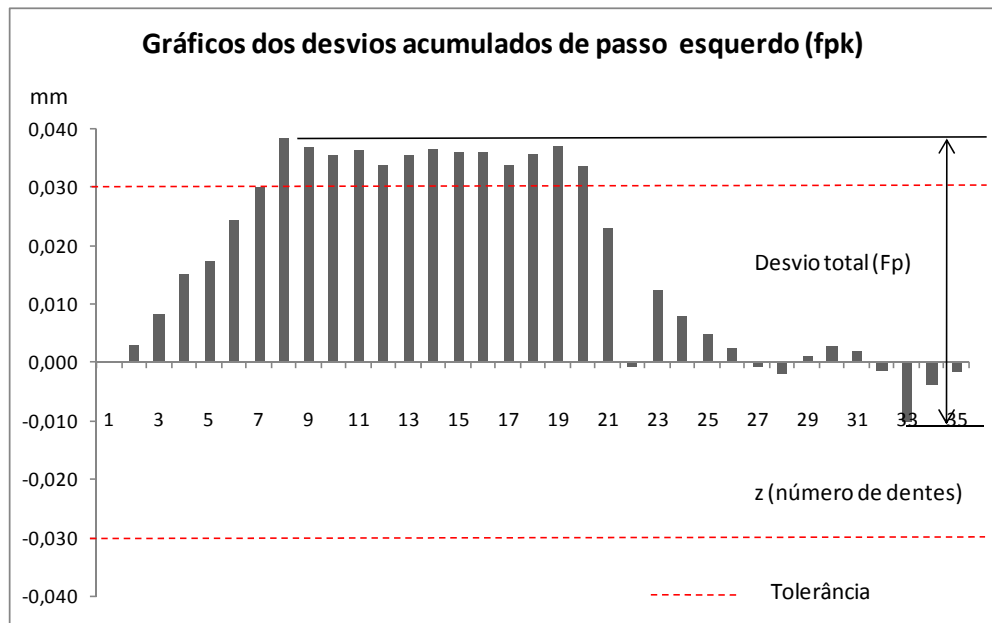


Figura 6.8 – Gráfico dos desvios acumulados de passo esquerdo

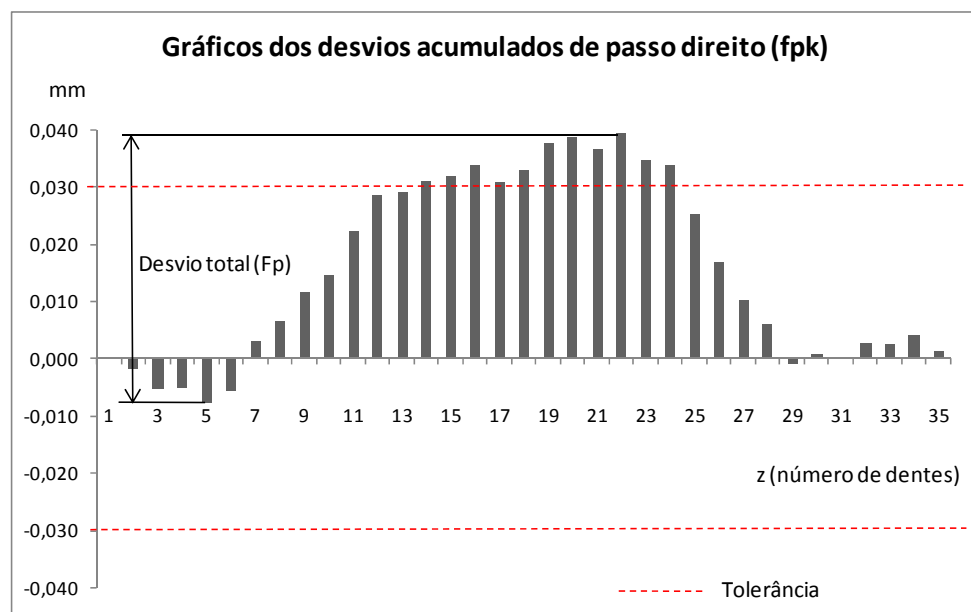


Figura 6.9 – Gráfico dos desvios acumulados de passo direito

Nos gráficos das figuras 6.8 e 6.9 e pela tabela 6.6, verifica-se que o desvio total de passo ficou acima dos limites especificados na tabela 6.2. Por questão de tempo disponível para uma nova medição na empresa, ficou acertado que a engrenagem será encaminhada para um laboratório de metrologia com máquina de medir de referência para uma comparação de resultados e para fazer cumprir o requisito de rastreabilidade metrológica aos padrões nacionais. Outro ponto de melhoria proposto é a realização de estudos de repetitividade e reprodutibilidade (R&R) nas engrenagens a serem produzidas para se avaliar a capacidade do sistema de medição, no caso a MMC, para medição das características de interesse.

Entretanto, com o objetivo de demonstrar a aplicabilidade na indústria da avaliação da incerteza de medição com base no ISO-GUM (1995) nas normas ISO/TS 14253 partes 1 e 2, foi realizada a avaliação de incerteza para a medição do desvio de perfil. As planilhas apresentadas nas figuras 6.10, 6.11 e 6.12 podem ser aplicadas para todas as características críticas medidas e permite uma análise gráfica do efeito da incerteza de medição do processo de medição sobre a zona de tolerância especificada no projeto. Na figura 6.10 consta a planilha de entrada de dados gerais.

ESTIMATIVA DA INCERTEZA NO PROCESSO DE MEDIÇÃO BASEADA NO ISO GUM							
ENTRADA DE DADOS						DATA:	9/11/2010
DADOS GERAIS							
PEÇA:	ENGRENAGEM CILÍNDRICA	CÓDIGO	XXXX	CARACTERÍSTICA A SER MEDIDA		desvio de perfil	UNIDADE
							mm
LIMITES DE ESPECIFICAÇÃO		Nominal:	0,0000	Afast. Inferior	0,0125	Afast. Superior	0,0125
LIMITES DE ESPECIFICAÇÃO INFERIOR (LSL)				-0,0125	LIMITES DE ESPECIFICAÇÃO SUPERIOR (USL)		0,0125
MÍNIMA RAZÃO DESEJADA ENTRE A FAIXA DOS LIMITES ESPECIFICADOS E A FAIXA DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO DO PROCESSO							3,0
LOCAL DA MEDIÇÃO		Laboratório de Metrologia por Coordenadas				SETOR RESPONSÁVEL	GQ
COMPONENTES ENVOLVIDOS NO PROCESSO DE MEDIÇÃO DA CARACTERÍSTICA CRÍTICA							
DESCRIÇÃO						INFORMAÇÃO COMPLEMENTAR	
1	Incerteza herdada da MMC					Certificado de calibração	
2	Efeito da temperatura ($\pm 2^{\circ}\text{C}$)					Cálculo estimado	
3	Resolução da MMC					manual da MMC	
4	Desvio padrão experimental da média					medições	
5							
6							
7							
8							
9							
10							
ERROS SISTEMÁTICOS NÃO CORRIGIDOS							
11	Erro máximo na calibração da MMC					Certificado de calibração	
12							
13							
OBSERVAÇÕES							

Figura 6.10 – Planilha de entrada de dados gerais

Na figura 6.11 está apresentada a planilha de cálculo da incerteza do processo de medição.

ESTIMATIVA DA INCERTEZA NO PROCESSO DE MEDIÇÃO BASEADA NO ISO GUM									
PLANILHA DE CÁLCULO						DATA:		9/11/2010	
desvio de perfil		mm		Laboratório de Metrologia por Coordenadas				GQ	
ESTIMATIVA DA INCERTEZA EXPANDIDA ($U_{95\%}$)		DO PROCESSO DE MEDIÇÃO DA VARIÁVEL CRÍTICA				N. CONFIANÇA $\equiv$		95%	
FONTE DE INCERTEZA		ESTIMATIVA DA FONTE DE INCERTEZA	UNIDADE	DISTRIBUIÇÃO	Coef. de Sensibilidade	DIVISOR	INCERTEZA PADRÃO	GRAUS DE LIBERDADE	% (u_i / u_c)
1	Incerteza herdada da MMC	0,00300	mm	Normal	1	2,1	0,00143	INFINITO	51
2	Efeito da temperatura ($\pm 2^{\circ}\text{C}$)	0,00085	mm	Retangular	1	1,732	0,00049	INFINITO	18
3	Resolução da MMC	0,00010	mm	Retangular	1	1,732	0,00006		2
4	Desvio padrão experimental da média	0,00080	mm	Normal	1	1	0,00080		29
5	0						0,00000		0
6	0						0,00000		0
7	0						0,00000		0
8	0						0,00000		0
9	0						0,00000		0
10	0						0,00000		0
					u_c 68% em mm $\Rightarrow$		0,00171		
Graus de liberdades efetivos (ν_{eff}) : INFINITO			k = 2,00				$U_{95\%}$	0,00342	mm
11	Erro máximo na calibração da MMC	0,0019	mm	---	INCERTEZA FINAL DO PROC. MEDIÇÃO			0,0053	mm
OBSERVAÇÕES									

Figura 6.11 – Planilha de cálculo da incerteza do processo de medição.

Pode-se verificar na última coluna da planilha da figura 6.11 que a incerteza herdada do padrão contribui com mais de 50% da incerteza total do processo de medição. Isso resulta do fato que o valor da incerteza utilizado foi o relatado no certificado de calibração que é válido para todo volume de trabalho da MMC. Nas medições específicas com tolerâncias mais estreitas, recomenda-se uma avaliação mais realística da incerteza de medição que pode ser feita com o uso de anel padrão, por exemplo.

Outro aspecto importante que pode ser observado na figura 6.11 é que a incerteza de medição final considera o erro sistemático máximo da MMC. Esse fato é comum na prática industrial uma vez que raramente se faz correção de erros sistemáticos conhecidos. No entanto, pode-se reduzir a incerteza final do processo de medição ao se fazer a correção do erro sistemático quando isso for prático e economicamente viável.

Na figura 6.12 está apresentada a planilha de cálculo dos limites admissíveis da zona de tolerância conforme os fundamentos da norma ISO 14253-1 (1998) e sua relação com a tolerância especificada apresentada na forma gráfica.

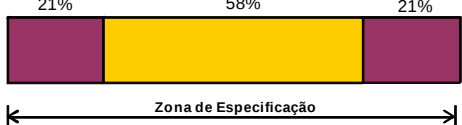
ESTIMATIVA DA INCERTEZA NO PROCESSO DE MEDIÇÃO BASEADA NO ISO GUM			
RESULTADOS		DATA: 9/11/2010	
desvio de perfil	mm	Laboratório de Metrologia por Coordenadas GQ	
INCERTEZA PROCESSO DE MEDIÇÃO ($U_{95\%}$)	0,0053	% DA ZONA DE CONFORMIDADE CONSUMIDA PELA INCERTEZA DO PROCESSO DE MEDIÇÃO 	
ZONA DE ESPECIFICAÇÃO DA CARACTERÍSTICA MEDIDA			
MÍNIMO	-0,0125	MÁXIMO	0,0125
ZONA DE CONFORMIDADE DA CARACTERÍSTICA MEDIDA			
MÍNIMO	-0,0072	MÁXIMO	0,0072
RESULTADOS EM:		mm	
RELAÇÃO MÍNIMA DESEJADA ENTRE A FAIXA DOS LIMITES DE ESPECIFICAÇÃO E A FAIXA DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO DO PROCESSO		3,0	
RELAÇÃO OBTIDA ENTRE A FAIXA DOS LIMITES DE ESPECIFICAÇÃO E A FAIXA DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO DO PROCESSO		2,4	
OBSERVAÇÕES			
A RELAÇÃO ENTRE A TOLERÂNCIA DA CARACTERÍSTICA E A INCERTEZA DO PROCESSO DE MEDIÇÃO NÃO FOI ATENDIDA.			
Recomenda-se reavaliar as fontes de incertezas e repetir o processo até atingir a incerteza alvo que satisfaça a relação estabelecida a priori.			

Figura 6.12 – Planilha de cálculo da relação entre a incerteza do processo de medição e a tolerância especificada.

Verifica-se na figura 6.12 que a zona de tolerância especificada está reduzida de 42% do seu valor inicial por conta da incerteza atual do processo de medição. Isso conduz a uma relação tolerância e incerteza de medição de 2,4 que está abaixo do mínimo definido pela empresa.

A recomendação no caso da engrenagem é avaliar a incerteza de medição da MMC para a tarefa específica e estimar o erro de medição nesta mesma tarefa utilizando peças padrão ou padrões corporificados como blocos padrão ou anéis padrão.

6.3 Experimento 2

Esse experimento consistiu da medição dos principais parâmetros dimensionais e geométricos de um tambor de freio fabricado em ferro fundido com média complexidade geométrica e usinado conforme projeto. Neste caso o processo de medição já está consolidado na empresa, com programa CNC e estudos de repetitividade e reprodutibilidade realizados periodicamente para as características críticas. Na figura 6.13 é apresentado o desenho em três dimensões da peça.

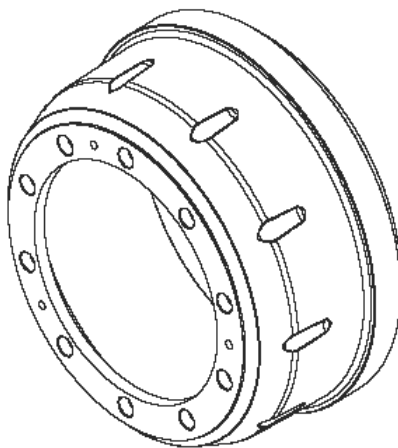


Figura 6.13 – Desenho 3D da peça selecionada para o experimento 2

As principais tarefas realizadas neste experimento foram:

- Análise do desenho da peça, suas características e acompanhamento de medições de rotina no laboratório;
- Pesquisa sobre os estudos de repetitividade e reprodutibilidade (R&R) realizados para esse modelo de peça uma vez que a mesma é produzida regularmente;
- As características selecionadas para medição pela empresa são especificadas pelo cliente, assim como as cotas críticas para estudo de R&R;
- Avaliação das tolerâncias de projeto e dos limites de processo de fabricação e da incerteza do processo de medição por coordenadas;
- Análise dos procedimentos de fixação, localização da peça sobre a máquina e dos pontos de medição e alinhamento.

Na tabela 6.7 constam as especificações técnicas dos parâmetros avaliados que foram extraídas do desenho técnico.

Tabela 6.7 – Especificações técnicas dos parâmetros avaliados

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS PARÂMETROS		
Característica	Valor nominal (mm)	Tolerância (mm)
Diâmetro no ressalto	369 H8	-0,0 / +0,089
Paralelismo face interna/face externa	0,00	±0,06
Planeza face interna furação	0,00	±0,05
Perpendicularidade em relação a referência A	0,00	±0,05
Cilindricidade lona de freio	0,00	±0,05/100
Concentricidade diâmetro lona de freio	0,00	±0,10
Batimento circular axial em relação a referência A	0,00	±0,08

Na figura 6.14 consta a foto do tambor de freio no experimento realizado na máquina de medir por coordenadas.

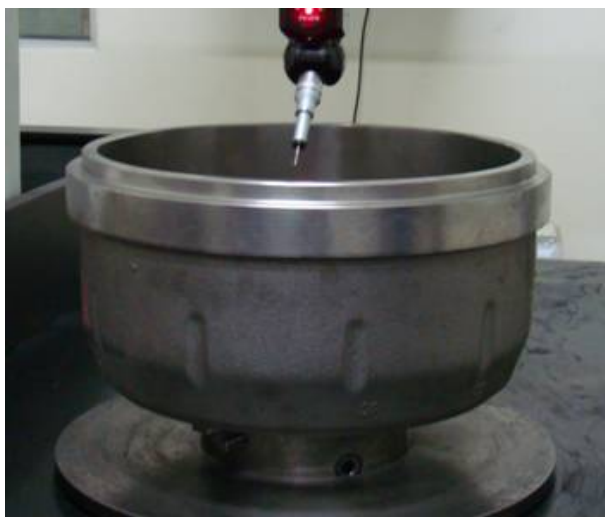


Figura 6.14 – Peça utilizada no experimento de medição na empresa

A medição foi realizada numa máquina de medir Mitutoyo modelo BLN C710 com faixa nominal 700x1000x500 mm com cabeçote PH-10M e apalpador TP-2. O programa computacional foi o GeopakWin versão 2.4 R8.

A peça de ferro fundido é rígida e apresenta relativa complexidade para medição com diversas tolerâncias geométricas para controle. A fixação é realizada no centro da mesa da MMC através de uma placa de três castanhas. O alinhamento é feito no modo automático (CNC). A localização da peça no centro da mesa se deve ao fato dos diâmetros das peças variarem de 300 a 500 mm, limitando o espaço disponível no eixo X da máquina.

A maior tendência informada no certificado de calibração da MMC foi de -0,0019 mm na sua diagonal denominada de E4 para o ponto 410 mm. A incerteza de medição expressa no certificado de calibração é uma função do comprimento medido com a seguinte equação: $(1,2 + L/1300) \mu\text{m}$, com L em milímetros para aproximadamente 95% de confiança e $k = 2,1$.

A medição de tambores de freio é uma atividade rotineira no laboratório com programa CNC para todos os modelos disponíveis. Portanto, a estratégia utilizada no estudo dessa peça foi acompanhar inicialmente algumas medições na condição de observador e depois discutir com o grupo (pessoal do laboratório, projeto e usinagem) as questões relacionadas com o planejamento e estratégia de medição, observando os itens citados nas figuras 5.2 e 5.3 do capítulo 5. Na tabela 6.8 constam os pontos mais importantes discutidos e as sugestões apresentadas para a empresa.

Tabela 6.8 – Principais constatações e sugestões de melhoria

PEÇA	COMENTÁRIOS/ SUGESTÕES
A peça não é fixada na sua posição funcional (posição de uso) por conta da limitação no acesso as medições internas. Seria necessário usar haste longa (acima de 220 mm) que normalmente aumenta a incerteza de medição e o tempo de medição.	- Como a peça é bastante rígida, as deformações são desprezíveis frente às tolerâncias da peça; - Pode-se desenvolver um gabarito para fixação da peça (por exemplo, uma meia lua) onde o tambor fique assentado na posição de uso (funcional) e permita a medição de todas as cotas sem a necessidade de alteração da posição da peça e adicionalmente confirmar o efeito da deformação por peso próprio; - Uma consulta ao fabricante da MMC para desenvolvimento de uma configuração de haste que permita a medição de toda peça sem mudança de posição.

Tabela 6.8 – Principais constatações e sugestões de melhoria (continuação)

PEÇA	COMENTÁRIOS/ SUGESTÕES
O desenho técnico da peça apresenta inconsistência com respeito às especificações de tolerâncias geométricas.	- Incluir o pessoal da área de projeto e usinagem nos cursos sobre metrologia e GD&T; - Aumentar o controle sobre o uso de versões de desenhos técnicos; - Evitar a disseminação de desenhos mais simplificados a partir dos desenhos completos e originais do cliente; - Para cada projeto novo ou modificado, explicar para as pessoas envolvidas na fabricação e medição a função da peça e sua sequência de montagem; - Aprimorar o canal de comunicação entre fornecedor e cliente com respeito às discussões técnicas do desenho, como por exemplo, que norma é utilizada.
O alinhamento matemático da peça não é realizado pelos elementos de referência definidos no desenho por conta da limitação de acesso ao elemento.	- Analisar a possibilidade de uma nova posição de medição para a peça e configuração de haste para acessar toda peça; - As tolerâncias geométricas, especialmente orientação e posição devem ser medidas considerando o alinhamento pelas referências no desenho técnico.
APALPADOR	
Em todas as medições o pessoal qualifica corretamente os apalpadores, inclusive com critério bem definido para a qualidade dessa qualificação (desvio < 0,000 3 mm). As regras de configuração da haste, comprimento e diâmetro do sensor estão condizentes com as orientações citadas no capítulo 5 deste trabalho. A velocidade de apalpação e a força de medição são padronizadas para todas as medições e testes de Repetitividade e Reprodutibilidade.	Nas medições rotineiras entre os três turnos ainda há a necessidade de um aprimoramento na padronização de tarefas como, por exemplo, uso de sensores com diâmetros distintos para medição de peça usinada e bruta.

Tabela 6.8 – Principais constatações e sugestões de melhoria (continuação)

PROGRAMA DE AVALIAÇÃO	COMENTÁRIOS/ SUGESTÕES
Em todas as medições são utilizados os mínimos quadrados como algoritmo de ajuste. A distribuição dos pontos de medição está adequada, entretanto o número de pontos para algumas características críticas é insuficiente. Não há uma definição clara de que norma de tolerância geométrica ISO ou ASME é utilizada nos desenhos.	- As características medidas são usinadas e apresentam baixo erro de forma. Portanto, o uso dos mínimos quadrados pode ser utilizado sem prejuízo da qualidade da avaliação. Porém para medição de peças brutas, deve-se estudar o uso de algoritmo chebychev; - Para superfície da peça em bruto, mais pontos de medição devem ser coletados; - Observar as recomendações constantes na tabela 4.2 do capítulo 4 deste trabalho que são baseadas na norma inglesa BS 7172. - Cabe ressaltar que o número de pontos pode ser o mínimo quando não há problemas na avaliação da conformidade do produto e o processo de produção é estável.
CONDIÇÕES DE MEDIÇÃO	COMENTÁRIOS/ SUGESTÕES
Os metrologistas 3D das empresas pesquisadas possuem cursos básicos de GD&T e de incerteza de medição. As medições são realizadas tipicamente em uma temperatura média ambiente de 22°C. O tempo de estabilização das peças não é uniforme e a correção dos erros sistemáticos não é realizada.	- Ao longo das discussões técnicas deste trabalho, oito profissionais das empresas pesquisadas participaram de cursos de metrologia; - As peças são limpas antes da medição e inspecionadas visualmente com respeito as rebarbas ou sujeira; - O tempo de estabilização deve ser o suficiente para a temperatura da peça situar-se em torno de 22°C. Caso não seja possível, fazer correção para as medidas lineares.
RESULTADO DA MEDIÇÃO	COMENTÁRIOS/ SUGESTÕES
O relatório emitido é bastante completo e utiliza as potencialidades do programa da MMC. O relatório de avaliação da conformidade contempla o desenho técnico com as cotas assinaladas ou “boletadas”, mas não há evidência de que a incerteza da medição é considerada no cálculo.	- as avaliações de conformidade dos instrumentos e sistema de medição consideram a incerteza de medição e o erro máximo do instrumento informado no certificado de calibração. - A incerteza do processo de medição não é considerada e sugere-se realizar um estudo para características críticas medidas.

Uma questão positiva constatada na empresa do setor automotivo foi que a sequência de medição é realizada pelos parâmetros a serem medidos e não pela numeração das cotas no desenho. Essa forma reduz o tempo de medição uma vez que se mede a maioria das características que estão próximas da cota para onde se deslocou o apalpador. Atualmente o tempo médio para medição da peça em estudo é de aproximadamente quinze (15) minutos considerando o tempo de montagem e fixação da peça na máquina de medir. Após as medições é gravado um relatório com os resultados para cada característica de interesse. Na tabela 6.9 consta um resumo para as cotas de interesse nesse trabalho onde se verifica que todas as características foram aprovadas com respeito às tolerâncias de projeto.

Tabela 6.9 – Resultado das medições do segundo experimento

RESULTADOS DA MEDIÇÃO				
	Característica	Valor médio (mm)	Valor nominal + tolerância (mm)	Avaliação da conformidade
1	Diâmetro no ressalto	369,020	369 (-0,0 / +0,089)	CONFORME
2	Paralelismo face interna/face externa	0,011	0,00 $\pm$ 0,06	CONFORME
3	Planeza face interna furação	0,005	0,00 $\pm$ 0,05	CONFORME
4	Perpendicularidade em relação a referência A	0,00	0,00 $\pm$ 0,05	CONFORME
5	Cilindricidade lona de freio	0,043	0,00 $\pm$ 0,05/100	CONFORME
6	Concentricidade diâmetro lona de freio	0,052	0,00 $\pm$ 0,10	CONFORME
7	Batimento circular axial em relação a referência A	0,00	0,00 $\pm$ 0,08	CONFORME

Cabe ressaltar que algumas constatações apresentadas na tabela 6.8 como, por exemplo, a não aplicação da incerteza do processo de medição na avaliação da conformidade e inconsistências nos desenhos técnicos foram comuns nas empresas pesquisadas.

Com respeito à avaliação da conformidade utilizando a incerteza de medição, o que se constatou nas visitas as empresas é que essa análise é utilizada apenas para avaliação de instrumentos ou sistema de medição, através de um “parâmetro” calculado

pela raiz quadrada da soma quadrática do erro e sua incerteza associada informados no certificado de calibração. Esse “parâmetro” calculado é então comparado com a tolerância do produto. Se o “parâmetro” for menor ou igual a tolerância dividida por um fator que varia de 3 a 5, o instrumento está aprovado para uso. Adicionalmente verificou-se em alguns casos que a tolerância tem sua faixa reduzida de um percentual e somente depois é dividida pelos fatores informados anteriormente.

A prática de se combinar quadraticamente a incerteza de medição e o erro sempre subestima o “parâmetro” resultante e não tem fundamentação no ISO GUM (1995) que recomenda, quando não for feita a correção do erro, que a combinação seja linear.

A outra prática de reduzir a faixa de tolerância de um percentual único para todas as situações não é recomendada uma vez que penaliza o setor de fabricação podendo encarecer o processo de fabricação desnecessariamente.

O recomendado nesses casos é investir em ferramentas como controle estatístico da qualidade e estudo de repetitividade e reprodutibilidade (R&R) para estimar as variações do processo de medição.

Nesse experimento foram realizados dois estudos de R&R pelo método da média e amplitude para a peça em questão com o objetivo de comparar e validar a proposta da tese. O método da média e amplitude estima tanto as variações para repetitividade quanto à reprodutibilidade do sistema de medição, tratando-as separadamente. O estudo de R&R é composto de duas partes: as análises gráficas e as análises através de cálculos numéricos (AIAG, 2002). Esses estudos são realizados sistematicamente pela empresa pesquisada ou extraordinariamente quando solicitado por um cliente para o seu produto em particular.

O primeiro estudo de R&R seguiu o procedimento interno do laboratório de metrologia sem nenhuma alteração por parte do autor.

Para o estudo foram selecionadas dez (10) peças que representassem a variação existente ou esperada do processo de medição e três operadores (A, B e C) que realizam medições na máquina de medir por coordenadas. Para cada característica selecionada foram realizadas três medições por cada operador. As peças foram medidas em uma ordem aleatória.

Para o estudo de R&R, o critério para verificar se a variabilidade do sistema de medição é satisfatória ou não, depende da porcentagem da variabilidade do processo produtivo ou da tolerância especificada da característica consumida pela variação do sistema de medição, que no caso em estudo trata-se da máquina de medir por coordenadas.

Uma regra prática para aceitá-la definida no manual do MSA (AIAG, 2002) é descrita a seguir:

- $\% R \& R \leq 10 \%$: sistema de medição é considerado aceitável;
- $10 \% < \% R \& R \leq 30 \%$: sistema de medição pode ser aceito com base na importância de sua aplicação, no custo do equipamento de medição, no custo do reparo, entre outros fatores.
- $\% R \& R > 30 \%$: sistema de medição considerado não aceitável. Neste caso devem-se realizar estudos no sentido de identificar as causas e corrigi-las se for possível ou viável.

R&R é a parcela de variabilidade do sistema de medição em estudo.

Além desse critério, o manual do MSA também define uma regra para o número de distintas categorias (ndc) que significa o número de distintas variações do produto que as medições realizadas podem diferenciar. A regra é a seguinte:

- $ndc < 2$: o sistema de medição não serve para controlar o processo;
- $ndc = 2$: o sistema de medição poderá ser utilizado apenas para avaliação por atributos;
- $2 < ndc \leq 5$: o sistema de medição poderá ser usado para avaliação da conformidade do produto, mas não para análise da capacidade do processo;
- $ndc > 5$: o sistema de medição poderá ser usado tanto para avaliação da conformidade quanto para análise da capacidade do processo.

Para maiores informações sobre estudo de R&R sugere-se consultar o manual de análise de sistema de medição, comumente denominado de MSA (AIAG, 2002).

Os resultados da fase 1 do primeiro estudo de R&R estão apresentados graficamente nas figuras 6.15 e 6.16 para gráfico das médias e das amplitudes respectivamente e na tabela 6.10 com os valores percentuais de aceitação conforme o manual do MSA. A fase 1 do estudo corresponde aos primeiros resultados sem modificações. O estudo envolveu as características 1-2-3-5-6 da tabela 6.9, mas neste trabalho será apresentada a avaliação da concentricidade da lona de freio que é crítica no projeto.

Na figura 6.15 consta o gráfico das médias para os três operadores A, B e C e na figura 6.16 o gráfico das amplitudes para avaliação da característica concentricidade.

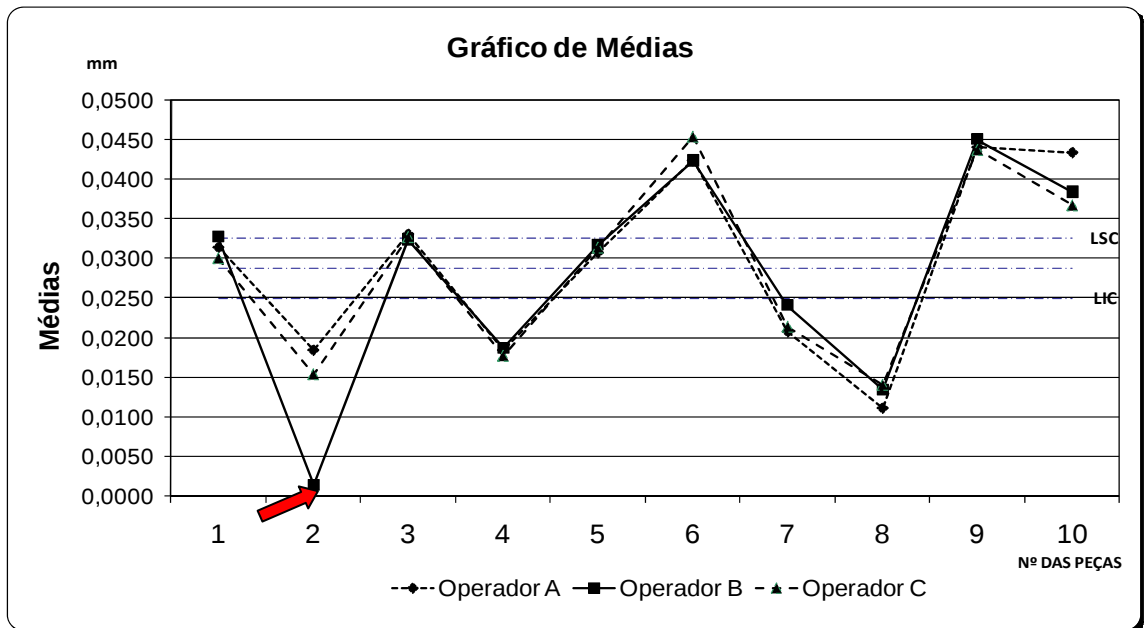


Figura 6.15 – Gráfico das médias superpostas

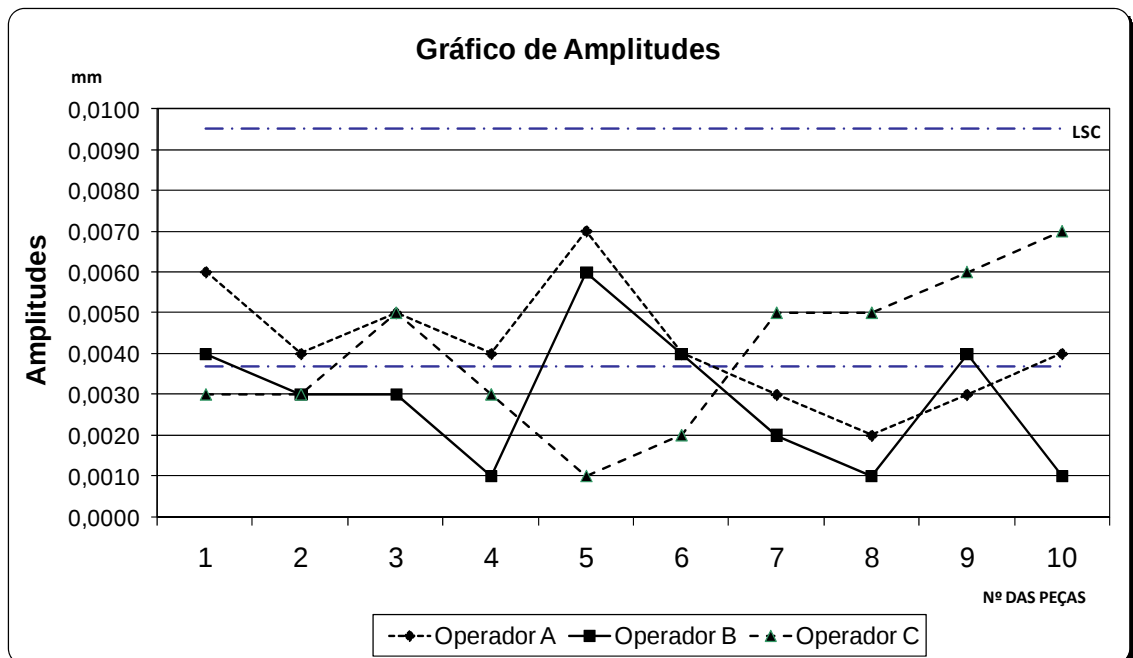


Figura 6.16 – Gráfico das amplitudes superpostas

A análise gráfica da figura 6.15 indica que a máquina de medir por coordenadas tem suficiente discriminação da variação das peças selecionadas para o estudo. Com exceção da segunda amostra, verifica-se no gráfico que não parece haver diferença significativa entre os operadores. Os valores para a segunda amostra e operador B indicam uma causa especial. Após investigação da causa, atribui-se o fato a uma pequena variação entre operadores na montagem da peça na placa de fixação e/ou a variação de forma da peça. Decidiu-se realizar uma nova medição (replicação) com o operador B e mesma peça para construção de um novo gráfico conforme apresentado na figura 6.17. Verifica-se no gráfico que a média da peça de número 02 para o operador B ficou mais consistente com os valores dos outros operadores.

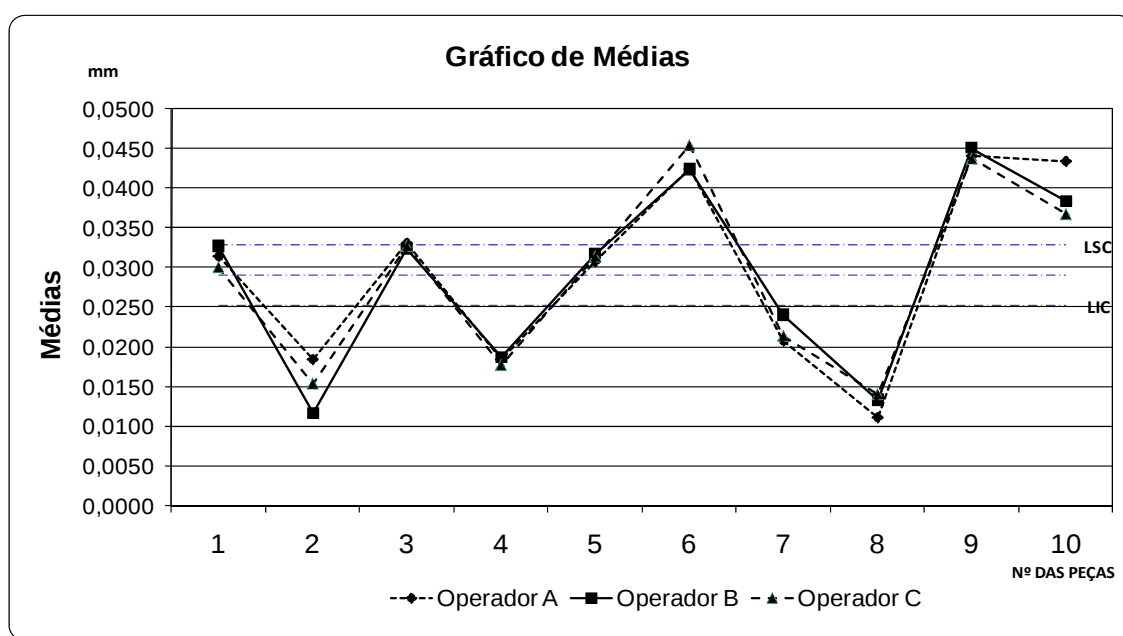


Figura 6.17 – Gráfico das médias superpostas recalculado

Com respeito ao gráfico das amplitudes, este auxilia no controle estatístico com respeito à repetitividade do sistema de medição e na análise da consistência do processo de medição entre operadores para cada peça (AIAG, 2002). No gráfico da figura 6.16 verifica-se que existe uma pequena diferença entre operadores, em especial do operador B com os demais. Uma provável causa seja a falta de uniformidade no pré-alinhamento manual da peça com respeito a placa de fixação, uma vez que a medição se dá de forma automática (modo CNC da máquina), inclusive para o alinhamento matemático. Nessa condição,

teoricamente espera-se que a parcela de reprodutibilidade seja igual a zero, uma vez que o operador não interfere diretamente na medição.

Na figura 6.18 consta o gráfico das amplitudes dos operadores após a correção da causa especial indicada na figura 6.15. No gráfico da figura 6.18 verifica-se que permanece uma pequena diferença entre operadores indicando possível diferença de procedimento.

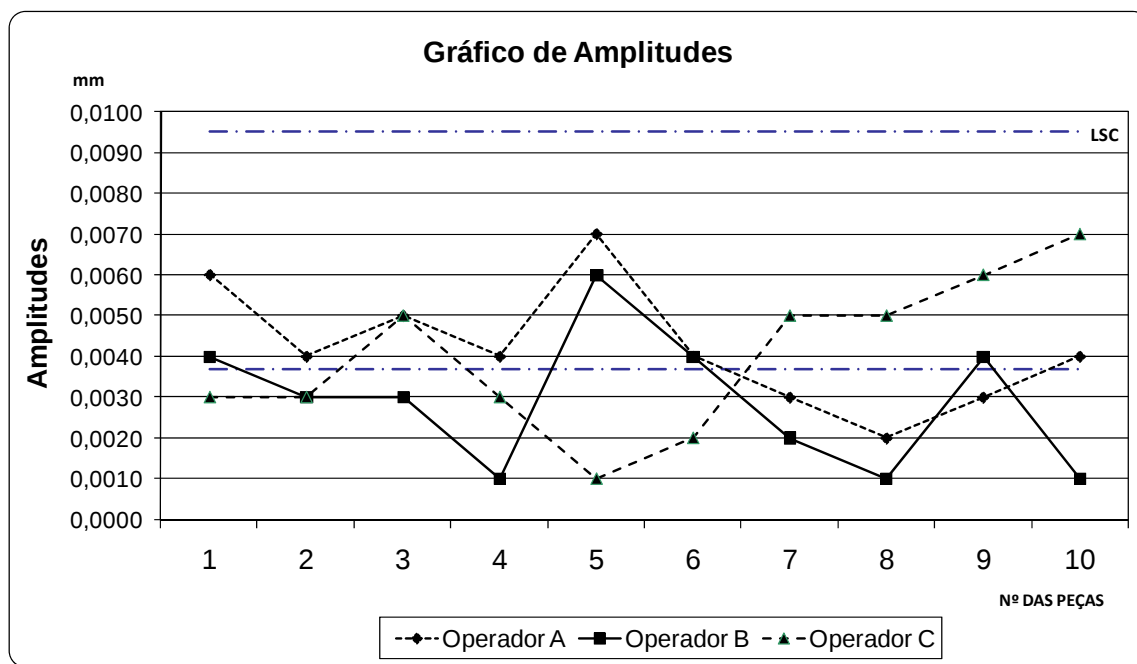


Figura 6.18 – Gráfico das amplitudes superpostas recalculado

Na figura 6.19 são apresentadas as fórmulas para os cálculos numéricos extraídas no manual de análise de sistema de medição (AIAG, 2002), com os parâmetros (VE, VA, R&R, VP e VT) do estudo. Na figura 6.19 (b) os percentuais com relação a variação total e na figura 6.19 (c) os percentuais com relação a tolerância especificada.

Repetitividade - VE	$%VE = 100.(VE / VT)$	$%VE = 100. [VE / (Tol/6)]$
Reprodutibilidade - VA	$%VA = 100.(VA / VT)$	$%VA = 100. [VA / (Tol/6)]$
R&R	$%R\&R = 100.(R\&R / VT)$	$%R\&R = 100. [R\&R / (Tol/6)]$
Variação da Peça - VP	$%VP = 100.(VP / VT)$	$%VP = 100. [VP / (Tol/6)]$
Variação Total - VT	$ncd = 1,41.(VP / R\&R)$	
ndc		
Tolerância		

(a)

(b)

(c)

Figura 6.19 - Fórmulas para os cálculos numéricos do estudo de R&R

Na tabela 6.10 constam os resultados numéricos da primeira fase do estudo de R&R. Pelo critério do manual do MSA ($10\% < R\&R < 30\%$), o sistema de medição pode ser aceito com base na importância de sua aplicação, no custo do equipamento de medição, no custo do reparo, entre outros fatores. O número de distintas categorias está acima de cinco indicando que o sistema de medição poderá ser usado tanto para avaliação da conformidade quanto para análise da capacidade do processo.

Tabela 6.10 - Resultados numéricos da primeira fase do estudo de R&R.

Com causa especial	Sem causa especial

Verifica-se na tabela 6.10 que após a correção da causa especial, a variabilidade referente aos operadores, isto é, a reprodutibilidade (%VA) foi zero. Desse modo, o estudo poderia focar apenas na repetitividade do sistema de medição. Para uma análise sobre as variações entre peças e sua interação com a variação do sistema de medição, o estudo de análise de variância é recomendado (AIAG, 2002).

A segunda fase do estudo de R&R consistiu em repetir o estudo com as mesmas peças e quantidades, operadores e repetições de medição, mas com as seguintes alterações no programa CNC da medição, resultantes do estudo do desenho e da estratégia de medição. Na tabela 6.11 são apresentadas as configurações do estudo fase 1 e propostas para a fase 2 relacionadas com o número de pontos de medição. As alterações são baseadas na norma inglesa BS 7172 (1989) e tabela 4.2 deste trabalho.

Tabela 6.11 – Número de pontos a medir

	Característica	Número de pontos atuais	Número de pontos proposto para a fase 2 do estudo
1	Diâmetro no ressalto	04	07
2	Paralelismo face interna/face externa	04	09
3	Planeza face interna furação	04	09
5	Cilindricidade lona de freio	16	05 pontos em três círculos espaçados de aproximadamente 35 mm
6	Concentricidade diâmetro lona de freio	Avaliado indiretamente	Avaliado indiretamente

O alinhamento matemático da peça para fase 2 foi realizado através de elementos substitutos plano-círculo-círculo considerando os elementos de referência definidos no desenho técnico. No caso, a face interna do diâmetro do ressalto paralela ao eixo de simetria da peça e a face interna do plano de furação.

A nova configuração de alinhamento ficou da seguinte forma:

- Plano: apalpar nove (09) pontos na face interna de furação.
- Círculo 1: apalpar sete (07) pontos no diâmetro do ressalto
- Círculo 2: apalpar sete (07) pontos no diâmetro da furação

Outra modificação importante foi a marcação de um ponto de referência na placa e nas peças em estudo para o pré-alinhamento manual da peça na placa de fixação. O objetivo foi minimizar as variações entre operadores nessa tarefa.

Os resultados da fase 2 do estudo de R&R estão apresentados graficamente nas figuras 6.20 e 6.21 para gráfico das médias e das amplitudes respectivamente e na tabela 6.12 com os valores percentuais de aceitação conforme o manual do MSA. No gráfico da figura 6.20 verifica-se que a MMC permanece com suficiente discriminação da variação das peças selecionadas para o estudo. Pelo gráfico não parece haver diferença significativa entre os operadores A, B e C.

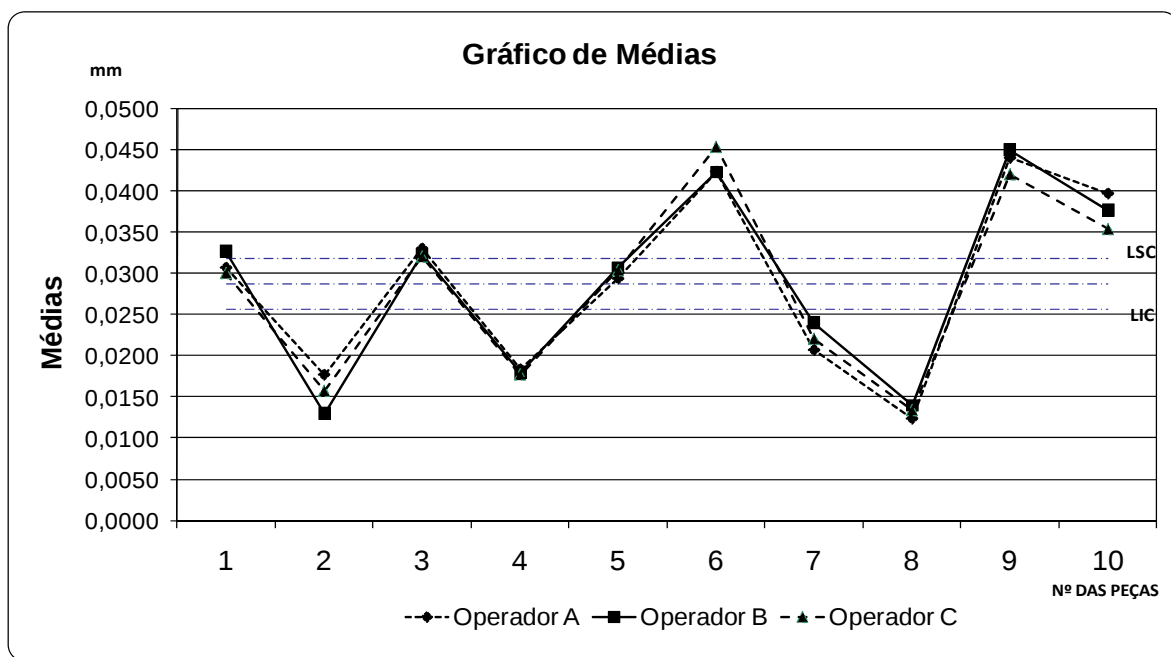


Figura 6.20 – Gráfico das médias superpostas

Com respeito ao gráfico das amplitudes na figura 6.21, verifica-se que não houve causas especiais e se confirma a pequena diferença entre operadores indicando que os operadores realizam as medições de uma maneira mais uniforme.

As pequenas diferenças entre operadores apresentadas no gráfico de amplitudes da figura 6.21 podem ser resultantes de fatores como os erros de forma, as pequenas diferenças de alinhamento manual ou variações de temperatura na sala de medida causadas pela circulação de pessoas no laboratório e acúmulo de peças da produção numa temperatura bem superior a temperatura média da sala. Essas interações peças e operadores não são identificadas no estudo de MSA para gráfico das médias e amplitudes.

No gráfico da figura 6.21, se comparado ao gráfico da figura 6.18, houve uma significativa redução das diferenças entre operadores. Pelo que foi investigado não é possível afirmar que somente o aumento do número de medições contribuiu para a melhoria do processo com respeito à confiabilidade das medições. A inclusão na estratégia de medição da uniformidade do pré-alinhamento manual da peça pode ter contribuído positivamente para a condição apresentada no gráfico e na melhoria dos resultados do estudo.

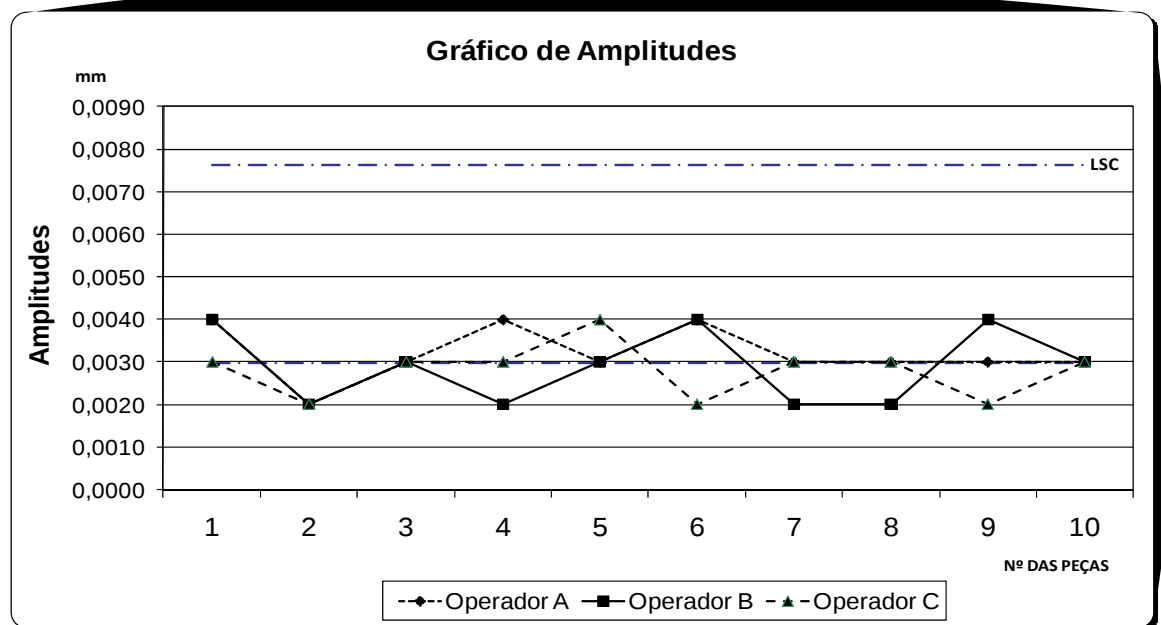


Figura 6.21 – Gráfico das amplitudes superpostas

Na tabela 6.12 verifica-se que o percentual do R&R diminuiu com relação ao estudo anterior, mas ainda permanece acima de 10%. O número de distintas categorias (ndc) aumentou indicando que o sistema de medição tem agora maior poder de diferenciar classes de peças da mesma categoria.

Tabela 6.12 - Resultados numéricos da segunda fase do estudo de R&R.

Variação Percentual		
	Var. Total	Tolerância
%VE	18,00%	10,52%
%VA	0,00%	0,00%
%R&R	18,00%	10,52%
%VP	98,37%	57,47%
ncd	7	

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES E

RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Diversas são as aplicações de produtos com geometria complexa e superfície com forma livre, onde a medição é comumente realizada através de máquina de medir por coordenadas. Para esses produtos com múltiplas geometrias e tolerâncias, não há uma norma que estabeleça os parâmetros de medição de modo que a elaboração da estratégia de medição é muito dependente da experiência do metrologista. Adicionalmente, existem poucos trabalhos sobre o tema.

Esses foram os principais motivos para a proposição de uma sistemática com diretrizes para garantia da qualidade na medição de peças com geometrias complexas e superfícies com forma livre, utilizando máquina de medir por coordenadas. Para tanto, as seguintes atividades foram realizadas para proposição e aprimoramento da sistemática:

a) um amplo estudo bibliográfico sobre o tema abordando o estado da arte na especificação geométrica de produtos, considerando inclusive os sistemas de normalização ISO e ASME;

b) visita em seis empresas que utilizam a tecnologia de medição por coordenadas que contribuíram, juntamente com o estudo bibliográfico e a troca de informações com especialistas da área, na identificação ou constatação das principais limitações no contexto da garantia da qualidade na medição de peças com geometria complexa, utilizando a máquina de medir por coordenadas;

c) realização de dois estudos de casos reais numa empresa de médio porte do setor automotivo, para avaliar a aplicabilidade da sistemática proposta neste trabalho.

7.1 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS E CONTRIBUIÇÕES DA SISTEMÁTICA PROPOSTA

A sistemática proposta compreende três módulos e sua aplicação está baseada na formalização das atividades e no planejamento adequado da estratégia de medição, preferencialmente fundamentadas em normas.

O primeiro módulo da sistemática foi denominado de “Formação da Base do Conhecimento” que recomenda a análise do nível de interação entre os setores de projetos, de fabricação e de metrologia na empresa e da empresa com seus clientes e fornecedores. Considera também os recursos dos programas computacionais disponíveis e equipamentos de medição e finalmente as características da peça. Esse módulo compreende, portanto, um conjunto de informações úteis e documentadas que servirão para subsidiar o planejamento da medição e evidenciar o cumprimento de requisitos de sistema de garantia da qualidade.

Foi constatado, pelo estudo bibliográfico e visitas realizadas, que falta uma maior interação entre os setores de projeto, fabricação e metrologia e também integração entre os programas computacionais especialmente entre os programas para CAD e para medição 3D. No estudo de caso foram constatadas falta ou inconsistência na definição das referências para medição nos desenhos e a utilização de versões diferentes do mesmo desenho.

O segundo módulo foi denominado de “Planejamento da medição” e considera as informações relevantes do módulo anterior para a elaboração da estratégia de medição e do relatório de medição. A elaboração da estratégia de medição proposta neste trabalho envolve a análise das características da peça, do apalpador, do programa de medição e de avaliação, as condições de medição e como os resultados serão expressos. Pôde-se constatar nas visitas realizadas e no estudo de caso, que a estratégia de medição se resume no programa de medição elaborado pelo programador da MMC ou pelo metrologista mais experiente. Esses programas, muitas vezes bastante resumidos, trazem como consequência a falta de informações detalhadas para discussão de possíveis melhorias da estratégia de medição ou mesmo a impossibilidade de repetir a medição nas condições próximas às iniciais.

O terceiro módulo da proposta foi denominado de “Medição e Confirmação Metrológica”. A medição segue o que foi definido na estratégia de medição e a confirmação metrológica consiste em avaliar se o processo de medição atende as

especificações de tolerância definidas no projeto ou variabilidade do processo de fabricação. Verificou-se em algumas empresas visitadas que o critério de confirmação metrológica envolve a tolerância de projeto e a incerteza de medição informada no certificado de calibração do instrumento de medição ou uma combinação quadrática desta com o erro máximo do instrumento. Essa prática pode levar a conclusão equivocada sobre aprovação do produto, uma vez que está se negligenciado a avaliação do processo de medição, onde a contribuição do instrumento de medição é uma das fontes de incerteza.

7.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE APLICAÇÃO DA SISTEMÁTICA PROPOSTA

A sistemática foi aplicada em dois estudos de casos numa empresa fornecedora de produtos para o setor automotivo. Os estudos de casos reais envolveram a medição de uma engrenagem cilíndrica de dentes retos e de um tambor de freio, onde ambas as peças possuem múltiplas tolerâncias dimensionais e geométricas.

As principais dificuldades operacionais para aplicação da proposta na empresa foram o sigilo das informações com respeito aos projetos e a limitação de tempo da empresa para realização dos experimentos.

Apesar das dificuldades iniciais, a sistemática mostrou se de fácil implantação considerando que a empresa possui um bom nível de organização das suas atividades e parte do pessoal do laboratório com treinamento em metrologia por coordenadas.

Antes da aplicação da sistemática foram apresentados e discutidos com os chefes da fabricação, metrologia e projeto, os objetivos do trabalho e o formulário proposto para elaboração da estratégia de medição. Nessa fase foram selecionadas as duas peças para o estudo de caso e solicitadas informações, conforme modelo do formulário para a estratégia de medição. Pela demora na obtenção das informações, duas questões foram observadas: o sigilo das informações e a falta de uma cultura de utilização integrada dessas informações nos moldes do formulário proposto.

Para a medição da engrenagem cilíndrica de dentes retos foi utilizado um programa específico para a tarefa e o uso do modo CNC da máquina. Os desvios de passo, de linha de flanco e de perfil ficaram acima do permitido pela norma. Para essa peça em específico, não havia estudo de Repetitividade e Reprodutibilidade. Também foi constatada a necessidade de medição da engrenagem em um laboratório de metrologia pertencente à

Rede Brasileira de Calibração e com incerteza de medição compatível com o nível de tolerância da engrenagem.

Para demonstrar que é possível fundamentar a estratégia de medição em normas ou guias, no caso a ISO 14253-1 e o ISO GUM, foi desenvolvida neste experimento uma planilha para o cálculo de incerteza do processo de medição. A planilha foi aplicada com êxito na avaliação do desvio de perfil da engrenagem onde se constatou que quase 50% da zona de especificação para essa característica foi consumida pela incerteza de medição. Esse resultado sugere uma reavaliação do processo de medição para que não se corra o risco de aprovar peças ruins ou reprovar peças boas.

A outra aplicação da sistemática foi na medição dos principais parâmetros dimensionais e geométricos de um tambor de freio fabricado em ferro fundido e usinado. Neste caso a tarefa de medição já estava consolidada na empresa, com programa CNC e estudos de repetitividade e reprodutibilidade. Entretanto não havia qualquer documento com informações sistematizadas sobre a elaboração da estratégia de medição e sua fundamentação. Na prática a elaboração da estratégia se concentrava no metrologista mais experiente do laboratório e no programa gravado no computador da MMC. Portanto, não havia discussão com os demais sobre a forma de fixação da peça, número de pontos de medição, diâmetro do apalpador, alinhamento da peça entre outras questões.

A aplicação da sistemática seguiu os três módulos propostos no trabalho que resultaram na identificação de inconsistências na especificação de tolerâncias, falhas nas referências para medição, falta de padronização entre operadores, entre outras. Verificou-se na prática que a forma sistematizada de aplicação da metodologia proposta pode contribuir na empresa para uma cultura de melhoria contínua e de investigação de fontes importantes de erros na estratégia de medição.

Para esse experimento, os resultados das medições dos parâmetros selecionados do tambor de freio foram aprovados frente às tolerâncias especificadas conforme tabela 6.9. Entretanto, as variações da máquina de medir pelo critério de Repetitividade e Reprodutibilidade do estudo de MSA estavam distante do limite de 10%.

Com o intuito de validar a sistemática proposta e investigar as causas das variações, foi aplicado o estudo de repetitividade e reprodutibilidade (R&R), antes e depois das sugestões de melhorias na estratégia de medição. As sugestões de melhorias focaram na uniformização do pré-alinhamento da peça na mesa de medição e na quantidade e distribuição dos pontos de medição seguindo orientação da norma inglesa BS 7172 (1989).

Verificou-se após as alterações da estratégia de medição uma redução da variação da máquina de medir de 13,12% para 10,52% relativo à tolerância da concentricidade da lona de freio do tambor.

Outra questão importante para o aprimoramento da garantia da qualidade da medição de peças é a aplicação de ferramentas estatísticas como CEP, Análise de Variância e estudo de R&R. Neste trabalho foi utilizado o estudo de R&R pelo método da média e amplitude que se mostrou de fácil aplicação e permite estimar tanto as variações para repetitividade quanto a reprodutibilidade do sistema de medição, tratando-as separadamente.

Em resumo, as seguintes características se destacam na metodologia proposta neste trabalho:

- a) aplicável em qualquer empresa que utiliza a medição por coordenadas no controle de produtos, independente do seu porte;
- b) considera aspectos importantes da peça, do processo de fabricação e da estratégia de medição;
- c) é consistente com normas e/ou documentos de referência que correlacionam metrologia, garantia da qualidade e tolerância geométrica.

7.3 RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Em função da complexidade do tema e das limitações da sistemática proposta, outros estudos complementares podem ser desenvolvidos no futuro. São eles:

- Avaliação da sistemática em outras empresas e em laboratórios prestadores de serviços de medição por coordenadas;
- Automatização da sistemática com o desenvolvimento de um banco de dados das estratégias de medição orientadas à medição e integração com outros documentos eletrônicos do sistema da qualidade da empresa;
- Avaliação da incerteza do processo de medição por coordenadas para peças com forma livre;
- Estudo da influência do tipo de algoritmo de ajuste selecionado na confiabilidade da medição de peças com geometria complexa;
- Avaliar a aplicação das normas ISO/GPS ao longo de toda cadeia de desenvolvimento de um produto.

REFERÊNCIAS

AGMA 2000-A88, 1998, “Gear Classification and Inspection Handbook - Tolerances and Measuring Methods for Unassembled Spur and Helical Gears (Including Metric Equivalents)”.

ASME, Y14.5, 2009, “Dimensioning and Tolerancing - Engineering Drawing and Related Documentation Practices”, American Society for Mechanical Engineers, New York, USA.

AIAG, 2002, “MSA - Análise dos Sistemas de Medição”, IQA, 3 ed. Brasil, 2002.

ANSELMETTI, B., LOUATI, H., 2005, “Generation of manufacturing tolerancing with ISO standards”, International Journal of Machine Tools & Manufacture 45, pp. 1124–1131.

ASME Y14.5.1M, 1994 - Mathematical Definition of Dimensioning and Tolerancing”, American Society for Mechanical Engineers, New York, USA.

ARENHART, F. A., 2007, Desempenho Metrológico de Máquinas de Medição por Coordenadas no Âmbito Industrial Brasileiro, Monografia Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.

ARENHART, F. A., 2010, Planejamento e Melhoria de Processos de Medição de Forma por Scanning em Máquinas de Medir por Coordenadas, Dissertação de mestrado apresentada Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.

BARREIRO, J., MARTINEZ, S., LABARGA, J.E., et al., “Validation of an information model for inspection with CMM”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45, pp.819–829.

B89.4.10, 2000, “Methods for Performance Evaluation of Coordinate Measuring System Software”, American Society of Mechanical Engineers, New York, NY.

BRITO, A . A., 2003, A Tecnologia da Medição por Coordenadas na Calibração de Peças Padrão e Medição de Peças com Geometrias Complexas, Dissertação de mestrado apresentada Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.

BOSCH, J.A., 1995, “Coordinate Measuring Machines and Systems”, ISBN 0-8247-9581-4. Marcel Dekker, INC, 443p. New York.

BOAS, F.V., 2006, Desenvolvimento de uma Ferramenta de CAD Aplicada ao Projeto de Hélices para Veículos Aquáticos não Tripulados, Dissertação de mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

BRITO, A.A., 2002, “Engrenagens”, Apostila de Curso, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil.

CHIABERT, P., LOMBARDI, F., ORLANDO, M., 1998, “Benefits of geometric dimensioning and tolerancing”, *Journal of Materials Processing Technology* 78, 29–35, Politechnic of Torino, Torino, Italy.

CONCHERI, G., CRISTOFOLINI, I., MENEGHELLO, R. et al., 2001, “Geometric Dimensioning and Tolerancing (GD&T) versus Geometrical Product Specification (GPS)”, XII ADM International Conference - Grand Hotel - Rimini – Italy.

CERTI, 2002, “Garantia da Confiabilidade Metrológica na Medição por Coordenadas”, Apostila do curso, Florianópolis, SC, Brasil.

DONATELLI, G.D, GONÇALVES. A. A, SCHNEIDER, C.A, et al., 2005, “Metrologia Geométrica na Indústria - Tendências e Desafios” – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.

DAVIDSON, J.K., SHAH, J.J., 2004, “Mathematical model to formalize tolerance specifications and enable full 3D tolerance analysis”, NSF Design, Service and Manufacturing Grantees and Research Conference/SMU - Dallas, Texas.

DANTAN, J.Y., BRUYERE, J., BAUDOUIN1, C., et al., 2007, “Geometrical Specification Model for Gear-Expression, Metrology and Analysis”, Annals of CIRP vol 56/1, – pp.517-520 – France.

FENG, C. J., SAAL, A. L., SALSURY, J. G., et.al., 2007, “Design and analysis of experiments in CMM measurement uncertainty study”, Precision Engineering - 31, pp. 94–10.

FENG S.C, HOPP T.H.,1991, “A review of current geometric tolerancing theories and inspection data analysis algorithms”, NISTIR 4509, NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, USA.

FLACK, D., BEVAN, K., 2005, “Fundamental Good Practice in the Design and Interpretation of Engineering Drawings for Measurement Processes”, National Physical Laboratory, ISSN 1368-6550 - Hampton Road, Teddington, Middlesex.

FLACK, D., 2001, “Measurement Good Practice Guide No. 41 - CMM Measurement Strategies”, National Physical Laboratory, ISSN 1368-6550 - Hampton Road, Teddington, Middlesex.

SCHNEIDER, F., 2005, “Tolérancement Géométrique Interprétation”, IUFM de Lorraine Université de Metz Île du Saulcy, Paris.

FANTIN, A. V., 1999, Medição de Formas Livres Tridimensionais por Topogrametria, Dissertação de mestrado apresentada Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.

FARO, 2007, Technical Catalog, Disponível em: <<http://www.faro.com>>.

GOM, 2007, “Optical Measuring Techniques”, Technical Catalog, Disponível em: <http://www.gom.com/industries/application-notes.html>>.

GONÇALVES, C. R. L., 2006, Um estudo comparativo de sistemas de medição aplicáveis ao controle dimensional de superfícies livres em peças de médio e grande porte, Dissertação de mestrado apresentada Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.

GEMAQUE, M. J. A., 2004, Abordagem para a Solução de um Problema Metrológico na Indústria – Medição de Engrenagens, Dissertação de mestrado apresentada Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.

GIGO, L. G., 1999, Estação de medição por coordenadas na produção de peças complexas - metodologia de especificação, Dissertação de mestrado apresentada Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.

GAO, J., CHASE, K.W., MAGLEBY, S. P., 1998, “Generalized 3-D Tolerance Analysis of Mechanical Assemblies with Small Kinematic Adjustments”, Department of Mechanical Engineering Brigham, Young University Provo, Utah.

GOCH, G., 2003, “Gear metrology”, Keynote paper, Annals of the CIRP, Vol. 52/2, pp.659-695.

HANDSCHUH, R. F, BILL, R.C., 1991, “Recent Manufacturing Advances for Spiral Bevel Gears”, Technical Report 91-C-022 - Prepared for the Aerotech '91 sponsored by the Society of Automotive Engineers Long Beach, California, pp. 23-26.

HOPP, T.H., 1993, “Computational Metrology”, ASME Manufacturing Review, December.

ISO/TC 213, 2008 - “Dimensional and geometrical product specifications and verification – Business Plan”, Executive Summary Version: 5 Draft 1.

ISO/TC60, 2010 – “Equivalence between ISO standards and National Standards. concerning Gear Technology”. 1st Draft - WG 4 – www.euro-trans.org – acessado em julho de 2010.

ISO/TR 14638, 1995, “Geometrical product specification – (GPS) – MasterPlan”, First Edition.

ISO/TR 5460, 1985, “Technical drawings - Geometrical tolerancing - Tolerancing of form, orientation, location and run-out - Verification principles and methods – Guidelines”, First Edition.

ISO 1101, 2004, “Geometrical tolerancing - Tolerances of form, orientation, location and run-out”, Second Edition.

ISO 17450, 2002, “Geometrical product specifications (GPS) - General concepts - Part 2: Basic tenets, specifications, operators and uncertainties”, Second Edition.

ISO 10360, 2001, “Geometrical Product Specifications (GPS) -- Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) – Part 6”, Switzerland.

ISO/DTS 15530-3, 2003, “Geometrical Product Specification (GPS)—Techniques of Determining the Uncertainty of Measurement in Coordinate Metrology—Part 3: Experimental Uncertainty Assessment Using Calibrated Workpieces”, Switzerland.

ISO/TS 14253-2, 1999, “Geometrical Product Specifications (GPS) – Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment – Part 2: Guide to the estimation

of uncertainty in GPS measurement, in calibration of measuring equipment and in product verification”, International Organization for Standardization, First Edition.

ISO 14253-1, 1998, “Geometrical Product Specifications (GPS) – Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment – Part 1: Decision rules for proving conformance or non-conformance with specifications”, International Organization for Standardization, First Edition.

ISO/TS 15530-4, 2008, “Geometrical Product Specifications (GPS) -- Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement -- Part 4: Evaluating task-specific measurement uncertainty using simulation”.

ISO/TS 16949, 2009, “Quality management systems -- Particular requirements for the application of ISO 9001:2008 for automotive production and relevant service part organizations” First Edition.

ISO-GUM, 1995, “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement”, Published Jointly by BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, Geneva, Switzerland.

INMETRO, 2009, “Vocabulário Internacional de Metrologia: conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2008). 1ª Edição Brasileira. Rio de Janeiro, 2009, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

JÚNIOR, J. C. L, 2007 - Aplicação de redes neurais artificiais para determinar parâmetros de geometrias substitutas em MMCs, Tese de Doutorado apresentada na Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, Brasil.

LI, Y., GU, P., 2004, “Free-form Surface Inspection Techniques State of the Art Review”, Computer-Aided Design 36, pp. 1395–1417.

LAWSON (2004). New ANSI/AGMA Accuracy Standards for Gears
MARCH/APRIL 2004 • GEAR TECHNOLOGY • www.geartechnology.com •
www.powertransmission.com

KLEN, E.R., 2003, Calibração de máquinas de medir por coordenadas utilizando placas de esferas – uma técnica econômica, rápida e metrologicamente eficiente, Dissertação de mestrado apresentada Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.

KUNZMANN, H., PFEIFER, T., SCHMITT, R., et al., 2005, “Productive Metrology - Adding Value to Manufacture”, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 54, Issue 2, Pages 155-168.

KANDIKJANA, T., SHAH, J.J., DAVIDSON, J.K., 2001, “A mechanism for validating dimensioning and tolerancing schemes in CAD systems”, Computer-Aided Design 33, pp. 721-73.

KRULIKOWSKI, A., 1999, “Advanced Concepts of GD&T”, First Edition, Effective Training Inc., 391 p, EUA.

MAVROIDIS, C., GATLA, K., 2002, “A Review of tolerance analysis of mechanical assemblies”, first year Report and second year Research Proposal, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Rutgers University, University of New Jersey.

MAZIERO, N. L., FERREIRA, J.C.E, GUBERT, E. , 1997, “Desenvolvimento de um banco de dados de tolerâncias visando a integração com um sistema CAD”, Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - Bauru, SP, Brasil.

MANARVI, I.A., JUSTER, N. P., 2004, “Framework of an integrated tolerance synthesis model and using FE simulation as a virtual tool for tolerance allocation in assembly design”, Journal of Materials Processing Technology 150, pp.182–193.

MAAS, G.A., 2001, A Tecnologia de Medição por Coordenadas na Solução de Problemas da Indústria: Sistematização de Informações e do Processo Metrológico do Laboratório Prestador de Serviços, Dissertação de mestrado apresentada Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.

NEROSKY, L. A. R., 2001, Medição de Formas Livres através da Integração de um Sensor Óptico tipo "Folha de Luz" em um Braço de Medição, Dissertação de mestrado apresentada Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.

NASR, E. S. A., KAMRANI, A.K., 2006, "A new methodology for extracting manufacturing features from CAD system", Computers & Industrial Engineering 51, 389–415.

NBR 6409, 1997, "Tolerâncias geométricas – Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento – Generalidades, símbolos, definições e indicações em desenho", ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ORREGO, R. M. M., DI GIACOMO, B. e ABACKERLI, A. J., 2000, "Fontes de Erros em Metrologia a Três Coordenadas: Considerações Gerais". Revista de Ciência e Tecnologia, Vol 8, Nº 16, pp. 43-56.

OLIVEIRA, A. L., 2003, Validação de processos de medição por coordenadas em operações de controle da qualidade, Dissertação de mestrado apresentada Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.

PASIN, A. O., 2003, Análise crítica de software de medição aplicado a máquinas de medição por coordenadas com relação ao uso do GD&T segundo à norma ASME Y14.5M-1994, Monografia apresentada a Universidade Estadual Paulista, São Paulo, SP, Brasil.

PASIN, A. O, SILVA, D. S., CRNKOVIC, S. J., 2003, "Análise crítica de software para controle dimensional aplicado a máquinas de medição por coordenadas com relação ao uso da linguagem GD&T segundo à Norma ASME Y14.5M-1994", METROLOGIA-2003, Recife, Pernambuco, Brasil.

PFEIFER, T., KUROKAWA, S., MEYER, S., 2001, "Derivation of parameters of global form deviations for 3-dimensional surfaces in actual manufacturing processes", Measurement Volume 29, Issue 3, pp. 179-200.

SAVIO, E., DE CHIFFRE, L., SCHMITT, R., 2007, "Metrology of freeform shaped parts", Annals of the CIRP, VOL 56/2/2007, pp.810-835.

SHAKARJI, C.M., RAFFALDI, J., 2003, "Should you be concerned with software measurement uncertainty?", International Dimensional Workshop, Nashville, Tennessee, USA.

SOUSA, A. R., 2007, "FORMA3D – Formação Regular de Metrologista 3D Nível C", Apostila, Módulo 1, 474p, Fortaleza, CE, Brasil.

SOUSA, A. R., JÚNIOR, A. M., OROSCO, D. B., 2010, "FORMA3D – Formação Avançada de Metrologista 3D Nível B", Apostila, Módulo 2, 317p, Fortaleza, CE, Brasil.

SAVIO, E., HANSEN, H.N., DE CHIFFRE, L., 2002, "Approaches to the Calibration of Freeform Artefacts on Coordinate Measuring Machines", Annals of the CIRP, 51/1:pp.433-436.

SATO, O., OSAWAA, S. , KONDOB, Y., et al., 2010, "Calibration and uncertainty evaluation of single pitch deviation by multiple-measurement technique", Precision Engineering Vol.34, pp.156–163.

VOELCKER, HERBERT B., 1998, "The current state of affairs in dimensional tolerancing: 1997", Integrated Manufacturing Systems, Vol. 9 Iss: 4, pp.205 – 217

VIEIRA, P.R., 2003, A utilização de máquinas opto-eletrônicas portáteis de longo alcance para medição tridimensional como fator de otimização fabril, Trabalho de conclusão de Curso de Pós-graduação em Administração de Empresas para Engenheiros, FEI, São Bernardo do Campo, SP, Brasil.

VIANA, C. Z., 2006, Sistemática para a padronização de estratégias de medição por coordenadas na cadeia de suprimentos da indústria automotiva, Dissertação de mestrado apresentada Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.

VDI/VDE 2631-1, 1999, “Form measurement Principles for the measurement of geometrical deviations”.

WECKENMANN, A., KNAUER, M., KILLMAIER, T., 2001, “Uncertainty of coordinate measurements on sheet-metal parts in the automotive industry”, Journal of materials processing technology 115- pp. 9-13.

WANDECK, M., SOUSA, A. R., 2008, “Análise funcional e metrológica dos princípios de Taylor e da Independência na especificação e controle geométrico de produtos”, 1º. Congresso Internacional de Metrologia – I CIMMEC – Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

XIONGHUI ZHOU, X., QIU, Y., HUA, G., et al., 2007, “A feasible approach to the integration of CAD and CAPP”, Computer-Aided Design 39, pp.324–338.

ANEXO A

Neste anexo consta o modelo de questionário aplicado nas empresas visitadas.

QUESTIONÁRIO VISITA TÉCNICA

(aplicação após visita com explanação detalhada do questionário e seus objetivos)

Eu, Luiz Soares Júnior, comprometo-me a manter total sigilo das informações obtidas pela aplicação do questionário ou de observações durante a visita, ficando a empresa com a decisão de autorizar as informações que lhe convier.

Revisão 03 – julho de 2010.

Módulo 1 – Caracterização da empresa

Nome da organização (razão social):

Ramo de atividade/setor econômico:

Produtos e/ou serviços:

Atuação: Mercado (local, regional, nacional ou internacional):

Matriz ou filial?

Endereço completo:

Certificações da qualidade?

Módulo 2 – Infra-estrutura

Recursos humanos

Que pessoas (função) estão envolvidas diretamente nas atividades de projeto, engenharia de fabricação e metrologia?

Qual a formação acadêmica: técnico ou engenheiro?

As pessoas citadas têm cursos nas áreas de metrologia e/ou em tolerância dimensional e geométrica (GD&T)?

Recursos computacionais

Que softwares são utilizados na cadeia projeto-engenharia de fabricação e metrologia por coordenadas?

Esses softwares são integrados?

Tipos de arquivos de troca de informações (CAD-CAM-CMM-Metrologia)

Recursos materiais (instrumentos e sistema de medição)

Em que fases são utilizadas as máquinas de medição por coordenadas (MMC cartesiana e Braço de medição)?

São utilizadas peças padrão e gabaritos de controle?

Documentação

Que normas são utilizadas para especificação de tolerâncias geométricas? (ABNT, ISO, ASME, DIN?) Cite as mais usadas.

A documentação técnica (desenhos técnicos e especificações) está em que meio (físico; digital)?

Existe controle de revisão dos documentos (desenhos, listas, etc.)?

MÓDULO 3 – FORNECEDORES/CLIENTES

Relacionamento:

Tipo de relacionamento (com todos os níveis ou só o 1º)?

Qual é o setor da empresa responsável pelo relacionamento com os fornecedores?

Processo de compras:

Quais são os critérios para seleção do fornecedor (menor preço; prazo; qualidade do fornecimento)? Esse processo é documentado?

Quais áreas técnicas da empresa são envolvidas no processo de seleção de um fornecedor?

Existe algum documento que contenha quais os requisitos mínimos necessários para fornecer uma determinada peça (normas, máquinas ferramenta, sistema de medição etc.)?

Avaliação dos fornecedores:

Como é feita? Qual a periodicidade?

É feita avaliação nas instalações do fornecedor? Quem vai ao fornecedor (técnico, engenharia, qualidade...)?

A empresa fornece treinamentos para seus fornecedores? Quais?

Metrologia nos fornecedores:

Quais os requisitos metrológicos necessários para iniciar o fornecimento?

É realizada uma avaliação na sala de metrologia dos fornecedores? (infra-estrutura, condições ambientais, relação de equipamentos e instrumentos, etc.)

É feita alguma avaliação quanto ao nível de qualificação técnica do pessoal?

É realizado algum acompanhamento das condições metrológicas dos equipamentos e instrumentos de medição dos fornecedores? (rastreadabilidade metrológica, erros, níveis de incertezas, estudos de MSA, auditoria de medição, etc.)

O laboratório ou sala de medição do fornecedor tem alguma certificação ou acreditação pelo Inmetro?

MÓDULO 4 – PRODUTO

Projeto do produto:

Os desenhos possuem referências (*datums*) e cotas críticas?

Que normas de tolerâncias são utilizadas nos desenhos de engenharia? São definidas pelos clientes?

Quais são os principais problemas que ocorrem com os desenhos técnicos (internamente e externamente)?

Existem modificações nos desenhos quando o produto já está em produção? Como é o processo de comunicação com o cliente?

Existe a participação do cliente no desenvolvimento do projeto do produto?

Desenvolvimento do produto:

Ocorre um desenvolvimento integrado com o cliente? Quem acompanha esse processo pela empresa e pelo cliente?

O pessoal da metrologia está integrado nesse processo?

Nos testes dimensionais e geométricos nas etapas de desenvolvimento do produto, a empresa mede todas as tolerâncias especificadas no desenho, somente as tolerâncias críticas ou mais algum elemento extra especificado pelo cliente?

Qualidade das peças fornecidas:

No caso de componentes (cubos de freios, etc.) o cliente recebe relatórios da avaliação das tolerâncias dimensionais e geométricas? Em meio físico ou eletrônico?

O cliente define qual estratégia de medição será adotada nos testes dimensionais e geométricos do produto da fase de desenvolvimento e na produção?

Existe algum manual interno ou fornecido pelo cliente que possua recomendações para a definição da estratégia de medição por coordenadas?

Ocorrem divergências nos resultados das medições realizadas pela empresa e pelo cliente?

Quais são as mais comuns?

A empresa avalia periodicamente a capacidade de seus processos?

MÓDULO 5 – METROLOGIA NA EMPRESA

A empresa possui toda infra-estrutura para controle dimensional e geométrico das peças desenvolvidas dos clientes?

Existem procedimentos documentados para todas as tarefas de medição rotineiras do laboratório de medidas?

Como é garantida a confiabilidade das medições realizadas no laboratório? E a rastreabilidade metrológica é obtida de laboratórios acreditados pelo Inmetro?

Existe discussão sobre possíveis estratégias de medição por coordenadas diferentes entre a empresa e o cliente?

Na avaliação de conformidade das peças são consideradas as incertezas de medição?

COMENTÁRIOS/SUGESTÕES

ANEXO B

Neste anexo consta o modelo de formulário para elaboração da estratégia de medição aplicado na medição da engrenagem.

FORMULÁRIO PARA ELABORAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE MEDIÇÃO (ESTUDO DE CASO - ENGRENAGEM)

QUADRO 1					
INFORMAÇÕES GERAIS				DATA/REVISÃO:	
NOME PEÇA	Engrenagem cilíndrica externa $z = 35$	Nº PEÇA	CFS 1142399	Nº/DATA DESENHO	XXX
MMC	Mitutoyo BLN C 710	LOCAL DE MEDIÇÃO	Metrologia Usinagem	INCERTEZA 3D DA MMC	1,2 +L/1300
SOFTWARES UTILIZADOS	Geopak Win versão 2.4 R8 GearPak versão 2.4			DATA CALIBRAÇÃO:	24/06/09
ELABORADO POR:		Luiz /Edson			
CLIENTE		Interno			
ACESSÓRIOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO AUXILIARES		E Mesa de fixação três castanhas			
DESENHO CAD DA PEÇA		☐ SIM ☒ NÃO EXTENSÕES DO ARQUIVO:			

QUADRO 2																							
INFORMAÇÕES SOBRE A PEÇA				DATA/REVISÃO:																			
MATERIAL	Aço	RIGIDEZ	BAIXA ☐ ALTA ☒	COEF.EXPANSÃO TERMICA	11,5 $\mu\text{m/m.K}$																		
EST.SUPERFÍCIE	BRUTA ☐ USINADA ☒ AMBOS ☐		PESO DA PEÇA		---																		
DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO	Placa de três castanhas		DEFORMA A PEÇA?	SIM ☒ NÃO ☐																			
POSIÇÃO DA PEÇA NA MMC	Centro		SERÁ NECESSÁRIA ALTERAR A MONTAGEM? Não																				
PROCESSO DE FABRICAÇÃO	Torneamento, fresamento e retificação.																						
NECESSÁRIA LIMPEZA DA PEÇA	SIM ☒ NÃO ☐	TEMPERATURA (°C) E TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO (h)			22°C Duas horas																		
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-bottom: 10px;"> <tbody> <tr> <td style="padding: 2px;">Numero de dentes</td> <td style="padding: 2px;">z</td> <td style="padding: 2px;">35</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Módulo</td> <td style="padding: 2px;">m_n</td> <td style="padding: 2px;">3,150</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Angulo de pressão</td> <td style="padding: 2px;">α</td> <td style="padding: 2px;">25,000</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Largura da face</td> <td style="padding: 2px;">b</td> <td style="padding: 2px;">15,000</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Diâmetro primitivo</td> <td style="padding: 2px;">d_a</td> <td style="padding: 2px;">113,600</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Espessura dos dentes</td> <td style="padding: 2px;">s_n</td> <td style="padding: 2px;">4,9480</td> </tr> </tbody> </table> 						Numero de dentes	z	35	Módulo	m_n	3,150	Angulo de pressão	α	25,000	Largura da face	b	15,000	Diâmetro primitivo	d_a	113,600	Espessura dos dentes	s_n	4,9480
Numero de dentes	z	35																					
Módulo	m_n	3,150																					
Angulo de pressão	α	25,000																					
Largura da face	b	15,000																					
Diâmetro primitivo	d_a	113,600																					
Espessura dos dentes	s_n	4,9480																					

QUADRO 3					
APALPADOR: SELEÇÃO E CARACTERÍSTICA DA MEDIÇÃO					
TIPO DO APALPADOR		TIPO DE MEDIÇÃO	PONTO A PONTO ☒	CONTATO CONTÍNUO ☐	
Nº APALPADOR	1	2	3	4	5
DIÂMETRO DA ESFERA (mm)	2,00				
HASTE + TP (mm)	---				
Posição de uso	1				
COMP. DO APALPADOR (mm)	128				
VEL. DE APALPAÇÃO (mm/s)	2				
FORÇA DE APALPAÇÃO	Padrão				
QUALIFICAÇÃO DO APALPADOR	MANUAL ☐ CNC ☒ ESFERA PADRÃO ☒ OUTRO PADRÃO ☐				
Qualificação deve ser realizada na esfera padrão fornecida pelo fabricante da MMC. O critério de aceitação da qualificação é que o desvio obtido seja inferior ou igual a 0,000 3 mm.					

QUADRO 4			
DEFINIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA PEÇA A MEDIR			
DESCRIÇÃO DA CARACTERÍSTICA (citar a função e o tipo de tolerância)	CRÍTICA - C MODERADA - M REFERÊNCIA - R	CÓDIGO OU IDENTIFICAÇÃO	Nº APALPADOR
Desvio de passo total Tolerância de 0,030 mm	M	----	1
Diâmetro de pé Tolerância de +0,2 / -0,1 mm	M	---	1
Desvio total de perfil Tolerância de 0,025 mm	M	---	1
Desvio total de linha de flanco Tolerância de 0,020 mm	M	---	1

(imprimir esta página quantas vezes forem necessárias)

QUADRO 5			
DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA PEÇA A MEDIR			
REFERÊNCIA PRIMÁRIA (DATUM PRIMÁRIO) (Descrever o elemento de referência utilizado e o algoritmo utilizado para o alinhamento)	CONFERE COM A REFERÊNCIA NO DESENHO	Nº DE PONTOS	Nº APALPADOR
Plano da face da engrenagem. O algoritmo utilizado foi método dos mínimos quadrados.	☐ SIM ☐ NÃO <u>Sem desenho</u>	05	1
REFERÊNCIA SECUNDÁRIA (DATUM SECUNDÁRIO) (Descrever o elemento de referência utilizado e o algoritmo utilizado para o alinhamento) Furo central. O algoritmo utilizado foi método dos mínimos quadrados. Referência na origem do furo.	☐ SIM ☐ NÃO <u>Sem desenho</u>	04	1
O SISTEMA DE COORDENADAS COINCIDE COM O DEFINIDO NO DESENHO CAD?	☐ SIM ☐ NÃO	OBSERVAÇÕES <u>Sem desenho CAD</u>	

QUADRO 6		
MEDIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA PEÇA A MEDIR		
QUADRO 7		
CÓDIGO DA CARACTERÍSTICA (ver desenho ou outro documento)	SERÁ NECESSÁRIO TESTE DE REPETITIVIDADE?	NÚMERO DA TAREFA
	☐ SIM ☒ NÃO	01
MODO DE MEDIÇÃO	☐ MANUAL ☒ CNC ☐ DIRETAMENTE DO CAD	
DESCRIÇÃO DA CARACTERÍSTICA (importar do quadro 4)	Desvio de passo total	
Descrição da tarefa de medição	Medição CNC do desvio de passo à direita e à esquerda.	
Descrição e valores das tolerâncias dimensionais e geométricas	Desvio de passo total com tolerância de 0,030 mm	
Quantidade de pontos em cada elemento medido	01 por flanco do dente	
Distribuição dos pontos sobre a superfície	01 ponto	
Número de seções e alturas (posições)	---	
Número de linhas geratrizes e suas posições	---	
Algoritmo utilizado para avaliação	----	
Diâmetro da esfera do apalpador	2,00 mm	
OBSERVAÇÕES: Medições realizadas no modo CNC através do programa Gearpak da Mitutoyo Por questão de confidencialidade das informações não serão apresentados os detalhes de medição das outras características citadas no quadro 4)		

CONFIGURAÇÃO DO RELATÓRIO DE MEDIÇÃO	
TIPO	☒ COMPLETO ☐ SIMPLIFICADO (INFORMAÇÕES BÁSICAS)
Relatório completo emitido pelo programa computacional da MMC com todas as informações as características medidas, condições de medição e gráficos.	
RELATÓRIO ELETRÔNICO?	SIM ☒ NÃO ☐

QUADRO 8			
CONFIRMAÇÃO METROLÓGICA DA MEDIÇÃO			
ESTUDO	MSA ☒ INCERTEZA DE MEDIÇÃO ☒ CEP ☐ OUTRO MÉTODO ☐		
TOLERÂNCIA DE PROJETO	Depende de cada característica	TOLERÂNCIA NA PRODUÇÃO	Não disponível
CRITÉRIO DE VALIDAÇÃO DO MÉTODO			
RELAÇÃO PROJETO/INCERTEZA DE MEDIÇÃO?	TOLERÂNCIA PROCESSO	DE	Inicialmente 3 (engrenagens do cubo de serão produzidas em série)
RELAÇÃO PRODUÇÃO/INCERTEZA DE MEDIÇÃO?	TOLERÂNCIA PROCESSO	DE	
ÍNDICE DE CAPABILIDADE DE MEDIÇÃO			
OUROS CRITÉRIOS (ESPECIFICAR)			
OBSERVAÇÕES:			
A empresa deverá implantar estudo de MSA e CEP conforme realiza para todas as características críticas de outros produtos.			

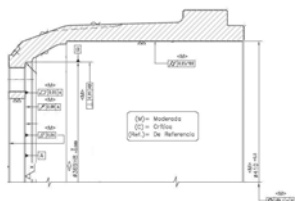
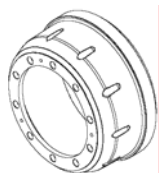
ANEXO C

Neste anexo consta o modelo de formulário para elaboração da estratégia de medição aplicado na medição do tambor de freio.

**FORMULÁRIO PARA ELABORAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE MEDIÇÃO
(ESTUDO DE CASO – TAMBOR DE FREIO)**

QUADRO 1					
INFORMAÇÕES GERAIS				DATA/REVISÃO: xxxx	
NOME PEÇA	Tambor de freio	Nº PEÇA	xxxx	Nº/DATA DESENHO	xxxx
MMC	Mitutoyo BLN C 710	LOCAL DE MEDIÇÃO	Metrologia Usinagem	INCERTEZA 3D DA MMC	1,2 + L/1300
SOFTWARES UTILIZADOS	Geopak Win versão 2.4 R8			DATA CALIBRAÇÃO:	24/06/09
ELABORADO POR:	Luiz /Edson				
CLIENTE	Interno				
ACESSÓRIOS E INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO AUXILIARES	Mesa de fixação três castanhas				
DESENHO CAD DA PEÇA	☒ SIM ☐ NÃO EXTENSÕES DO ARQUIVO: pdf				

QUADRO 2					
INFORMAÇÕES SOBRE A PEÇA				DATA/REVISÃO:	
MATERIAL	Ferro fundido xxx	RIGIDEZ	BAIXA ☐ ALTA ☒	COEF.EXPANÇÃO TERMICA	10 µm/m.K
EST.SUPERFÍCIE	BRUTA ☐ USINADA ☐ AMPS ☒			PESO DA PEÇA	---
DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO	Placa de três castanhas		DEFORMA A PEÇA?	SIM ☒ NÃO ☐	
POSIÇÃO DA PEÇA NA MMC	CENTRO DA MMC		SERÁ NECESSÁRIA ALTERAR A MONTAGEM? SIM		
PROCESSO DE FABRICAÇÃO	Fundição – usinagem CNC				
NECESSÁRIA LIMPEZA DA PEÇA	SIM ☒ NÃO ☐	TEMPERATURA (°C) E TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO (h)	22°C Duas horas		



ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS PARÂMETROS		
Característica	Valor nominal (mm)	Tolerância (mm)
Diâmetro no ressalto	369 H8	-0,0 / +0,089
Paralelismo face interna/face externa	0,00	±0,06
Planeza face interna furação	0,00	±0,05
Perpendicularidade em relação a referência A	0,00	±0,05
Cilindricidade lona de freio	0,00	±0,05/100
Concentricidade diâmetro lona de freio	0,00	±0,10
Batimento circular axial em relação a referência A	0,00	±0,08

Maiores detalhes da medição estão no programa de medição da MMC

QUADRO 3					
APALPADOR: SELEÇÃO E CARACTERÍSTICA DA MEDIÇÃO					
TIPO DO APALPADOR		TIPO DE MEDIÇÃO	PONTO A PONTO ☒	CONTATO CONTÍNUO ☐	
Nº APALPADOR	1	2	3	4	5
DIÂMETRO DA ESFERA (mm)	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
HASTE + TP (mm)	128				
Posição de uso	1	2	3	4	5
COMP. DO APALPADOR (mm)	---				
VEL. DE APALPAÇÃO (mm/s)	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
FORÇA DE APALPAÇÃO	Padrão MMC	Padrão MMC	Padrão MMC	Padrão MMC	Padrão MMC
QUALIFICAÇÃO DO APALPADOR	MANUAL ☐ CNC ☒ ESFERA PADRÃO ☐ OUTRO PADRÃO ☐				
Qualificação deve ser realizada na esfera padrão fornecida pelo fabricante da MMC fixada no centro da mesa. Devem ser calibrada em todas as posições de uso. O critério de aceitação da qualificação é que o desvio obtido seja inferior ou igual a 0,000 3 mm. Para medições em bruto usar esfera acima de 5 mm diâmetro					

QUADRO 4			
DEFINIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA PEÇA A MEDIR			
DESCRIÇÃO DA CARACTERÍSTICA (citar a função e o tipo de tolerância)	CRÍTICA - C MODERADA - M REFERÊNCIA - R	CÓDIGO OU IDENTIFICAÇÃO	Nº APALPADOR
Diâmetro no ressalto	C	---	1
Paralelismo face interna/face externa	M	---	1
Planeza face interna furação	M	---	1
Perpendicularidade em relação a referência A	M	---	1
Cilindricidade lona de freio	M	---	1
Concentricidade diâmetro lona de freio	M	---	1
Batimento circular axial em relação a referência A	M	---	1

(por questão de confidencialidade das informações, diversos campos estão incompletos propositalmente neste trabalho)

QUADRO 5			
DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA PEÇA A MEDIR			
REFERÊNCIA PRIMÁRIA (DATUM PRIMÁRIO) (Descrever o elemento de referência utilizado e o algoritmo utilizado para o alinhamento)	CONFERE COM A REFERÊNCIA NO DESENHO	Nº DE PONTOS	Nº APALPADOR
Plano da face superior da peça Mínimos quadrados	☐ SIM ☒ NÃO	09	1
REFERÊNCIA SECUNDÁRIA (DATUM SECUNDÁRIO) (Descrever o elemento de referência utilizado e o algoritmo utilizado para o alinhamento) Circulo lona de freio Mínimos quadrados	☐ SIM ☒ NÃO	07	1
REFERÊNCIA TERCIÁRIA (DATUM TERCIÁRIO) (Descrever o elemento de referência utilizado e o algoritmo utilizado para o alinhamento) Circulo furação Mínimos quadrados	☐ SIM ☒ NÃO	07	1
O SISTEMA DE COORDENADAS COINCIDE COM O DEFINIDO NO DESENHO CAD?	☒ SIM ☐ NÃO	OBSERVAÇÕES	

QUADRO 6		
MEDIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA PEÇA A MEDIR		
CÓDIGO DA CARACTERÍSTICA (ver desenho ou outro documento)	SERÁ NECESSÁRIO TESTE DE REPETITIVIDADE?	NÚMERO DA TAREFA
	☐ SIM ☒ NÃO	01
MODO DE MEDIÇÃO	☐ MANUAL ☒ CNC ☐ DIRETAMENTE DO CAD	
DESCRIÇÃO DA CARACTERÍSTICA (importar do quadro 4)	Cilindricidade	
Descrição da tarefa de medição	Medição de círculos com 05 pontos em três alturas espaçadas de aproximadamente 35 mm conforme detalhe no desenho de projeto.	
Descrição e valores das tolerâncias dimensionais e geométricas	Tolerância geométrica $\pm 0,05/100$ (mm)	
Quantidade de pontos em cada elemento medido	05 (por círculo)	
Distribuição dos pontos sobre a superfície	Pontos igualmente espaçados	
Número de seções e alturas (posições)	03 alturas espaçadas de 35 mm	
Número de linhas geratrizes e suas posições	---	
Algoritmo utilizado para avaliação	Mínimos quadrados	
Diâmetro da esfera do palpador	2,00 mm	
OBSERVAÇÕES: Por questão de confidencialidade das informações não serão apresentados os detalhes de medição das outras características citadas no quadro 4)		

QUADRO 7	
CONFIGURAÇÃO DO RELATÓRIO DE MEDIÇÃO	
TIPO	☐ COMPLETO ☒ SIMPLIFICADO (INFORMAÇÕES BÁSICAS)
Relatório simplificado contendo as características medidas e seus desvios, avaliação com a tolerância especificada e gráfico de circularidade.	
RELATÓRIO ELETRÔNICO?	SIM ☒ NÃO ☐
OBSERVAÇÕES:	
Por questão de confidencialidade das informações não serão apresentados os detalhes de medição das outras características citadas no quadro 4)	

(imprimir esta página quantas vezes forem necessárias)

QUADRO 8			
CONFIRMAÇÃO METROLÓGICA DA MEDIÇÃO			
ESTUDO	MSA ☒	INCERTEZA DE MEDIÇÃO ☐	CEP ☒ OUTRO ☐ TODO
TOLERÂNCIA DE PROJETO	Conforme estudo	característica de	TOLERÂNCIA NA PRODUÇÃO
CRITÉRIO DE VALIDAÇÃO DO MÉTODO			
RELAÇÃO PROJETO/INCERTEZA DE MEDIÇÃO?	TOLERÂNCIA DE PROCESSO	DE	
RELAÇÃO PRODUÇÃO/INCERTEZA DE MEDIÇÃO?	TOLERÂNCIA DE PROCESSO	DE	
ÍNDICE DE CAPABILIDADE DE MEDIÇÃO			
OUROS CRITÉRIOS (ESPECIFICAR)			
OBSERVAÇÕES:			
Critérios do manual MSA.			