

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial**

**CALIBRAÇÃO DE PEÇAS PADRÃO EM  
MÁQUINAS DE MEDIR POR COORDENADAS**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina  
para obtenção do grau de Mestre em Metrologia

**Daniel Samuel Hamburg-Piekar**

Florianópolis, 14 de Junho de 2006

# **CALIBRAÇÃO DE PEÇAS PADRÃO EM MÁQUINAS DE MEDIR POR COORDENADAS**

**Daniel Samuel Hamburg-Piekar**

**Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de**

**“MESTRE EM METROLOGIA”**

**e aprovada na sua forma final pelo**

**Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial**

---

**Gustavo Daniel Donatelli, Dr. Eng.**

**ORIENTADOR**

---

**Marco Antônio Martins Cavaco, Ph. D**

**COORDENADOR DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**

**BANCA EXAMINADORA:**

---

**Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.**

---

**André Roberto de Sousa, Dr. Eng.**

---

**Celso Luiz Nickel Veiga, Dr. Eng.**

*A todos los que me enseñaron a ser lo que soy, mis padres, mis hermanos, mis colegas y profesores de la Pos-Graduación.*

*A todos los hombres y mujeres de ciencia en búsqueda por la verdad, en cualquiera de sus formas.*

## *Agradecimentos*

*Ao Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, a todos os professores, alunos e colaboradores que sempre me ajudaram e acreditaram em mim.*

*Ao Prof. Gustavo Donatelli, orientador, amigo e grande conselheiro.*

*Aos Engs. Ânderson Schmidt, Alexandre Lucas e Matheus Dieckmann de Oliveira, da Fundação CERTI, que de diferentes maneiras, colaboraram com o trabalho experimental presente nesta dissertação.*

*Ao Dr. Kim Summerhays, professor da University of San Francisco, EUA, pelas suas contribuições no desenvolvimento do estudo de caso.*

*À Universidade de Aachen (Alemanha), que através do projeto conjunto com a Fundação CERTI, permitiu a concretização deste trabalho.*

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....</b>	<b>I</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>IV</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS.....</b>	<b>VI</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>VIII</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo da presente dissertação .....	4
1.2 Estrutura da dissertação.....	5
<b>2 A TECNOLOGIA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS .....</b>	<b>7</b>
2.1 A rastreabilidade na medição por coordenadas .....	9
2.2 As principais fontes de incerteza na medição por coordenadas.....	12
2.2.1 Os erros geométricos da máquina de medir por coordenadas.....	14
2.2.2 O erro derivado da peça.....	16
2.2.3 O erro derivado do ambiente.....	17
2.2.4 O erro derivado do operador e a estratégia de medição .....	18
2.3 A incerteza de medição em tarefas específicas .....	21
2.3.1 Os algoritmos de ajuste de elementos geométricos.....	21
2.3.2 Os problemas de amostragem .....	25
2.3.3 A importância do software da MMC .....	28
2.4 As características Geométricas do ponto de vista da medição por coordenadas.....	31
2.4.1 Introdução à especificação geométrica de produto .....	31
2.4.2 Estrutura matricial das normas GPS .....	33
2.4.3 O Modelo GPS ou “ <i>Skin Model</i> ” .....	35
2.4.4 <i>Datums</i> ou referências .....	37
2.4.5 Características de tamanho.....	39
2.4.6 Características de forma .....	40
2.4.7 Características de orientação.....	43
2.4.8 Características de localização.....	44
2.4.9 Tolerâncias de linha ou superfície com <i>datums</i> .....	45
2.4.10 Tolerâncias de ângulos e cones.....	46
2.4.11 Tolerâncias de batimento .....	47
2.5 Síntese .....	48
<b>3 PEÇAS PADRÃO: USOS E MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO .....</b>	<b>50</b>
3.1 As peças padrão na indústria e suas aplicações.....	50
3.1.1 Verificação e zeragem de dispositivos de medição.....	50
3.1.1.1 Padrões corporificados simulando peças de produção .....	52
3.1.1.2 Peças de produção calibradas .....	52
3.1.2 Monitoramento contínuo de MMC .....	53
3.1.2.1 Monitoramento contínuo com padrões corporificados.....	54
3.1.2.2 Monitoramento contínuo com peças de produção.....	55

3.1.3 Avaliação de incertezas em MMC .....	57
3.1.3.1 A Norma ISO/TS 15530-3.....	58
3.2 Calibração de peças padrão.....	59
3.2.1 Calibração por medição direta na MMC .....	60
3.2.2 Calibração por substituição .....	61
3.2.3 Calibração por rebatimento .....	64
3.2.4 O projeto de norma ISO/TS 15530-2.....	66
3.3 Avaliação de incertezas na medição por coordenadas .....	69
3.3.1 Método dos coeficientes de sensibilidade (GUM) .....	70
3.3.2 Simulações computacionais .....	72
3.3.2.1 Máquina de Medir por Coordenadas Virtual (VCMM).....	74
3.3.2.2 O Software PUNDIT/CMM™ .....	76
3.3.2.3 Simulação por condições de contorno.....	78
3.3.3 Avaliação por especialistas .....	79
3.4 Limitações dos métodos de calibração e avaliação de incertezas .....	80
3.5 Síntese .....	82
<b>4 O MÉTODO HÍBRIDO: UMA PROPOSTA DE SOLUÇÃO.....</b>	<b>83</b>
4.1 Os três tipos de calibração segundo as necessidades da indústria .....	85
4.1.1 Tipo 1: Calibração por Pontos .....	85
4.1.2 Tipo 2: Calibração por Características .....	86
4.1.3 Tipo 3: Calibração por Condição .....	88
4.2 Sistemática para a criação de procedimentos de calibração em MMC .....	89
4.2.1 O Procedimento de Calibração .....	89
4.2.2 Inteligência Artificial: aplicação do Raciocínio Baseado em Casos na criação de procedimentos de calibração.....	91
4.2.3 Gestão do processo .....	96
4.3 Metodologia geral para avaliação de incertezas pelo método híbrido .....	100
4.3.1 Avaliação de incertezas para características de tamanho.....	103
4.3.2 Avaliação de incertezas para características de forma .....	104
4.3.3 Avaliação de incertezas para características de orientação.....	105
4.3.4 Avaliação de incertezas para características de localização.....	106
4.3.5 Avaliação de incertezas para características de batimento.....	107
4.3.6 Avaliação de incertezas para características de perfil de linha e superfície .....	108
4.4 Bibliografias, normas e recomendações.....	109
4.5 Síntese .....	110
<b>5 ESTUDO DE CASO: IMPLEMENTAÇÃO INFORMATIZADA DA METODOLOGIA NA FUNDAÇÃO CERTI.....</b>	<b>111</b>
5.1 A problemática da peça selecionada.....	112
5.1.1 A necessidade do cliente.....	113
5.1.2 Carcaça de caixa de direção para caminhonetes HSG-P/S - BA.....	113
5.1.3 Proposta de solução.....	114
5.2 Estrutura do aplicativo para gestão da calibração de peças padrão em MMC (MasterPart) .....	117

5.3 Calibração por Características da carcaça de direção utilizando o aplicativo MasterPart.....	119
5.4 Procedimento da Fundação CERTI.....	123
5.5 Avaliação por simulação.....	125
5.6 Discussão dos resultados.....	129
<b>6 CONCLUSÕES E OPORTUNIDADES FUTURAS .....</b>	<b>133</b>
6.1 Conclusões.....	133
6.2 Oportunidades futuras .....	136
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>137</b>
<b>APÊNDICE 1: AS CARACTERÍSTICAS GPS.....</b>	<b>148</b>
<b>APÊNDICE 2: A MATRIZ DE NORMAS GPS .....</b>	<b>149</b>
<b>APÊNDICE 3: VISTAS DA CARCAÇA HSG-P/S.....</b>	<b>150</b>

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Evolução da exatidão dos processos de manufatura e da incerteza com que é realizada a unidade de comprimento <sup>[1]</sup> .....	1
Figura 2 – Frequência de uso dos instrumentos da área dimensional, segundo uma enquete feita na indústria no ano 2004. Adaptado de <sup>[3]</sup> .....	2
Figura 3 – O sistema de CAD-CAM-CMM como um ciclo fechado para a garantia da qualidade na produção. ....	3
Figura 4 – Peças padrão comumente utilizadas na indústria automobilística. Cortesia Etamic.....	4
Figura 5 - A máquina de medir por coordenadas e os seus subsistemas <sup>[2]</sup> .....	8
Figura 6 – Cadeia de rastreabilidade na medição por coordenadas. Adaptado de <sup>[6]</sup> .....	11
Figura 7 – A relação entre as condições de medição e as condições de calibração, simbolicamente representadas como volumes num espaço definido pelos fatores de influência. (Por clareza, somente algumas fontes de incerteza são apresentadas na figura). Adaptado de [6]. ....	12
Figura 8 - Diagrama de Ishikawa das principais fontes de incerteza na medição por coordenadas. Adaptado de <sup>[19]</sup> .....	13
Figura 9 – Principais fontes de erros na construção de elementos substitutos nas MMC. Adaptado de <sup>[5]</sup> .....	13
Figura 10 – O efeito do erro geométrico do carro Y numa MMC de tipo braço <sup>[14]</sup> .....	15
Figura 11 – Importância relativa dos erros geométricos nas MMC <sup>[24]</sup> . O gráfico deve ser entendido qualitativamente, baseado na experiência do especialista consultado. ....	16
Figura 12 – Conhecimentos requeridos pelos operadores de MMC. Adaptado de <sup>[26]</sup> .....	19
Figura 13 - Influência relativa da MMC, do ambiente e do operador sobre a incerteza de medição <sup>[2]</sup> .....	19
Figura 14 – Diferencia entre o elemento PLANO definido normalmente numa MMC (Plano por Mínimos Quadrados) e o elemento definido nas normas ISO e ASME. (Plano Tangente). Adaptado de <sup>[9]</sup> .....	20
Figura 15 – Comparação entre a avaliação orientada à aplicação (ISO 8015) e a avaliação segundo o método de Mínimos Quadrados. <sup>[34]</sup> .....	23
Figura 16 – Tipos de ajuste para círculos segundo a norma ISO 1101 <sup>[34]</sup> .....	25
Figura 17 – Incerteza na medição do diâmetro como uma função do número de pontos e o tipo de ajuste do círculo, para um eixo com erro de forma tri-lobular <sup>[32]</sup> .....	27
Figura 18 – Corpo de provas para análise crítica de software de MMC em relação ao análise de tolerâncias <sup>[39]</sup> .....	29
Figura 19 – Os três níveis fundamentais para os desenhos técnicos descritos nas normas internacionais. Adaptado de <sup>[45]</sup> .....	33
Figura 20 – Modelo de especificação técnica de peças de acordo com as normas GPS. Adaptado de <sup>[48]</sup> .....	35
Figura 21 – Terminologia dos elementos geométricos para o caso do cilindro. Adaptado de <sup>[49]</sup> .....	36

Figura 22 – Sistema de referências de três planos, com utilização de referências alvo. a) Desenho técnico. b) Esquema da fixação. Adaptado de <sup>[34]</sup> .....	38
Figura 23 – Os conceitos de tamanho segundo a ISO/CD 14405. Adaptado de <sup>[43]</sup> .....	40
Figura 24 – Desvios de forma típicos em achados em círculos e cilindros. Adaptado de <sup>[34],[44]</sup> .....	41
Figura 25 – Medição de uma tolerância de perfil em relação a <i>datums</i> numa MMC. Adaptado de <sup>[52]</sup> .....	46
Figura 26 – As duas opções para especificação de ângulos. Adaptado de <sup>[34]</sup> .....	47
Figura 27 – Artefato para zeragem rápida de um dispositivo MARPOSS dedicado à inspeção de carcaças de direção no chão de fábrica. Cortesia WHB Usinagem.....	51
Figura 28 – Artefatos de referência utilizados no monitoramento contínuo de MMC.....	55
Figura 29 – Calibração de uma peça para ser usada como artefato de referencia para monitoramento de MMC no chão de fábrica <sup>[63]</sup> .....	56
Figura 30 - Esquema de uma peça utilizada para monitoramento de MMC junto as cartas de controle de média e amplitude mostrando a variabilidade devida a temperatura <sup>[64]</sup> ....	56
Figura 31 – Carcaça de direção padrão usada como referência para a avaliação de incertezas de uma MMC instalada no chão de fábrica. Cortesia WHB Usinagem.....	57
Figura 32 – O princípio de calibração pelo método de substituição. Adaptado de <sup>[67]</sup> .....	62
Figura 33 – Calibração de um cilindro padrão por substituição. Adaptado de <sup>[82]</sup> .....	63
Figura 34 – Calibração de uma pá de turbina através do uso de objetos padrão modulares. Adaptado de <sup>[83]</sup> .....	63
Figura 35 – Método de rebatimento para calibração de perpendicularidade em esquadros. Adaptado de <sup>[23], [67]</sup> .....	66
Figura 36 – Estratégia de qualificação da esfera do apalpador por rebatimento, utilizada no PTB para medições de comprimento de alta exatidão. Adaptado de <sup>[23]</sup> .....	66
Figura 37 – As contribuições à incerteza segundo a norma ISO/DTS 15530-2 <sup>[84]</sup> .....	68
Figura 38 – Medição da carroceria de um carro e avaliação do erro devido à deformação elástica da chapa pela força de apalpação da MMC. Adaptado de <sup>[18]</sup> .....	71
Figura 39 – Simulação da medição de um plano por Monte Carlo e a distribuição de probabilidade do erro da máquina na escala X. Adaptado de <sup>[77]</sup> .....	73
Figura 40 – Técnica de bootstrap aplicada à análise de planeza. Adaptado de <sup>[80]</sup> .....	73
Figura 41 – O princípio da MMC Virtual (Virtual CMM) desenvolvida pelo PTB. Adaptado de <sup>[67]</sup> .....	74
Figura 42 – O conceito do PUNDIT. Adaptado de <sup>[72]</sup> .....	77
Figura 43 – Simulação por restrições do software PUNDIT. Adaptado de <sup>[72]</sup> .....	77
Figura 44 – Avaliação de incertezas em tarefas específicas através do conceito da Simulação por Condições de Contorno. Adaptado de <sup>[75]</sup> .....	79
Figura 45 – Pontos de controle usados num sistema de medição por transdutores indutivos. Cortesia WHB Usinagem.....	86
Figura 46 – Bloco de compressor para refrigeração, utilizado como padrão na avaliação de incertezas segundo a Norma ISO/TS 15530-3. Adaptado de <sup>[87]</sup> .....	87
Figura 47 – Ciclo de funcionamento do Raciocínio Baseado em Casos (RBCa). Adaptado de <sup>[90]</sup> .....	92

Figura 48 – Relação preço-qualidade de diversos produtos em relação ao produto alvo ideal.....	95
Figura 49 – Fluxograma do processo de calibração de peças padrão pelo Método Híbrido.....	98
Figura 50 – Fluxograma do processo de calibração de peças padrão pelo Método Híbrido (continuação).....	99
Figura 51 – Detalhes do Laboratório de Metrologia Dimensional da Fundação CERTI. Observe-se a MMC Zeiss ZMC 550 e o <i>lay-out</i> dos sensores de temperatura para o controle da climatização (T15, T16, etc.).....	112
Figura 52 – Posição da caixa de direção no veículo (Sistema de direção por esferas recirculantes) e uma foto do produto final. A carcaça refere-se à parte externa da caixa de direção. Cortesia Visteon.....	114
Figura 53 – Modelo CAD em 3D da carcaça de direção e detalhe do desenho técnico baseado nas normas ISO. As vistas principais da peça podem ser consultadas no Apêndice 3.....	115
Figura 54 – A carcaça de medição montada no sistema de fixação modular Witte.....	116
Figura 55 – Menu principal do aplicativo para gestão de procedimentos de calibração em MMC (MasterPart).....	117
Figura 56 – Os parâmetros de pesquisa e recuperação de procedimentos de medição, baseados em RBCa.....	121
Figura 57 – Janela do PUNDIT correspondente à carcaça de direção importada do modelo CAD 3D.....	127
Figura 58 – Janela de resultados do PUNDIT, apresentando o histograma simulado por Monte Carlo e o valor de incerteza achado para o diâmetro do furo de 41,277 mm.....	127
Figura 59 – Gráfico de colunas empilhadas das quatro principais fontes de incerteza consideradas pelo software PUNDIT.....	128
Figura 60 - Resultado da comparação realizada na calibração da carcaça.....	130
Figura 61 – Análise de correlação entre incertezas fornecidas pelo Método Híbrido e por simulação (PUNDIT).....	131

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre a metrologia convencional e a metrologia por coordenadas [14] .....	9
Tabela 2 – Métodos de ajuste normalizados para avaliação de tolerâncias [32] .....	22
Tabela 3 – Número de pontos recomendados por diferentes autores para a avaliação das geometrias básicas na medição por coordenadas. ....	27
Tabela 4 – Tipo de avaliação para tolerâncias de forma e as normativas particulares a cada especificação. Adaptado de [34] .....	42
Tabela 5 – Classificação das tolerâncias de orientação segundo os elementos e referências utilizados. Adaptado de [34] .....	43
Tabela 6 – Exemplos de aplicação de tolerâncias de perfil e superfície em relação a <i>datums</i> . Adaptado de [34] .....	45
Tabela 7 – Procedimentos de medição por rebatimento em MMC [23],[81] .....	65
Tabela 8 - Matriz de comparação das diferentes metodologias de avaliação de incertezas em medições com MMC. Adaptado de [5][6][9][71][72][81] .....	81
Tabela 9 – Conteúdos mínimos recomendados do Procedimento de Calibração (1) .....	89
Tabela 10 – Conteúdos mínimos recomendados do Procedimento de Calibração (2) .....	90
Tabela 11 – As equações gerais do Método Híbrido de avaliação de incertezas. ....	101
Tabela 12 – Coeficientes de sensibilidade das seis fontes de incerteza, classificados segundo o mensurando e o tipo de calibração. Adaptado de [9] .....	102
Tabela 13 – Definição dos parâmetros fundamentais utilizados nas equações do Método Híbrido. ....	103
Tabela 14 – Resumo das equações para avaliação de incertezas e os parâmetros de sensibilidade específicos das características de tamanho. ....	104
Tabela 15 - Resumo das equações para avaliação de incertezas e os parâmetros de sensibilidade específicos das características de forma. ....	105
Tabela 16 - Resumo das equações para avaliação de incertezas e os parâmetros de sensibilidade específicos das características de orientação. ....	106
Tabela 17 - Resumo das equações para avaliação de incertezas e os parâmetros de sensibilidade específicos das características de localização. ....	107
Tabela 18 - Resumo das equações para avaliação de incertezas e os parâmetros de sensibilidade específicos das características de localização. ....	108
Tabela 19 - Resumo das equações para avaliação de incertezas e os parâmetros de sensibilidade específicos das características de localização. ....	109
Tabela 20 – Resumo das principais referências relacionadas à calibração de peças padrão.....	110
Tabela 21 – Os níveis do sistema RBCa selecionados para as condições particulares do laboratório de calibração. ....	120
Tabela 22 – Resumo da principais informações relacionadas à calibração da carcaça de direção.....	122
Tabela 23 – Resultados da calibração da carcaça de direção pelo Método Híbrido.....	122

Tabela 24 - Resultados da calibração da carcaça de direção pelo procedimento certificado RBC.....	124
Tabela 25 – Resumo das informações enviadas à empresa MetroSage para simulação de incertezas. ....	126
Tabela 26 - Resultados da simulação de incertezas utilizando o software PUNDIT.....	128

## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>MMC</b>	<i>Máquina de Medir por Coordenadas</i>
<b>GPS</b>	<i>Especificação Geométrica de Produtos (Geometrical Product Specifications)</i>
<b>GD&amp;T</b>	<i>Projeto e Especificação Dimensional (Geometrical Design and Tolerancing)</i>
<b>CAD</b>	<i>Desenho Assistido por Computador (Computer Aided Design)</i>
<b>CAM</b>	<i>Fabricação assistida por Computador (Computer Aided Manufacturing)</i>
<b>CMM</b>	<i>Máquina de Medir por Coordenadas (Coordinate Measuring Machine)</i>
<b>VCMM</b>	<i>Máquina de Medir por Coordenadas Virtual (Virtual Coordinate Measuring Machine)</i>
<b>GUM</b>	<i>Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (Guide for the Expression of Uncertainty in Measurement)</i>
<b>CMI</b>	<i>Centro de Metrologia Instrumentação</i>
<b>ISO</b>	<i>International Standardization Organization (Organização Internacional para a Padronização)</i>
<b>ASME</b>	<i>American Society of Mechanical Engineers (Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos)</i>
<b>PTB</b>	<i>Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Laboratório Federal de Padrões da Alemanha)</i>
<b>NPL</b>	<i>National Physical Laboratory (Laboratório Nacional de Física do Reino Unido)</i>
<b>NIST</b>	<i>National Institute of Standards and Technology (Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia dos Estados Unidos)</i>
<b>CAA</b>	<i>Computer Aided Accuracy (Precisão Assistida por Computador)</i>
<b>RBCa</b>	<i>Raciocínio Baseado em Casos</i>
<b>RBC</b>	<i>Rede Brasileira de Calibração</i>
<b>IA</b>	<i>Inteligência Artificial</i>
<b>BC</b>	<i>Base de Casos</i>
<b>NNA</b>	<i>Nearest Neighbor Algorithm (Algoritmo do vizinho mais próximo)</i>
<b>WNA</b>	<i>Weighted Nearest Neighbor Algorithm (Algoritmo do vizinho mais próximo ponderado)</i>

## RESUMO

As máquinas de medir por coordenadas (MMC) vêm tornando-se cada vez mais essenciais nas tarefas de medição dimensional industrial. O grande potencial e versatilidade das MMC para medição das mais diversas características geométricas e dimensionais é o principal motivo da sua grande aceitação, dos laboratórios de calibração até o chão de fábrica. Ironicamente, são as características de versatilidade e universalidade das MMC que levaram a um dos maiores problemas de implementação: a avaliação de incertezas em tarefas específicas de medição. A avaliação de incertezas é o requisito fundamental para fornecer rastreabilidade às medições, como parte integral dos requisitos do sistema de qualidade segundo a série de normas ISO 9000. Atualmente, a metodologia mais aceita no mundo para fornecer rastreabilidade utiliza recursos de simulação por computador e software específico, sendo seu uso limitado a laboratórios de referência devido a seu alto custo de implementação.

Este trabalho apresenta uma sistemática consistente para a calibração de peças padrão em máquinas de medir por coordenadas. As peças padrão calibradas utilizando esta metodologia podem ser utilizadas em conjunto com a norma ISO 15530-3 para avaliar incertezas de medições em MMC de inferior exatidão. A metodologia proposta é baseada na correta definição do mensurando, através da utilização do desenho técnico da peça, em conjunto com uma série de recomendações e boas práticas da metrologia por coordenadas. Ênfase é dada a estratégias de medição consistentes, baseadas geralmente numa alta densidade de pontos adquiridos. As incertezas são avaliadas através de um modelo de medição de acordo com o procedimento de medição, considerando as principais fontes de incerteza contribuindo no erro de medição. As contribuições são ponderadas através de uma série de coeficientes que melhor refletem o conhecimento prévio do processo de medição para a característica a ser medida. Alguns recursos de Inteligência Artificial são aplicados para acelerar o processo de criação de procedimentos de medição adequados, facilitando a tarefa dos executores da calibração. A sistemática proposta foi aplicada na calibração de uma carcaça de direção padrão, e resultados preliminares mostraram-se promissores.

# ABSTRACT

Coordinate measuring machines (CMM) have become essential for industrial measuring technology. The potential and versatility of CMMs to measuring several geometrical and dimensional features, it's one of the main reasons for its acceptance in calibration laboratories and the production floor.

Ironically, the benefits lead to one of the most significant implementations problems: the uncertainty evaluation of the CMM measurement process. Uncertainty evaluation is a fundamental requisite to establish traceability to measurement results, as an integral part of quality assurance according to the ISO 9000 series of standards. The most accepted methodology in today's world is based in computer simulations, specific software and reference objects. This approach is only economically viable for reference laboratories due its prohibited implementation costs.

This work introduces a consistent methodology for the calibration of master parts using coordinate measuring machines. Master parts calibrated using this approach can be used in connection with ISO 15530-3 for the uncertainty assessment of others CMM, when measuring similar parts. The methodology proposed applies the real measurand definition according to the technical drawing, and gives recommendations and good practices guides to the final user of the coordinate measuring technique. Consistent measurement strategies are the fundamentals of this methodology, generally based in high-density points of measurement. Assessment of uncertainties is performed using models in complete agreement with the measurement procedure, considering all major uncertainty contributions. These contributions were weighted using a series of sensitivity coefficients that better reflects the previous knowledge of the measurement process for a given measurand. Resources from Artificial Intelligence were applied to accelerate the development of adequate measurement procedures, simplifying the work of the CMM operator. The methodology was used to calibrate a cast iron steering case, and promising preliminary results were obtained.

# 1 INTRODUÇÃO

A medição é uma parte integral da nossa vida cotidiana. Aparece em todos os aspectos do dia-a-dia, embora a maioria das pessoas não o perceba. Desde os tempos da construção das pirâmides até hoje em dia na produção de computadores, a necessidade do homem por instrumentos de medição e padrões de medida aumentou exponencialmente.

Na medição de comprimento, a evolução da metrologia acompanhou a crescente necessidade na produção de bens cada vez mais complexos e de maior componente tecnológica. Nos últimos dois séculos, a incerteza de medição associada à realização da unidade de comprimento baseado no metro, diminuiu na forma de uma função potencial <sup>[1]</sup>, como se apresenta na Figura 1.

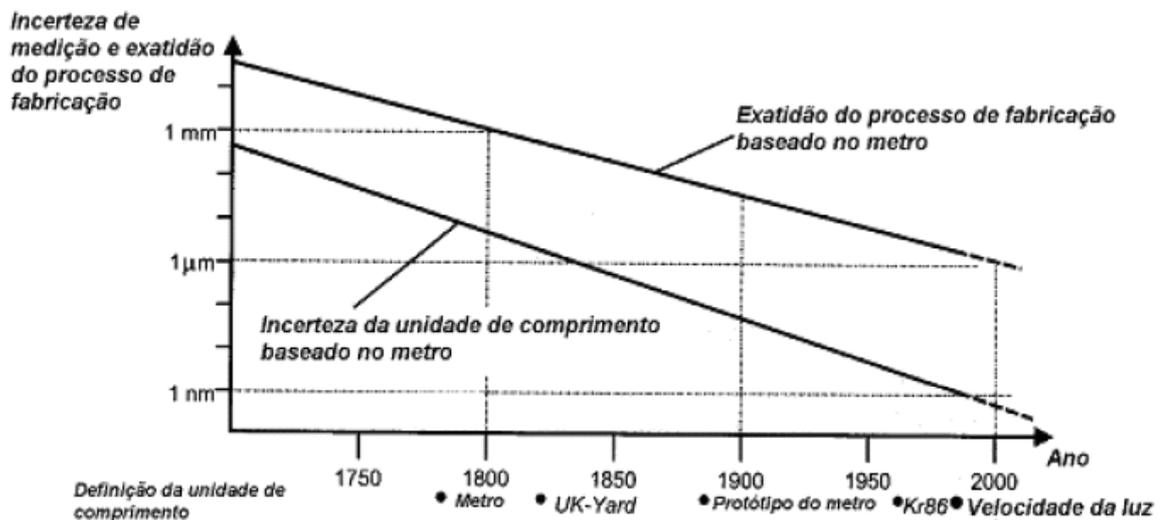


Figura 1 - Evolução da exatidão dos processos de manufatura e da incerteza com que é realizada a unidade de comprimento <sup>[1]</sup>.

A metrologia por coordenadas vem crescendo continuamente desde seu surgimento ao final da década dos 50's. Desde então, dezenas de fabricantes vêm produzindo máquinas de medir por coordenadas (MMC) para suprir a demanda na indústria e nos laboratórios de calibração e pesquisa. Porém, a metrologia

dimensional continua sendo dominada na atualidade por instrumentos convencionais, como se apresenta na Figura 2.

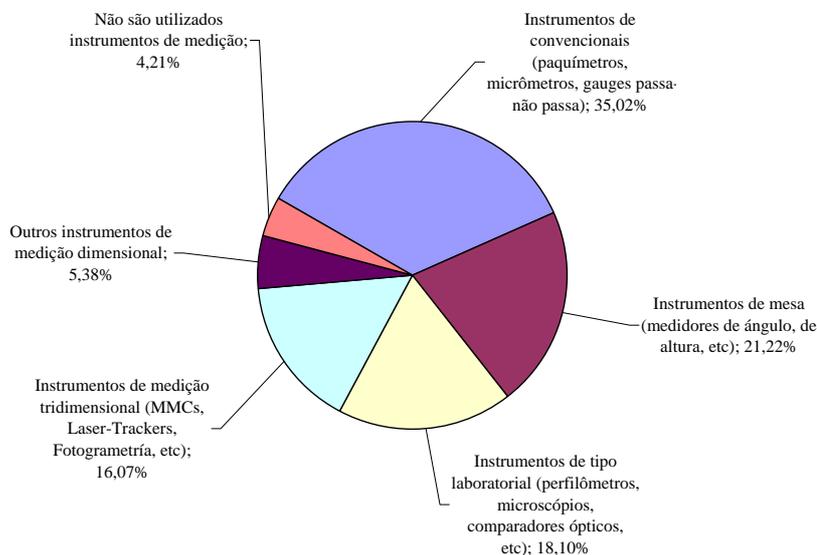


Figura 2 – Frequência de uso dos instrumentos da área dimensional, segundo uma enquete feita na indústria no ano 2004. Adaptado de [3].

Na indústria, a principal aplicação das MMC é a de controle geométrico da produção. Assim, uma trilogia interessante aparece como uma inovação na Era Digital: a trilogia CAD/CAM/CMM (Desenho Assistido por Computador, Fabricação Assistida por Computador e Máquina de Medir por Coordenadas). O sistema formado por esta trilogia permite uma retroalimentação entre os processo de projeto, fabricação e inspeção envolvidos nas tarefas de produção de peças metal-mecânicas (Figura 3). Para este ciclo funcionar, pessoas de todas as áreas envolvidas devem trabalhar juntas, em colaboração e completa sincronia. Embora na teoria este ciclo seja ideal do ponto de vista de desenvolvimento de produto, de acordo a série de Normas ISO 9000 [4], na prática, diversos problemas prejudicam seu normal desenvolvimento. Especificamente na área da medição por coordenadas, o maior problema é estimar as incertezas das medições [5], [6], [7].

Esse problema foi abordado no ano 2004 pelo comitê ISO-TC 213 ao publicar a Norma ISO 15530-3<sup>[8]</sup>, “Avaliação de Incertezas em Máquinas de Medir por Coordenadas Utilizando Peças Calibradas”. Esta metodologia implica no uso de peças calibradas, com características de semelhança com as peças a serem medidas, para assim poder estabelecer rastreabilidade pelo método de substituição.

Para obter as peças calibradas que a norma precisa, é necessária uma metodologia de calibração bem estabelecida. O mesmo comitê está abordando este problema com a futura publicação das partes 2, 4 e 5 da ISO 15530.

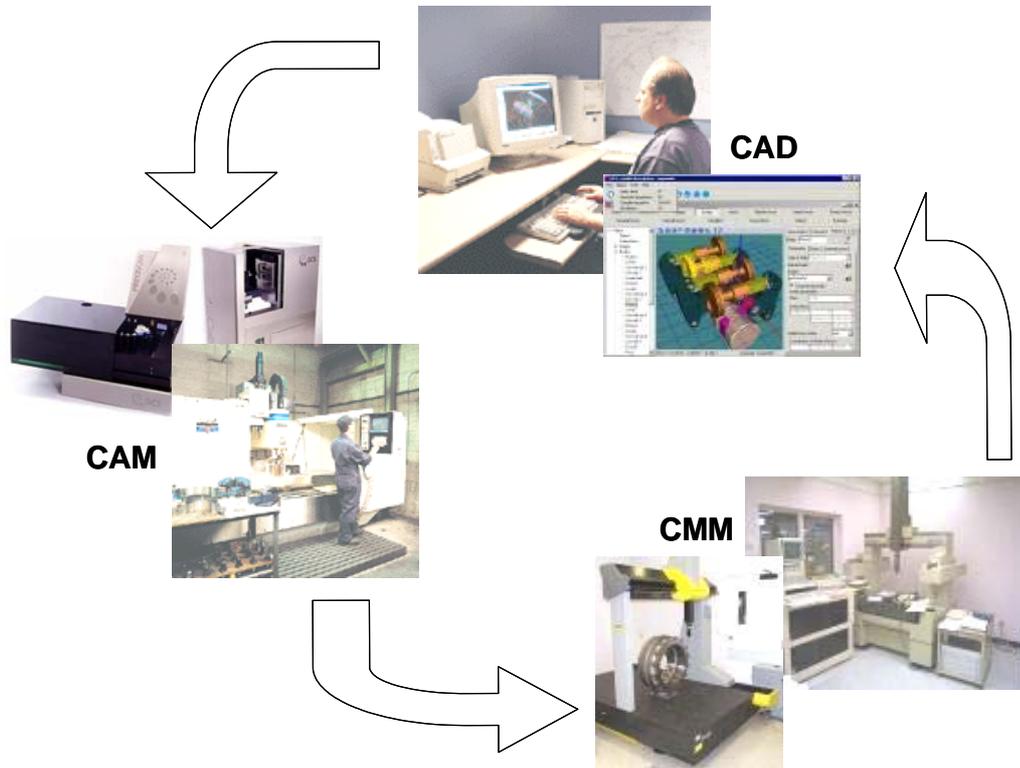


Figura 3 – O sistema de CAD-CAM-CMM como um ciclo fechado para a garantia da qualidade na produção.

Entretanto, não existe uma metodologia universalmente aceita para avaliação de incertezas para tarefas específicas em MMC [5], [9]. Provavelmente, a metodologia mais aceita seja a VCMM (Máquina de Medir por Coordenadas Virtual) que utiliza simulação por computador pela técnica de Monte Carlo para avaliação de incertezas [10]. Devido ao alto custo da aplicação da VCMM, seu uso é limitado a alguns laboratórios de alto nível localizados na Europa. Laboratórios de calibração de nível meio utilizam geralmente balanços de incertezas simples baseados no GUM [11] (*Guide for the Expression of Uncertainty in Measurement*) para fornecer rastreabilidade às medições. Há outros procedimentos e sistemas, mas a aplicação dos métodos existentes ainda é deficiente no que diz respeito à avaliação de uma fonte de incertezas de muita importância: o erro devido à interação da estratégia de medição com a geometria real da peça [12].

## 1.1 OBJETIVO DA PRESENTE DISSERTAÇÃO

O objetivo desta dissertação de mestrado é desenvolver uma metodologia de calibração de peças padrão em total harmonia com a definição do mensurando, estabelecendo uma sistemática que detalhe em profundidade a estratégia de medição utilizada, criada a partir das melhores práticas da metrologia por coordenadas conhecidas atualmente. Entende-se por peças padrão aquelas peças obtidas da linha de produção ou produzidos especialmente, cujas características geométricas e dimensionais são calibradas para servir como referência em medições futuras de peças similares. As características de similaridade entre a peça calibrada e as peças medidas rotineiramente são estabelecidas previamente, a partir da análise dos mensurandos e a função da peça.



Figura 4 – Peças padrão comumente utilizadas na indústria automobilística. Cortesia Etamic.

A metodologia proposta permitirá fornecer rastreabilidade às medições através de uma avaliação de incertezas de acordo com o GUM, contemplando as maiores fontes de incertezas atuantes no processo de medição.

Uma série de benefícios decorre da utilização de uma metodologia consistente para avaliação de incertezas para tarefas específicas em MMC. No que diz respeito à redução de custos com padrões e calibrações, a metodologia proposta permitirá avaliar objetivamente quais são as fontes de incertezas que deverão ser sistematicamente reduzidas para melhorar a exatidão das medições. Além disso, uma análise objetiva dos procedimentos de medição e as estratégias utilizadas

favorecerão a redução dos tempos de calibração, ou se for o caso, indicará a realização de uma calibração mais demorada com o fim de reduzir incertezas.

As empresas que solicitem os serviços de calibração de peças padrão obterão um aumento da confiabilidade metrológica na medição de produção, resultando na redução de custos por retrabalhos e refugos.

Além disso, a implementação da metodologia presente nesta dissertação resultará na consolidação de uma nova vertente de negócios para o sistema LABMETRO/CERTI:

- Soluções metrológicas para cálculo de incerteza em tarefas específicas.
- Supervisão e monitoramento de MMC.
- Serviços de calibração de peças padrão.

Por fim, será apresentada uma sistemática para implantação no processo de calibração de peças do Laboratório de Metrologia por Coordenadas da Fundação CERTI. A Fundação CERTI (Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras) é uma instituição independente e sem fins lucrativos, de pesquisa e desenvolvimento tecnológico, com foco na inovação em negócios, produtos e serviços. O laboratório está situado em Florianópolis, capital do estado de Santa Catarina.

## **1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Para a realização deste trabalho, no Capítulo 2 foi levado a cabo um levantamento bibliográfico sobre: a tecnologia de medição por coordenadas, as principais fontes de incertezas intervenientes na medição, os problemas relacionados à amostragem e às estratégias de medição, a relação com o mensurando através das especificações no desenho técnico, e finalmente, as características geométricas do ponto de vista da medição por coordenadas.

No Capítulo 3, ainda no âmbito do estado da arte, são apresentados os usos principais das peças padrão e os métodos de calibração existentes na atualidade, bem como as normas atuais e suas limitações.

O Capítulo 4 apresenta a metodologia de solução proposta, detalhando os três tipos possíveis de calibração, a sistemática de criação de procedimentos de

medição, o modelo de avaliação de incertezas e as recomendações finais para o metrologista por coordenadas.

No Capítulo 5, descreve-se a aplicação parcial da sistemática no ambiente do Laboratório de Metrologia por Coordenadas do Centro de Metrologia Instrumentação (CMI) e apresenta-se um aplicativo para a gestão do processo de calibração de peças padrão.

Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões do trabalho e sugestões para estudos futuros.

No decorrer desta dissertação de mestrado, serão utilizadas algumas palavras, expressões ou siglas em Inglês, pois a tradução para o português não é comumente empregada na prática. Porém, ao serem apresentadas pela primeira vez no texto, estas palavras ou expressões serão traduzidas ou será apresentada uma breve descrição sobre o significado das mesmas.

## 2 A TECNOLOGIA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS

Máquinas de medir por coordenadas (MMC) são aquelas máquinas que fornecem representações de sistemas coordenados cartesianos, retilíneos e tridimensionais. Existem outros tipos de máquinas de medir que reproduzem sistemas coordenados tridimensionais, mas que não apresentam eixos retilíneos <sup>[14]</sup>:

- Sistemas de localização por triangulação.
- *Laser-trackers*.
- Sistemas de localização por medição de tempo de voo de radiações eletromagnéticas (luz visível, infravermelho, laser).
- Sistemas ópticos de medição (Estereoscopia, Fotogrametria, Interferometria, Topogrametria).
- Braços de medição.

A função principal de um sistema de medição por coordenadas é medir a geometria real de uma peça, comparar com o elemento geométrico ideal e avaliar a informação resultante, como tamanho, forma, localização e orientação.

Em MMC, a geometria de uma peça é obtida por apalpação de pontos discretos sobre a superfície. Cada ponto medido é expresso na forma de coordenadas medidas. Porém, não é possível avaliar os parâmetros da peça (e.g. diâmetro, distância, ângulo, etc.) diretamente das coordenadas dos pontos medidos. Portanto, um modelo analítico da peça é utilizado para avaliar estes parâmetros. O modelo geralmente consiste em formas geométricas ideais, também chamadas de elementos geométricos substitutos <sup>[15]</sup>. Estes elementos são determinados aplicando algoritmos de melhor ajuste aos pontos medidos. Os algoritmos de ajuste utilizados

devem ser os apropriados para cada tarefa específica de medição, dependendo da função da peça.

O sistema de medição que foi implicitamente definido anteriormente é a base da tecnologia de medição por coordenadas <sup>[14]</sup>. Assim, as MMC consistem fundamentalmente dos subsistemas detalhados na Figura 5.

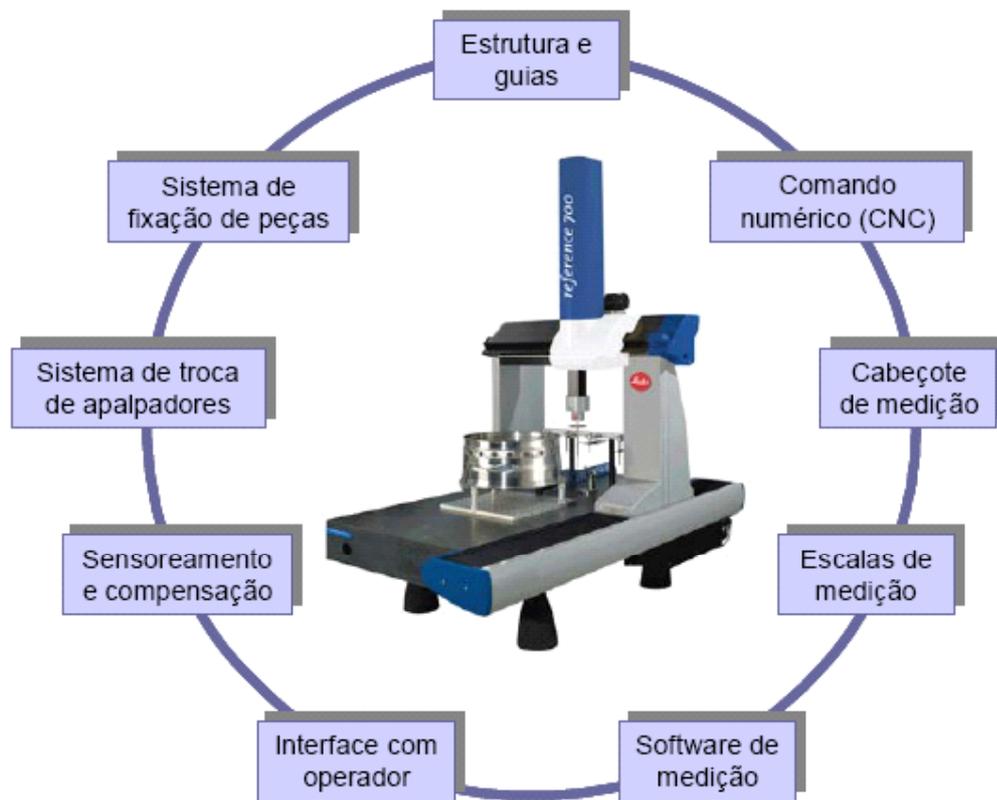


Figura 5 - A máquina de medir por coordenadas e os seus subsistemas <sup>[2]</sup>.

As medições com MMC implicam sempre na realização dos seguintes passos:

1. Qualificação do sistema de apalpação e calibração da ponta de medição (esfera, disco, etc), utilizando, por exemplo, uma esfera padrão.
2. Identificação da posição da peça (sistema coordenado peça) no sistema coordenado máquina.
3. Medição de pontos coordenados na superfície da peça.
4. Apresentação dos resultados da medição após a transformação das medições no sistema coordenado peça.

Em comparação, na metrologia dimensional convencional, os elementos geométricos são geralmente medidos independentemente uns dos outros, e

utilizando diferentes instrumentos de medição (e.g. comparadores, máquinas de medir forma, paquímetros, micrômetros, perfilômetros, etc). Nestes instrumentos, cada medição é realizada utilizando sistemas de referência totalmente diferentes. Além disso, os elementos de referência são medidas materializadas, tais como blocos padrão, anéis padrão, esquadros padrão, réguas padrão e engrenagens padrão, entre outros. Na metrologia por coordenadas, os elementos geométricos são comparados com modelos matemáticos. Na Tabela 1 pode-se observar uma comparação entre as duas formas de medir geometrias.

Tabela 1 – Comparação entre a metrologia convencional e a metrologia por coordenadas <sup>[14]</sup>.

<b>Metrologia Convencional</b>	<b>Metrologia por Coordenadas</b>
Alinhamento manual.	Alinhamento computadorizado.
Instrumentos de propósito único, difíceis de adaptar quando são requeridas múltiplas tarefas.	Múltiplas tarefas de medição podem ser executadas através da capacidade de adaptação do software de medição.
Comparação das medições com medidas materializadas (e.g. blocos padrão).	Comparação com modelos matemáticos ideais.
Avaliação separada para forma, tamanho, localização e orientação, utilizando instrumentos diferentes.	Avaliação de forma, tamanho, localização e orientação, utilizando uma única configuração no sistema coordenado.

Embora as grandes vantagens da metrologia por coordenadas sejam evidentes, existe um problema de implementação, já que fornecer rastreabilidade às medições implica em estabelecer incertezas, as quais são geralmente difíceis de avaliar. Entender as origens e conseqüências deste problema será o objeto de estudo nas seções a seguir.

## **2.1 A RASTREABILIDADE NA MEDIÇÃO POR COORDENADAS**

Historicamente, rastreabilidade tem significado a capacidade de produzir uma série de certificados de calibração, começando na medição do artefato de interesse, até chegar nos padrões dos laboratórios nacionais de referência.

A partir do ano 1993 adotou-se uma definição de rastreabilidade:

Rastreabilidade (VIM 6.10) <sup>[16]</sup>: Propriedade do resultado de uma medição ou do valor de um padrão estar relacionado a referências estabelecidas, geralmente a padrões nacionais ou internacionais, através de uma cadeia contínua de comparações, todas tendo incertezas estabelecidas.

O conceito de rastreabilidade segundo essa definição implica duas coisas: primeira, a habilidade de demonstrar uma cadeia de comparações pela qual as medições são referenciadas ao SI (Sistema Internacional) de unidades; segunda, a habilidade de expressar a incerteza dessas medições em relação ao padrão internacional.

Enquanto as redes de laboratórios nacionais vão lentamente adotando o novo sistema, o problema da rastreabilidade atinge com mais força diretamente no chão de fábrica. O comércio internacional e os requisitos contratuais geralmente demandam que as medições sejam rastreáveis, complicando grandemente o trabalho do metrologista industrial. Ao contrário dos laboratórios de calibração, onde são realizadas pequenas quantidades de medições em artefatos altamente idealizados e sob condições ambientais bem controladas, na indústria é realizada uma grande quantidade de medições, em artefatos complexos e com uma grande quantidade de tolerâncias diferentes, sob condições ambientais que mudam continuamente.

As MMC representam fielmente essa situação, já que elas são instrumentos altamente flexíveis, possibilitando a medição de uma vasta diversidade de mensurandos, em diferentes posições e orientações, com várias configurações de apalpador e diferentes estratégias de medição.

Como consequência da vasta diversidade de mensurandos susceptíveis de ser medidos nas MMC, o termo “incerteza de medição para tarefas específicas” é geralmente utilizado. O principal motivo para utilizar esse termo é ressaltar a diferença entre os resultados de um teste de performance, geralmente usado para avaliar o desempenho da MMC (na calibração periódica da MMC ou em contratos de compra-venda) e a incerteza associada à medição de uma determinada característica de uma peça, sob condições específicas.

Em geral, a calibração de uma MMC envolve a medição de artefatos unidimensionais calibrados (e.g. blocos padrão ou padrões escalonados) juntamente com a medição da temperatura com termômetros calibrados (os comprimentos dos objetos são definidos a 20 °C), para fornecer uma relação entre as três escalas lineares e a unidade de comprimento do SI (Figura 6). Para a calibração do diâmetro da esfera do apalpador também é utilizado um artefato calibrado, geralmente uma esfera padrão.

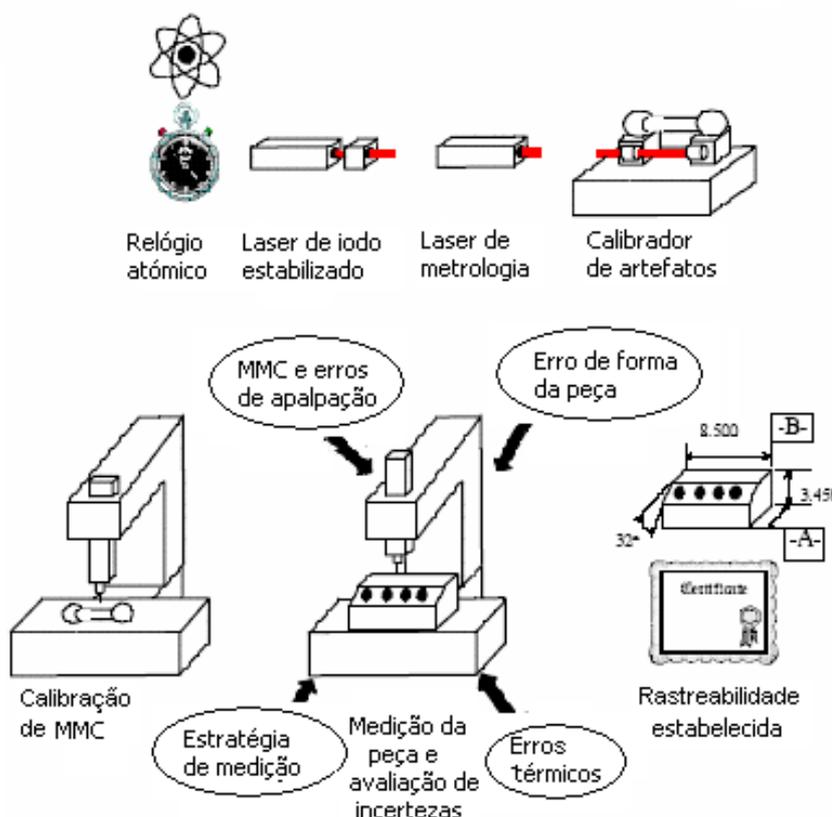


Figura 6 – Cadeia de rastreabilidade na medição por coordenadas. Adaptado de [6].

O principal problema na avaliação de incertezas em MMC é que o mensurando e as condições da calibração são geralmente muito diferentes do mensurando e as condições de medição das características medidas no dia-a-dia [5], [6]. Assim, o mensurando presente na calibração pode ser a distância entre dois pontos ao longo de uma linha específica no volume de trabalho da MMC, enquanto o mensurando numa tarefa de inspeção rotineira pode ser a concentricidade entre dois furos (Figura 7).

Deste modo, quanto maior for a distância entre as condições de calibração e as condições da medição, maior a quantidade de trabalho adicional que será necessária para fornecer rastreabilidade às medições. Esta informação adicional pode ser derivada do teste específico do apalpador, uma avaliação do erro geométrico da máquina, informação empírica ou computacional de como será o impacto da estratégia de medição em relação ao erro de forma da peça e assim por diante.

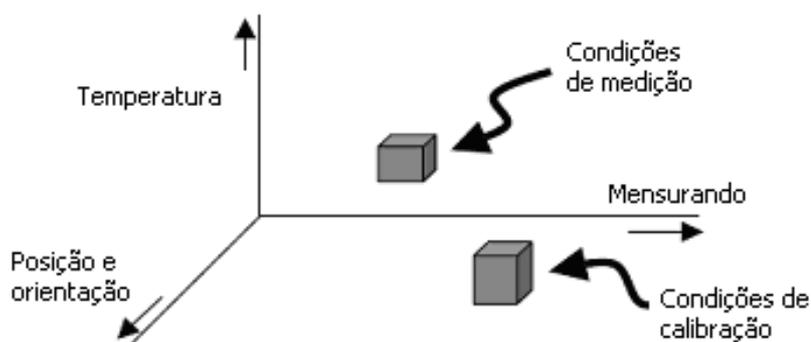


Figura 7 – A relação entre as condições de medição e as condições de calibração, simbolicamente representadas como volumes num espaço definido pelos fatores de influência. (Por clareza, somente algumas fontes de incerteza são apresentadas na figura). Adaptado de [6].

A situação mais comum se apresenta quando o metrologista precisa compor toda essa informação, além da fornecida pelo certificado de calibração, num balanço de incertezas que contemple todas as principais fontes de erros atuantes na medição. Do mesmo modo, converter a informação fornecida pelo certificado de calibração em informação útil para a medição real é um problema de difícil solução.

## 2.2 AS PRINCIPAIS FONTES DE INCERTEZA NA MEDIÇÃO POR COORDENADAS

Na literatura, os erros de uma máquina de medir a três coordenadas são agrupados geralmente, segundo as suas fontes. Devido à grande diversidade destas fontes de erro, cada autor sugere uma classificação diferente <sup>[5],[9],[10],[17],[18],[19]</sup>. Para fins desta dissertação, as fontes de incerteza atuantes na medição por coordenadas é categorizada em quatro grandes grupos: Máquina, Peça, Ambiente, e finalmente, Operador e Estratégia de Medição (Figura 8).

Alguns autores apresentam uma outra categoria como fonte de erros na medição por coordenadas, chamada de “Fatores Extrínsecos” [5]. Nesta categoria, diversos fatores como o operador, a limpeza, filtragem e fixação da peça, entre outras, se combinam com as demais fontes de incerteza para contribuir no erro na determinação do elemento geométrico associado à medição (Figura 9).

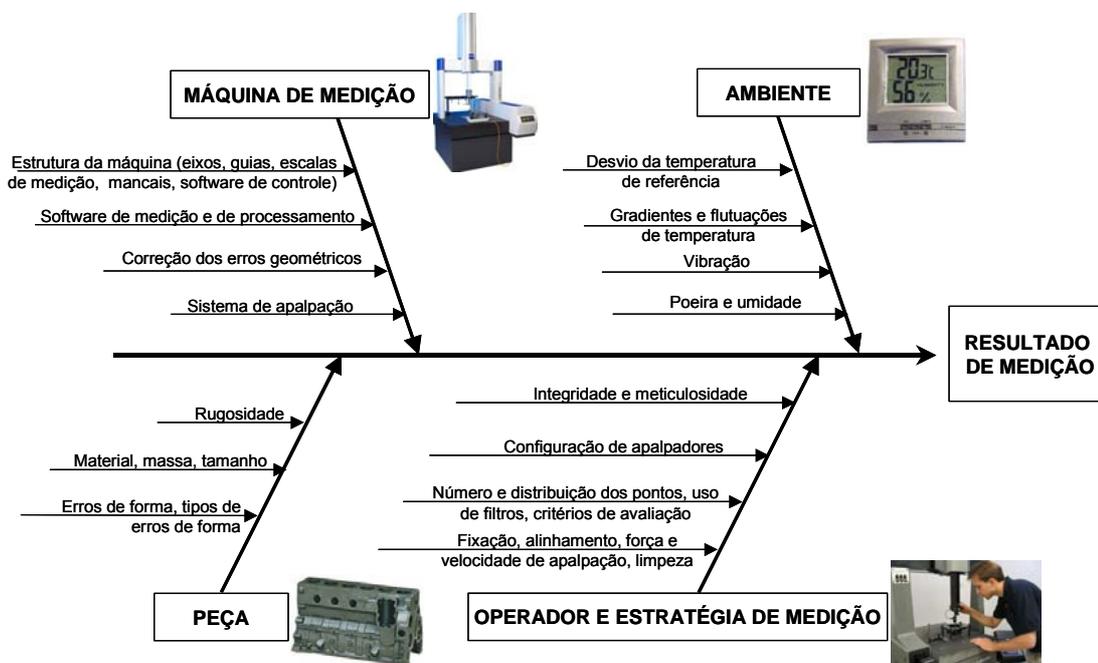


Figura 8 - Diagrama de Ishikawa das principais fontes de incerteza na medição por coordenadas. Adaptado de [19].

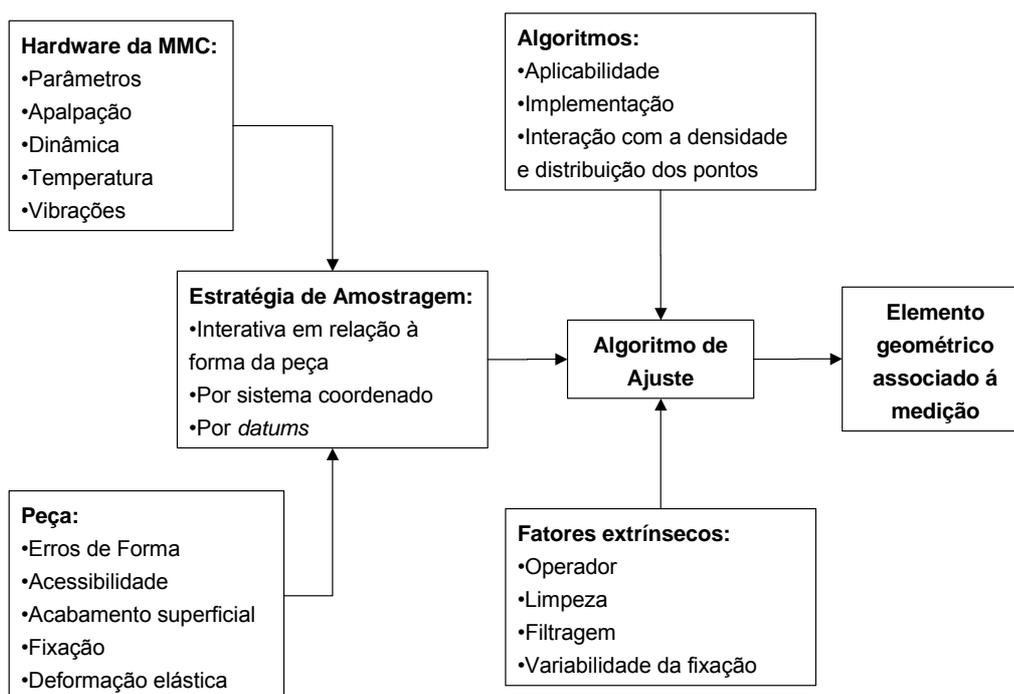


Figura 9 – Principais fontes de erros na construção de elementos substitutos nas MMC. Adaptado de [5].

A vantagem da classificação apresentada na figura anterior reside na forma em que as diversas fontes de incerteza se combinam para formar o resultado final da medição orientada à aplicação: o elemento geométrico associado. Porém, mais importante que a realização de um tipo específico de categorização é a habilidade de poder determinar quais são as fontes de incertezas influenciando numa determinada medição, e a possibilidade de avaliar corretamente sua influência na incerteza de medição.

Nas seguintes seções, as componentes principais das quatro grandes categorias de fontes de erros serão apresentadas de forma geral, tentando evidenciar as suas origens e os meios mais utilizados para diminuir ou compensar sua influência na incerteza de medição.

### **2.2.1 Os erros geométricos da máquina de medir por coordenadas**

Desde o início da medição por coordenadas, os erros inerentes ao projeto e construção da MMC vem sendo estudados em profundidade, devido a que geralmente são uma das principais causas de incertezas <sup>[20],[21]</sup>. Este tipo de erro inclui:

- Os erros sistemáticos não corrigidos dos chamados 21 erros paramétricos.
- Componentes aleatórias desses erros paramétricos.
- Erro aleatório do sistema de aquisição de pontos pelo apalpador.
- Incertezas devidas ao sistema de troca de apalpador.
- Erros causados pela dinâmica da MMC e o apalpador.

Na Figura 10 pode-se observar a influência do erro geométrico no eixo Y, no caso de uma MMC do tipo braço. Para cada um dos três eixos apresentam-se seis componentes de erro, um para cada grau de liberdade de movimento. Assim, ao total de dezoito erros são adicionados os três erros de perpendicularidade, contabilizando 21 erros paramétricos na abordagem clássica <sup>[14]</sup>.

Os erros geométricos e das escalas das MMC modernas são compensados numericamente através de software <sup>[20]</sup>, permitindo aumentar consideravelmente a exatidão das medições. Quando a compensação numérica dos erros sistemáticos não é realizada, por não ser prática ou economicamente conveniente, esta fonte de

erros pode ser considerada a maior causa individual de incertezas. Esta situação é crítica, já que o GUM (na seção 3.2.4) supõe que o resultado de uma medição tenha sido corrigido para todos os efeitos sistemáticos reconhecidos como significativos e que todo esforço tenha sido feito para identificar tais efeitos <sup>[11]</sup>.

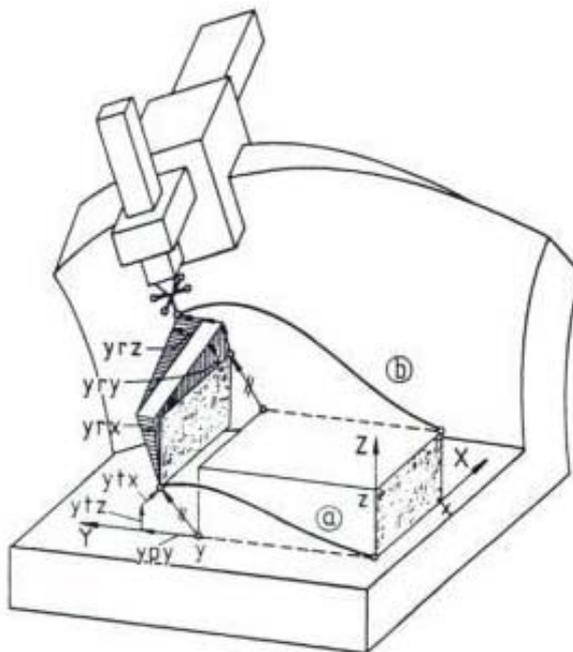


Figura 10 – O efeito do erro geométrico do carro Y numa MMC de tipo braço <sup>[14]</sup>.

É importante resgatar que existem diversas metodologias de ordem empírica para compensar erros na medição por coordenadas, sendo as mais tradicionais as técnicas de rebatimento e substituição <sup>[23]</sup>. Estas técnicas, embora conhecidas há muito tempo em ambientes de pesquisa e laboratórios primários, são pouco utilizadas em laboratórios de nível médio e no chão de fábrica. Alguns tipos de rebatimento permitem eliminar erros de perpendicularidade e de escala nas MMC <sup>[23]</sup>, os quais aparecem como os maiores erros sistemáticos na calibração de MMC. (Figura 11).

As metodologias de rebatimento e substituição compõem uma das colunas em que se apóia a proposta metodológica presente nesta dissertação, e serão detalhadas em maior profundidade no Capítulo 3

Em relação aos erros de natureza puramente aleatória, sua descrição é realizada através de modelos de distribuição de probabilidade, comumente gaussianos. Devido a sua origem randômica, e quando é necessário diminuir a incerteza em situações em que as tolerâncias medidas assim o requerem, muitos

metrologistas utilizam a técnica estatística de aumentar o número de repetições para diminuir a influência do erro de repetitividade pela raiz quadrada do número de ciclos de medição [5].

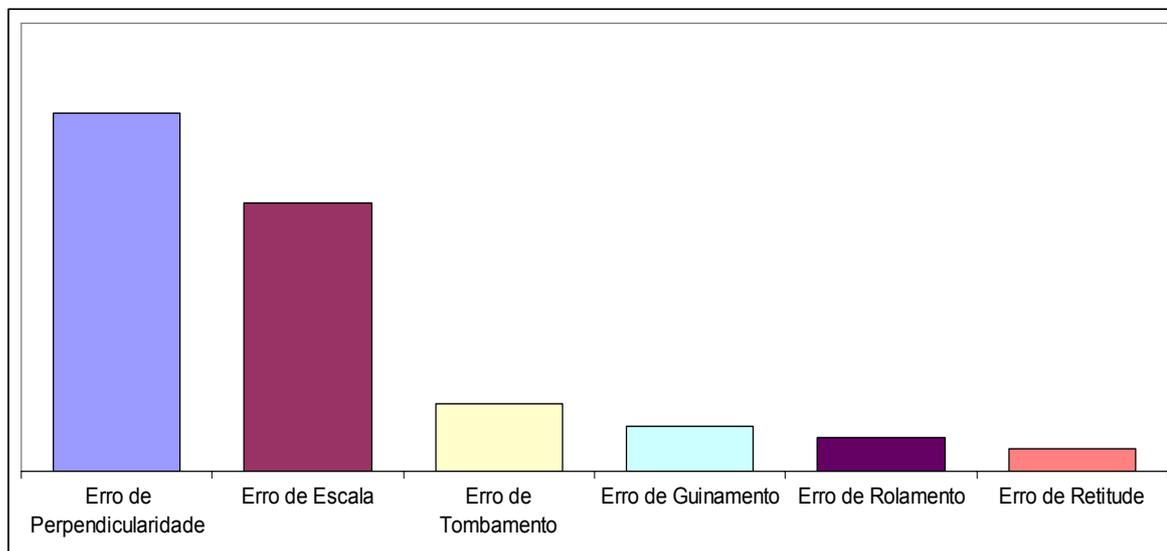


Figura 11 – Importância relativa dos erros geométricos nas MMC [24]. O gráfico deve ser entendido qualitativamente, baseado na experiência do especialista consultado.

### 2.2.2 O erro derivado da peça

As propriedades inerentes das peças reais são umas das grandes fontes de incertezas na medição por coordenadas. Objeto de numerosos estudos no decorrer dos anos [5],[7],[10], esta fonte de incertezas inclui:

- Erros de forma e de acabamento superficial, que decorrem em uma interpretação incorreta dos resultados da medição de determinadas características.
- Erros devidos à deformação da estrutura da MMC, quando a massa da peça é elevada.
- Erros decorrentes da interação do material da peça e da ponta do apalpador.
- Erros devido a distorções por fixação inadequada.
- Deformação elástica da peça quando é apalpada.

Principalmente devido à sua natureza complexa, esta fonte de incertezas em particular é difícil de estimar quantitativamente. A forma mais adequada de diminuir

sua influência é através de estratégias de medição adequadas e de boas práticas metroológicas. A influência da rugosidade da superfície das peças pode ser diminuída pelo uso de uma ponta com diâmetro adequado <sup>[22]</sup>. Para eliminar a influência do peso da peça nos resultados da medição, podem ser usadas algumas técnicas de rebatimento <sup>[23]</sup>. Quando a deformação elástica da peça é importante, suportes especiais ou fixações programáveis são utilizadas, como no caso de carrocerias de carro. Mesmo assim estimativas empíricas podem ser efetuadas para analisar sua influência <sup>[18]</sup>.

### 2.2.3 O erro derivado do ambiente

Hoje em dia, a norma ISO 1 <sup>[25]</sup> estabelece que a temperatura de referência para medições de comprimento deve ser de 20 °C. Assim, medições geométricas a temperaturas diferentes da de referência implicam em erros de natureza sistemática, devido ao fato de que a maioria dos materiais expandem ou contraem pela temperatura.

Na medição por coordenadas, a maioria dos laboratórios utiliza salas controladas termicamente. Mesmo assim, acontecem pequenas variações na temperatura da MMC e na peça a ser medida, originadas a partir de diversas fontes. As principais fontes de erros térmicos podem ser resumidas em:

- Ambiente (quando não existe ambiente controlado, ou devido a que o controle de temperatura não é perfeito).
- Pessoas.
- Memória térmica (acontece geralmente quando as peças a serem medidas ainda apresentam a temperatura do ambiente do qual provém).
- Calor gerado pela própria máquina, incluindo o sistema de controle numérico, computadores e sistema de iluminação.

Conseqüentemente, os elementos das máquinas, as escalas de medição e as peças, quando submetidos a temperaturas distintas daquela de referência, se expandem de forma diferenciada, provocando os denominados erros de expansão diferencial. Esse tipo de erros é parcialmente compensado on-line pelo software de

medição das MMC modernas. Apesar disso, a correção dos erros de expansão diferencial apresenta incertezas que devem ser consideradas.

As últimas três fontes de erros térmicos mencionadas anteriormente geram temperaturas de tipo não-uniforme, como gradientes e variações de temperatura de curto prazo. Estes tipos de erros geram uma aparente não repetitividade nos resultados, motivo pelo qual diversos estudos ao longo dos anos foram realizados para tentar modelar e compensar seu efeito na incerteza <sup>[14],[17]</sup>.

Outras fontes de incertezas relativas ao ambiente são aquelas relacionadas à vibração, limpeza e umidade. Laboratórios de medição modernos apresentam ambiente com controle não somente térmico, senão também da quantidade de pó e da umidade relativa do ar. O isolamento das vibrações por amortecedores ativos ou passivos é uma prática comum quando é preciso diminuir as incertezas. O problema é muito maior no chão de fábrica, quando as condições de medições são pouco ou não controladas.

#### **2.2.4 O erro derivado do operador e a estratégia de medição**

Seja qual for a MMC que esteja sendo utilizada, a peça que será medida ou o ambiente de medição, o conhecimento de boas práticas metrológicas é essencial para o sucesso das medições. Ao longo dos anos, uma ênfase cada vez maior vem sendo dada ao treinamento dos operadores de MMC. Atualmente, dentro do escopo do Programa Leonardo Da Vinci da Comissão Européia, está sendo desenvolvido um ambicioso projeto de longo prazo para treinamento de operadores de MMC. Neste projeto, que envolve treinamento através da Internet e ferramentas computacionais, os objetivos são fornecer os conhecimentos necessários para operar MMC, analisar tarefas específicas de medição, planejar a execução das medições e avaliar os resultados, operar o software de medição e interpretar os desenhos técnicos das peças a serem medidas <sup>[26]</sup>. Assim, múltiplos conhecimentos são necessários por parte do operador, como pode se observar na Figura 12.

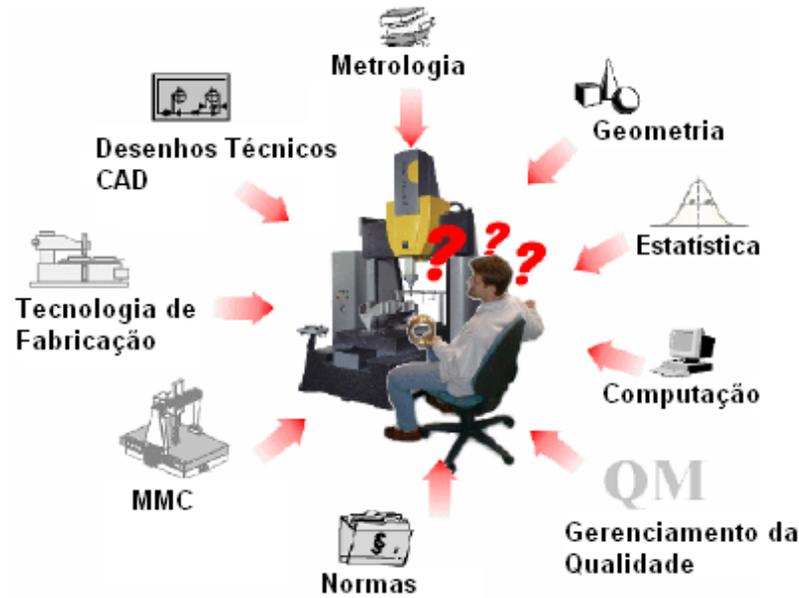


Figura 12 – Conhecimentos requeridos pelos operadores de MMC. Adaptado de [26].

Geralmente é o operador quem decide qual será o número e distribuição dos pontos na superfície da peça, qual será o filtro digital, quais serão os parâmetros de medição (como velocidade e direção de apalpação), que configuração de apalpadores será empregada, qual fixação será utilizada, entre outras. Decisões baseadas em opiniões pouco objetivas ou sem fundamentos metrológicos têm uma influência importantíssima no resultado das medições. Muitos autores afirmam que a incerteza decorrente da estratégia de medição, em combinação com o erro de forma da peça, seja por si mesma a principal fonte de incertezas na medição por coordenadas [5],[6],[7],[27]. Uma descrição gráfica deste fato é apresentada na Figura 13.

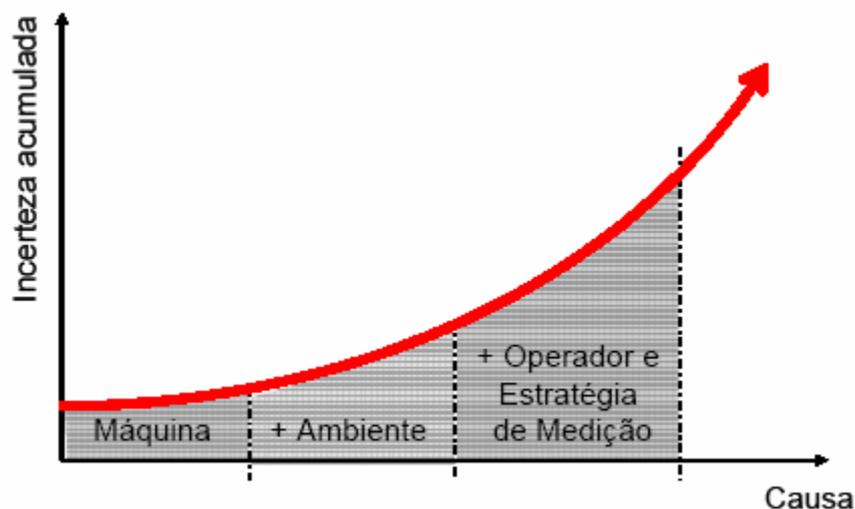


Figura 13 - Influência relativa da MMC, do ambiente e do operador sobre a incerteza de medição [2].

Embora o efeito negativo dos erros derivados do operador e da estratégia de medição sejam importantes, a natureza complexa da sua origem dificulta grandemente sua quantificação. Esta problemática foi abordada dentro do escopo da VCMM <sup>[10]</sup>, e como resultado é possível rastrear a influência de uma estratégia específica no resultado da medição. Porém, esta metodologia não permite projetar uma estratégia de medição ótima do ponto de vista prático, econômico ou de redução de incertezas.

Um exemplo prático da problemática antes descrita é a determinação de um plano de referência quando é preciso realizar medições de elementos geométricos em relação a *datums*<sup>1</sup>. As normas ISO 1101 <sup>[35]</sup> e ASME Y14.5M-1994 <sup>[29]</sup> definem os planos de referência como sendo aqueles que são tangentes às superfícies da peça. Mesmo assim, a prática comum dos operadores de MMC é a de criar um plano por Mínimos Quadrados, obtido após a apalpação de uns poucos pontos na superfície da peça. Como consequência, qualquer medição posterior que esteja relacionada aos planos criados a partir desta estratégia apresentará um erro sistemático (Figura 14).

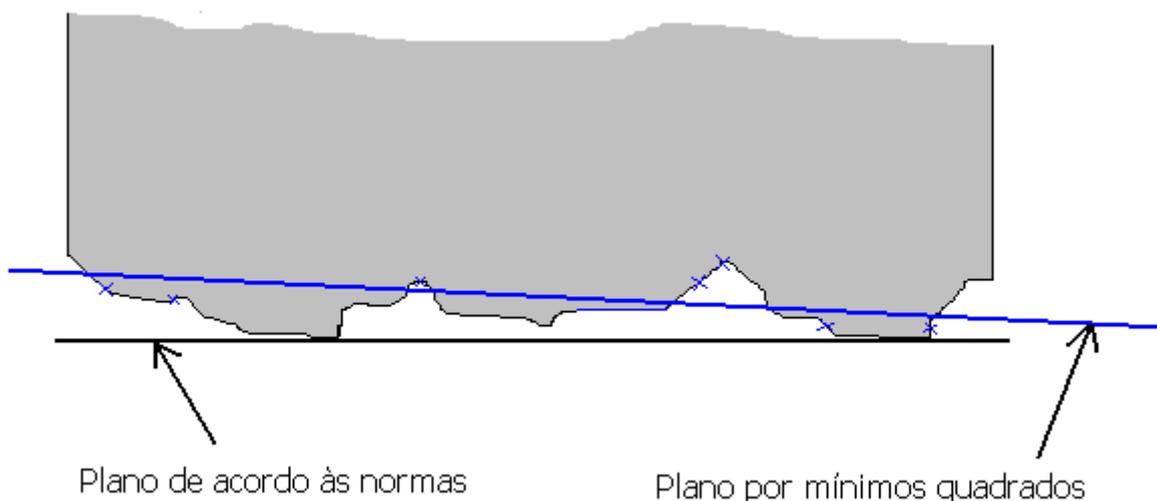


Figura 14 – Diferença entre o elemento PLANO definido normalmente numa MMC (Plano por Mínimos Quadrados) e o elemento definido nas normas ISO e ASME. (Plano Tangente). Adaptado de <sup>[9]</sup>.

<sup>1</sup> *Datums (ou referências) são elementos geométricos teoricamente exatos aos quais os elementos especificados são referenciados. O tópico será explorado em profundidade na seção 2.4.4.*

A criação de estratégias de medição consistentes com a definição mensurando é outra coluna em que se apóia a proposta metodológica desta dissertação.

## **2.3 A INCERTEZA DE MEDIÇÃO EM TAREFAS ESPECÍFICAS**

A incerteza de medição em tarefas específicas de MMC é a incerteza de medição que resulta, calculada de acordo com o guia GUM, quando uma característica específica de uma peça é medida utilizando uma estratégia de medição em particular <sup>[5]</sup>. Como foi mencionado, a complexidade e diversidade dos possíveis mensurandos na medição por coordenadas exigem uma análise particular da tarefa de medição. Não existe um modelo único que permita avaliar incertezas para qualquer tipo de medição realizada numa MMC. Assim, uma estratégia particular deve ser abordada para cada tipo de mensurando, e o modelo de medição deve estar de acordo com este <sup>[30],[31]</sup>.

Especificamente, no que se diz à estratégia de medição, duas vertentes devem ser analisadas em profundidade: a densidade de amostragem e os algoritmos de ajuste. Ambas, em combinação com a filtragem, permitem criar aquilo que é denominado, na norma ISO, de elementos geométricos substitutos. Esses elementos, e a combinação entre eles, permitem avaliar tamanho, forma, localização, orientação, batimento e perfil.

### **2.3.1 Os algoritmos de ajuste de elementos geométricos**

Como já foi mencionado, as MMC utilizam a medição ponto-a-ponto para descrever a superfícies das peças num sistema coordenado cartesiano. Para permitir a comparação entre a geometria nominal da peça e a geometria medida, os pontos adquiridos são associados a geometrias ideais através de algoritmos de ajuste apropriados.

Atualmente, dois tipos de algoritmos de ajuste são utilizados na medição por coordenadas. O primeiro, e mais comumente utilizado, é o ajuste Gaussiano ou por Mínimos Quadrados, ou seja, a minimização da soma quadrada dos desvios dos

valores medidos em relação à expressão matemática da geometria ideal. O segundo tipo, comumente chamado de Tschebycheff, minimiza a distância ortogonal entre os pontos medidos e a geometria ideal. A este tipo pertencem os algoritmos de Mínimo Circunscrito, Máximo Inscrito, Mínima Zona e Superfície Tangente.

O método de Mínimos Quadrados foi desenvolvido por C.F. Gauss no começo do século XIX, e foi utilizado com muito sucesso para ajustar erros aleatórios na medição de ângulos e distâncias geodésicas e astronômicas. Na medição por coordenadas, este método começou a ser utilizado para compensar os erros aleatórios da MMC. Porém, hoje em dia os erros aleatórios de medição são muito menores que os erros de forma das peças medidas. Assim, o uso na atualidade do método de Mínimos Quadrados pode derivar em um ajuste inadmissível dos erros de forma da peça medida <sup>[32]</sup>.

Diversas normas internacionais, utilizadas em engenharia mecânica para determinar tolerâncias de tamanho, localização, orientação, com ou sem relação a *datums*, estipulam a utilização de algoritmos de ajuste específicos, como se apresenta na Tabela 2.

Tabela 2 – Métodos de ajuste normalizados para avaliação de tolerâncias <sup>[32]</sup>.

Norma	Característica	Métodos de Ajuste					
		MQ	MC	MI	MZ	ST	Distância entre dois pontos
ISO 286	Tamanho		•	•			•
	Sistema ISO de limites e ajustes		•	•			•
ISO 1101	Desvio de Forma				•		
ISO 2692	Tamanho (Máximo Material)						•
	Tamanho (mating) Máximo Material		•	•			
ISO 4291	Circularidade	▲	▲	▲	•		
ISO 5459	<i>Datum</i> (Plano)					•	
	<i>Datum</i> (Eixo)		•	•			
	<i>Datum</i> (Ponto)		•	•			
DIN 7167	Envelope		•	•			
ISO 2768	Tolerâncias gerais				•		
ISO 8015	Tamanho Linear						•
	Tamanho Angular				•		
DIN 32880	Técnicas de Medição por Coordenadas	■	■	■	■	■	

• Método de ajuste orientado à aplicação.  
 ▲ Ajuste permitido pela norma.  
 ■ Ajuste mencionado na norma.

De acordo às normas internacionais detalhadas nessa tabela, os elementos geométricos substitutos devem ser sempre calculados de acordo aos métodos de Mínimo Circunscrito (MC), Máximo Inscrito (MI), Mínima Zona (MZ) e Superfície Tangente (ST). O método de Mínimos Quadrados (MQ) pode ser utilizado para avaliar o desvio de circularidade em um único caso em particular.

Assim, no caso de tamanho, a norma ISO 8015 <sup>[33]</sup> define que a uma peça é aceita quando todas as distâncias entre dois pontos estiverem dentro dos limites de especificação. Na prática atual, a multiplicidade destas distâncias entre dois pontos é reduzida a uma única distância, avaliada pelo método de Mínimos Quadrados. Esta prática é muito inadequada do ponto de vista funcional, já que os desvios de forma que influem na medição são “ajustados”, isto é, reduzidos a um único valor que não permite deduzir se a peça atende ou não dos requisitos de projeto.

Se, por exemplo, a tarefa de medição é a avaliação do diâmetro de um pino numa MMC, a metodologia correta é adquirir pontos ao longo da superfície da peça e posteriormente calcular todas as distâncias entre dois pontos diametralmente opostos (Figura 15). Portanto, o cálculo do diâmetro do cilindro utilizando um ajuste por Mínimos Quadrados não permitirá uma avaliação adequada da tolerância de tamanho imposta no desenho técnico da peça.

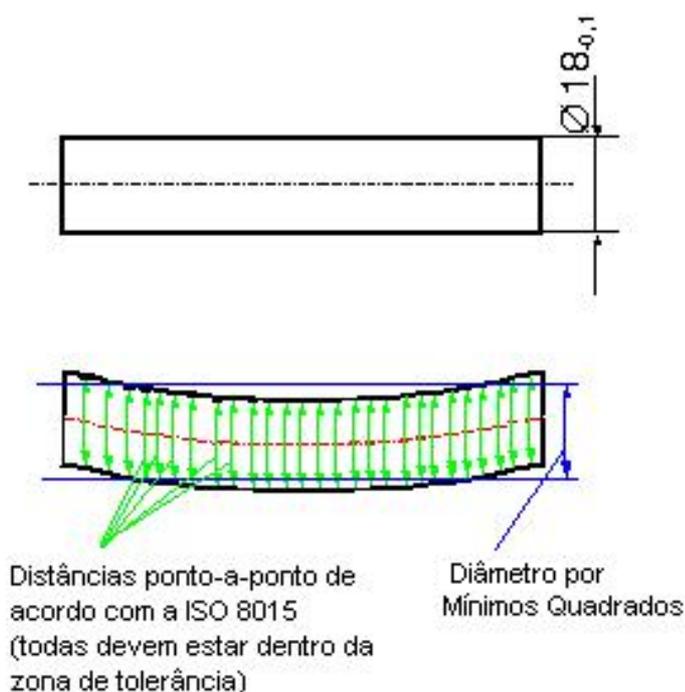


Figura 15 – Comparação entre a avaliação orientada à aplicação (ISO 8015) e a avaliação segundo o método de Mínimos Quadrados. <sup>[34]</sup>

Outro exemplo típico de aplicação é a medição de circularidade em MMC. Neste caso, a metodologia correta é adquirir uma grande quantidade de pontos, preferencialmente utilizando a técnica de *scanning*<sup>1</sup>, e avaliar o desvio de forma através do algoritmo de Mínima Zona para Círculos. Esta é a recomendação fornecida pela norma ISO 1101 [35], quando o caso for a avaliação de desvios de forma em elementos substitutos. Porém, a prática comum é avaliar o elemento círculo utilizando um ajuste por Mínimos Quadrados. Alguns pesquisadores da área sugerem que a simples diferença de utilizar um ou outro algoritmo pode decorrer num erro da mesma ordem de grandeza que o erro de medição da própria MMC [27],[32]

Uma descrição gráfica dos possíveis métodos de ajuste para avaliação de circularidade é apresentada na Figura 16. Como já foi visto, a normativa atual recomenda a utilização de ajuste de elementos substitutos pelo método de Tschebycheff. Entretanto, existe uma desvantagem que decorre da matemática utilizada para realizar esse tipo de ajuste. Como se pode observar na Figura 16, ao contrário do que acontece pelo método de Mínimos Quadrados, os elementos substitutos criados pelo método de Tschebycheff (MCCI, MICI e MZC) são estabelecidos a partir de um número pequeno de pontos extremos.

A incerteza na determinação desses pontos influi grandemente nos parâmetros que definem o elemento substituto, neste caso o círculo. Portanto, a avaliação pelo método de Tschebycheff é severamente afetada pela presença de erros de medição e valores atípicos, criando como consequência, a necessidade por algoritmos para sua correta eliminação. Esta problemática, conhecida por alguns metrologistas, permite justificar a utilização do método de Mínimos Quadrados, sempre e quando a presença de *outliers* (valores estatisticamente atípicos) seja bem conhecida, a sua correta eliminação não esteja disponível ou sua aplicação não seja econômica ou praticamente conveniente.

---

<sup>1</sup> A técnica de *scanning* refere-se a aquisição contínua de pontos feita por um apalpador com cabeçote do tipo ativo, enquanto realiza uma varredura sobre a superfície da peça.

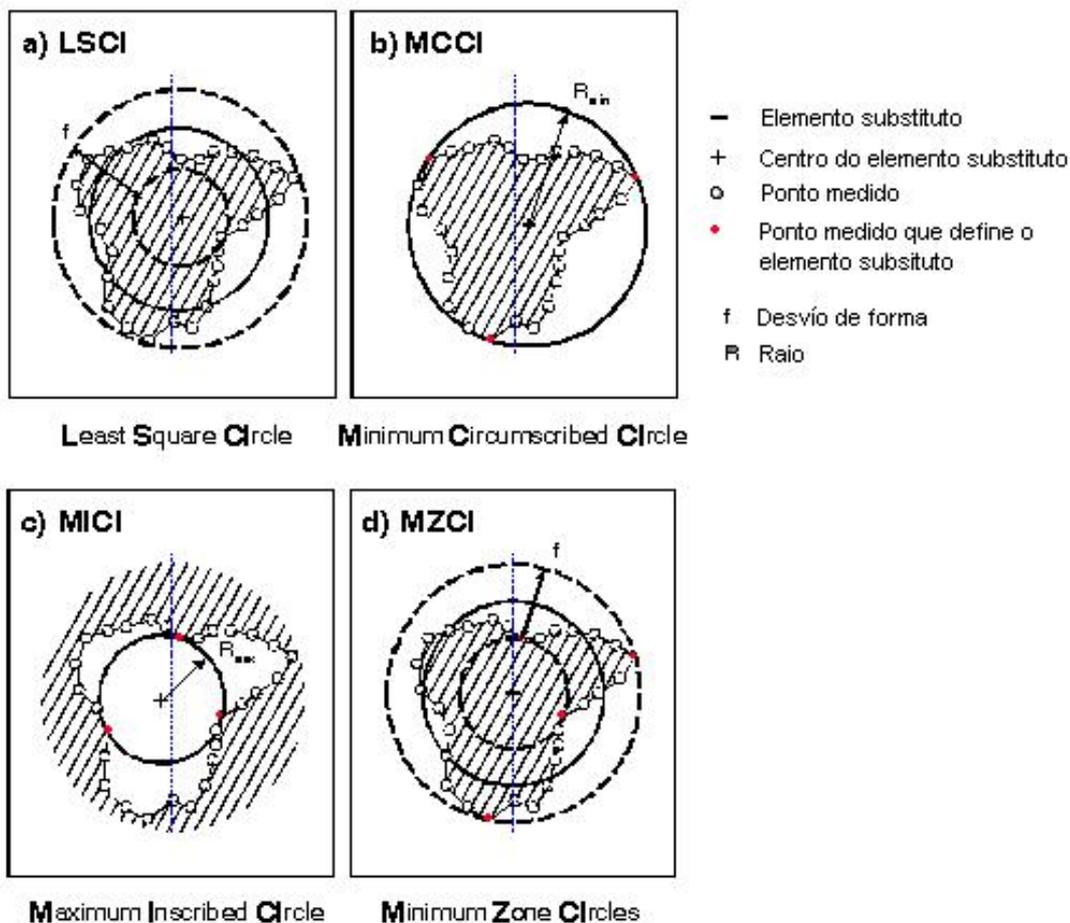


Figura 16 – Tipos de ajuste para círculos segundo a norma ISO 1101 <sup>[34]</sup>.

### 2.3.2 Os problemas de amostragem

Na seção anterior foram discutidos os diferentes algoritmos de ajuste que existem para determinar matematicamente elementos geométricos ideais. Estes algoritmos de ajuste utilizam as coordenadas dos pontos medidos para poder calcular os parâmetros das geometrias ideais que estão ajustando. Entretanto, nenhum requisito em relação à quantidade e distribuição dos pontos medidos foi mencionado.

Do ponto de vista matemático, existe uma quantidade mínima de pontos que deve ser adquirida para poder ajustar um elemento geométrico a partir deles. Porém, utilizar a quantidade de pontos mínima não permitirá realizar qualquer tipo de análise em relação ao erro de forma da característica medida. Em relação à distribuição dos pontos na superfície, a recomendação geral é apalpar pontos uniformemente distribuídos ao longo da característica a ser medida. Entretanto, a complexidade do problema da amostragem de pontos, considerando a quantidade de elementos

geométricos existentes, os diferentes tipos erro de forma presentes nas peças reais, a correlação com os diferentes métodos de ajuste e a necessidade de rastreabilidade e praticidade, permite concluir que nenhuma recomendação universal pode ser realizada para uma classe específica de elementos geométricos.

Diferentes autores ao longo dos anos realizaram tentativas para resolver esse problema, abordando diferentes metodologias, entre as quais a mais utilizada é a simulação computacional <sup>[7],[32]</sup>. Nesta abordagem, são necessários a criação de um gerador de pontos coordenados que representem os elementos geométricos (“contaminados” por erro de forma), algoritmos de ajuste para os elementos geométricos virtuais e uma sistemática para comparar os resultados simulados em relação aos valores “verdadeiros”. Mesmo assim, as recomendações obtidas com estas metodologias dependem fortemente dos parâmetros do modelo utilizado e não fornecem resultados quantitativos em relação às incertezas resultantes para cada tarefa em particular.

Como consequência, é fundamental reconhecer que, na ausência de qualquer informação prévia sobre a característica real a ser medida, não é possível determinar uma estratégia de apalpação que forneça resultados com um valor alvo de incerteza predeterminado, ou ainda quantificar a incerteza destes resultados. No caso específico da calibração de peças padrão em MMC, o objetivo primordial é atingir baixos níveis de incerteza para cada tarefa de medição, sem detrimento do tempo de medição. Assim sendo, a estratégia mais apropriada consiste em “aprender” acerca das características particulares da peça, através de medições mais detalhadas ou utilizar, quando for prática e economicamente possível, instrumentos de medição específicos como circularímetros e rugosímetros <sup>[26]</sup>.

Um resumo das recomendações atuais para o número de pontos necessários para cada tipo de elemento geométrico é apresentado na Tabela 3.

Um exemplo prático da problemática antes descrita é a determinação do número de pontos necessários para avaliar corretamente o diâmetro de um círculo em presença de erro de forma tri-lobular. Weckenamn et. al. abordaram este problema utilizando simulação computacional <sup>[32]</sup>. Como pode se observar na Figura 17, o aumento do número de pontos medidos resulta na convergência dos diâmetros achados para cada algoritmo de ajuste utilizado. Do mesmo modo, a tendência de

dispersão dos valores é de atingir o valor zero. Outros autores têm concluído valores parecidos, utilizando técnicas análogas de simulação [7].

Tabela 3 – Número de pontos recomendados por diferentes autores para a avaliação das geometrias básicas na medição por coordenadas.

Elemento geométrico		Mínimo matemático	Recomendação 1 [26]	Recomendação 2 [7]	Recomendação 3 [32]
Ponto	●	1	1	1	1
Linha	—	2	5	50	>30
Plano	▭	3	9	50	N/D
Círculo	○+	3	7	7-19	>50
Elipse	⊖+	4	12	>100	N/D
Esfera	⊙	4	9	N/D	N/D
Cilindro	⊖	5	12-15	N/D	N/D
Cone	⊖	6	12-15	N/D	N/D
Toróide	⊖+	7	N/D	N/D	N/D

N/D: Não Disponível

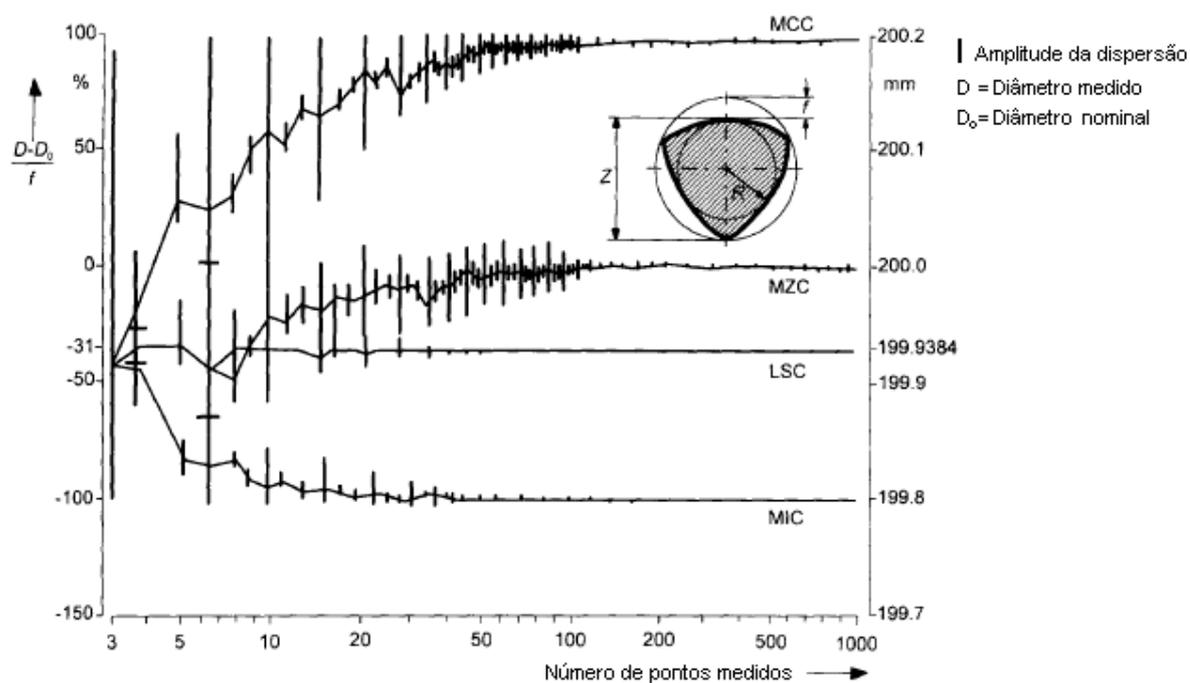


Figura 17 – Incerteza na medição do diâmetro como uma função do número de pontos e o tipo de ajuste do círculo, para um eixo com erro de forma tri-lobular [32].

Seguindo essa mesma abordagem, alguns pesquisadores desenvolveram metodologias de amostragem adaptativas <sup>[36]</sup>, com o objetivo de minimizar o número de pontos necessários para descrever adequadamente uma característica em particular, atingindo ao mesmo tempo uma incerteza adequada à tarefa de medição. A idéia básica consiste em aumentar o número de pontos adquiridos até que a variação de alguma variável de resposta (como por exemplo, o erro de forma), atinja o valor mínimo desejado.

### 2.3.3 A importância do software da MMC

As máquinas de medir por coordenadas são, sem dúvidas, os instrumentos de mecânica de precisão por excelência da metrologia dimensional. No ano 1957 a Máquina de Medir Universal foi introduzida pela Moore Special Tool Company <sup>[37]</sup>. Mas foi só no ano 1970 que a primeira MMC, como a conhecemos hoje em dia, foi apresentada na Escócia pela empresa Ferranti, Ltd. <sup>[14]</sup>. Essa MMC possuía controle numérico computadorizado e escalas ópticas baseadas no princípio de interferência de Moiré, eletronicamente comandadas. Assim, foi no começo da era eletrônica que as MMC permitiram revolucionar o conceito de inspeção de peças metal-mecânicas na indústria. Porém, não é a mecânica de precisão nem a eletrônica, senão os softwares de aplicação, que permitem justificar sua ampla difusão. Como softwares de aplicação entendemos àqueles programas, procedimentos e documentação eletrônica que permitem controlar a MMC, o computador e o equipamento periférico, fornecendo uma interface entre o operador e o sistema de medição como um todo. As capacidades dos softwares de medição atuais permitem, entre outras coisas <sup>[14]</sup>:

- Integrar a MMC dentro de um ambiente de produção computadorizado (conformando a já mencionada trilogia CAD/CAM/CMM).
- Melhorar significativamente a exatidão das medições, através da aplicação de CAA (*Computer Aided Accuracy* ou Precisão Assistida por Computador).
- Permitir análises estatísticas completas, incluindo dados históricos e bases de dados.
- Fornecer relatórios em tempo real, incluindo análise de tolerâncias segundo as normativas internacionais.

Embora a importância do software esteja bem fundamentada, menos do 10% dos usuários no Brasil basearam primeiramente sua decisão de compra nas facilidades do software, de acordo a uma pesquisa realizada no ano 2000 entre empresas de diversas áreas <sup>[38]</sup>. Outro resultado da mesma pesquisa permite concluir que existe uma grande insatisfação entre os usuários a respeito das funcionalidades do software, especialmente na capacidade de realizar medições não convencionais, troca de dados com outros aplicativos (CAD, Excel, etc) e ajuda *on-line*. Esta deficiência é especialmente relevante nos laboratórios de calibração, devido à diversidade das tarefas de medição que são requeridas, e à necessidade por uma interface de usuário mais flexível e detalhada.

Outra problemática foi levantada num estudo do ano 2003 sobre a análise de tolerâncias, embutida no software de MMC <sup>[39]</sup>. Neste trabalho, um corpo de provas especial foi projetado e fabricado com fins de analisar, de forma objetiva, as capacidades do software em avaliar adequadamente diversas tolerâncias geométricas (Figura 18). Os autores concluíram que algumas deficiências foram achadas em relação ao cálculo de bônus de tolerâncias para condição de máximo material, criação de *datums* para avaliação de tolerâncias de localização e avaliação de tolerâncias de superfície.

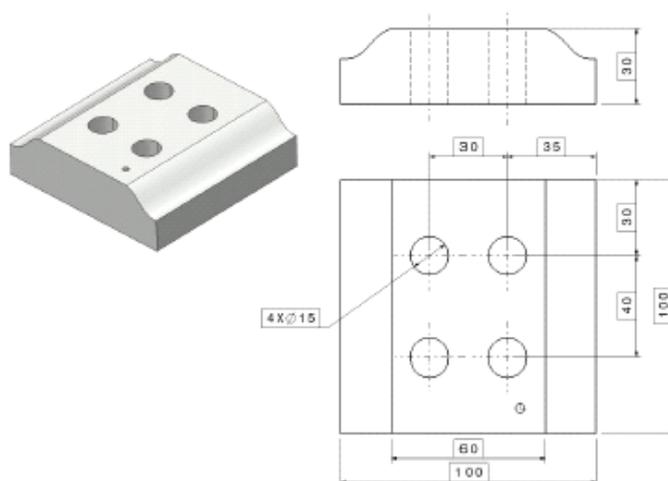


Figura 18 – Corpo de provas para análise crítica de software de MMC em relação ao análise de tolerâncias <sup>[39]</sup>.

Outro ponto importante está relacionado ao teste dos algoritmos matemáticos embutidos no software das MMC. Os institutos nacionais de metrologia mais importantes do mundo já têm abordado esta problemática, através da criação de projetos e programas de pesquisa. O instituto nacional de metrologia da Alemanha,

o PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) desenvolveu softwares de referência para a criação de elementos geométricos substitutos, permitindo a comparação dos resultados de diferentes fabricantes em relação aos resultados padronizados. O instituto nacional de metrologia do Reino Unido, o NPL (National Physical Laboratory) através do projeto SSfM<sup>1</sup> também desenvolveu algoritmos para a criação de dados de referência, que permitem testar diferentes funcionalidades, sem precisar de um software de medição padrão. Nos Estados Unidos, o NIST (National Institute for Standards and Technology) criou o ATS<sup>2</sup>, que inclui um gerador de dados de referência, algoritmos de ajuste por Mínimos Quadrados e interface de usuário.

A discussão anterior tem a intenção de trazer à tona a relevância do software e os algoritmos computacionais na medição por coordenadas. Na experiência acumulada por este autor no decorrer do trabalho de dissertação, o software de medição mostrou-se como um ator de grande importância, como uma interface entre capacidade inerente da MMC e os conhecimentos do operador. Quando as funcionalidades cumprem as expectativas, o usuário tende a explorar ainda mais o potencial de medição existente. Se o caso for de que o software não permite uma interface adequada com o hardware, a tendência geral dos operadores é a de diminuir no possível o tempo que se investe em tentar melhorar ou otimizar os procedimentos e as incertezas de medição. Softwares desatualizados ou com poucas capacidades, decorrem em procedimentos inadequados, ainda quando as capacidades do hardware existentes sejam as adequadas. Do mesmo modo, operadores experientes ou com bons conhecimentos dos programas e softwares relacionados às MMC, são aqueles considerados como grandes conhecedores da tecnologia, e são utilizados como “referência” em intercomparações ou medições mais apuradas.

Nas seções anteriores foram discutidos os algoritmos de ajuste de elementos geométricos e os problemas de amostragem relacionados à medição por

---

<sup>1</sup> SSfM é a sigla em inglês do projeto *Software Support for Metrology*, cuja finalidade é assegurar que as melhores práticas conhecidas estão sendo usadas no desenvolvimento e uso de softwares metrológicos.

<sup>2</sup> ATS é a sigla em inglês para *Algorithm Testing System*, um sistema de software que permite o teste de algoritmos de ajuste de elementos geométricos em MMC.

coordenadas. A sua correlação com o software de medição é imediata e permite reconhecer que quanto maior for o conhecimento destas problemáticas, a sua solução será atingida em menor tempo, otimizando o processo de medição como um todo. Assim sendo, o estudo aprofundado desta tecnologia precisa do conhecimento detalhado do mensurando, o qual será o motivo de estudo da próxima seção.

## **2.4 AS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO PONTO DE VISTA DA MEDIÇÃO POR COORDENADAS**

A metrologia dimensional é baseada no uso de artefatos cujas superfícies de medição apresentam erros de forma desprezíveis e uma ótima textura superficial. Assim, historicamente, as normas e recomendações internacionais foram desenvolvidas a partir do conceito de calibrador físico, do Princípio de Taylor e da instrumentação convencional. O problema de uma metrologia baseada em calibradores se apresenta fundamentalmente na medição de peças de produção, já que as definições de tamanho e comprimento não são bem realizadas em presença de erros de forma e textura superficial significativos <sup>[40]</sup>.

Atualmente, na metrologia por coordenadas, a questão de quão exatamente pode ser medida uma característica como diâmetro ou circularidade, depende fortemente de quão bem foram definidas originalmente as características “diâmetro” e “circularidade”. Por tal motivo, nas seguintes seções será apresentada a metodologia internacional vigente para especificação geométrica de produto, de acordo com a International Organization for Standardization (ISO). Uma ênfase especial será dada à interpretação das características geométricas e dimensionais do ponto de vista da medição por coordenadas.

### **2.4.1 Introdução à especificação geométrica de produto**

Quando uma peça mecânica esta sendo projetada, o projetista imagina sua geometria como sendo a de um objeto ideal perfeito. Porém, durante a fabricação de uma peça real, acontecem erros que decorrem em formas distorcidas e dimensões diferentes das projetadas. Além disso, muitas peças depois de produzidas precisam ser montadas em outras peças. Este processo também não é ideal e, como consequência, outros erros são adicionados ao produto final.

Entretanto, apesar da presença destes erros de fabricação, se eles forem adequadamente controlados, a peça pode ser classificada com aceitável do ponto de vista funcional. Para esse fim, nos anos 90 foi desenvolvido um conjunto de requisitos para tamanho e geometria de peças (ou montagem de peças), conhecidos como *Geometrical Product Specifications* (GPS) ou Especificação Geométrica de Produto, abrangendo requisitos de tamanho e dimensão, e tolerâncias geométricas e superficiais.

A aplicação dos requerimentos GPS garante quatro aspectos essenciais das propriedades do produto final <sup>[34]</sup>:

1. Função: um exemplo típico é a de uma máquina ferramenta; se as guias apresentam características geométricas como retitude dentro dos parâmetros aceitáveis, a máquina funcionará corretamente.
2. Segurança: se os pinos que seguram a tampa do motor forem corretamente especificados nas características superficiais como rugosidade, não existirá perigo de que uma trinca produzida por fadiga destrua o motor.
3. Confiança: tolerâncias geométricas bem selecionadas, como por exemplo, a circularidade dos cilindros de um compressor, garantem longa vida da máquina.
4. Intercambiabilidade: é a característica mais procurada em peças que devem ser montadas, sendo imprescindível quando é necessário realizar reparos em montagens já existentes.

As especificações GPS são documentadas a partir da criação de desenhos técnicos da peça (Figura 19). A função principal do desenho técnico é fornecer ao responsável pela fabricação, qual é a intenção do projetista sobre a função da peça ou parte. Isto é feito fundamentalmente através das tolerâncias geométricas e dimensionais especificadas no desenho técnico.

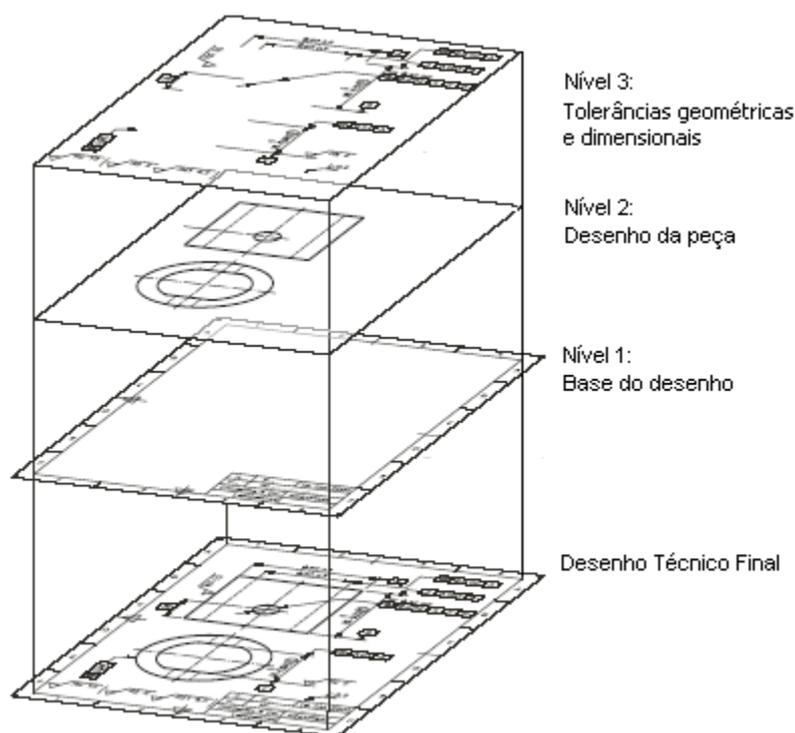


Figura 19 – Os três níveis fundamentais para os desenhos técnicos descritos nas normas internacionais. Adaptado de <sup>[45]</sup>.

## 2.4.2 Estrutura matricial das normas GPS

No ano 1995 foi estabelecido dentro da organização ISO o Comitê Técnico ISO/TC 213, “*Dimensional and geometrical product specifications and verification*”. Foi a partir deste ano que muitas normas prévias relacionadas à especificação técnica de produtos foram revisadas, e programadas novas normas e trabalhos futuros.

O grupo de harmonização ISO/TC 3-10-57/JHG (em ação entre 1993 e 1996), publicou o Relatório Técnico ISO/TR 14638:1995, relacionado ao sistema de normas GPS, conhecido como Plano Mestre. Nesse documento, todas as normas GPS foram classificadas dentro de quatro grandes grupos <sup>[47]</sup>:

- Normas GPS Fundamentais.
- Normas GPS Globais.
- Normas GPS Gerais.
- Normas GPS Complementares.

Uma cadeia de normas consiste em um conjunto de normas relacionadas a uma característica em especial. As normas são coletadas em grupos chamados de “*links*” ou “elos” da cadeia. Existem seis *links* com normas para as diferentes características, como se explica a seguir:

1. Codificação e documentação de produto. As normas colocadas neste *link* definem os símbolos gráficos (códigos específicos) e designações, estabelecendo regras para sua aplicação e interpretação.
2. Definição de tolerâncias. Estas normas contêm definições teóricas das tolerâncias e seus valores numéricos (traduzidos dos códigos simbólicos). Através destas normas, os elementos teoricamente ideais e suas tolerâncias são definidos.
3. Definições das características reais dos elementos. A partir destas normas, a geometria não ideal da peça pode ser definida sem ambigüidades, em relação as tolerância codificadas no desenho técnico. As definições estão baseadas em um conjunto de pontos medidos na superfície da peça.
4. Avaliação dos desvios da peça – comparação com os limites especificados. A tarefa principal destas normas é especificar como provar conformidade ou não conformidade da peça real em relação às especificações, levando em conta a incerteza dos meios de inspeção.
5. Requisitos dos instrumentos de medição. As normas neste *link* descrevem características, principalmente metrológicas, dos instrumentos de medição.
6. Requisitos de calibração – padrões de medição. Estas normas estabelecem as características de calibração utilizadas nos equipamentos descritos no *link* 5. A rastreabilidade com a unidade de comprimento do SI (metro) deve ser garantida.

Assim sendo, cada grupo de normas está relacionado ao processo completo de projeto (declaração de especificações não ambíguas), fabricação (interpretação de especificações) e inspeção (medição).

### 2.4.3 O Modelo GPS ou “Skin Model”

O modelo descrito nas normas GPS, o “Skin Model” por sua denominação em inglês, é um modelo geométrico da interface física entre a peça e o meio ambiente. Define elementos não ideais na periferia da peça, considerando os elementos ideais do projeto técnico <sup>[34]</sup>. Um elemento real é um elemento não ideal cuja forma depende das condições do processo de produção, enquanto um elemento ideal existe só na teoria. O *Skin Model* está baseado em algumas definições básicas e utiliza ferramentas chamadas de “operações”, as quais podem ser comparadas com operações matemáticas (Figura 20).

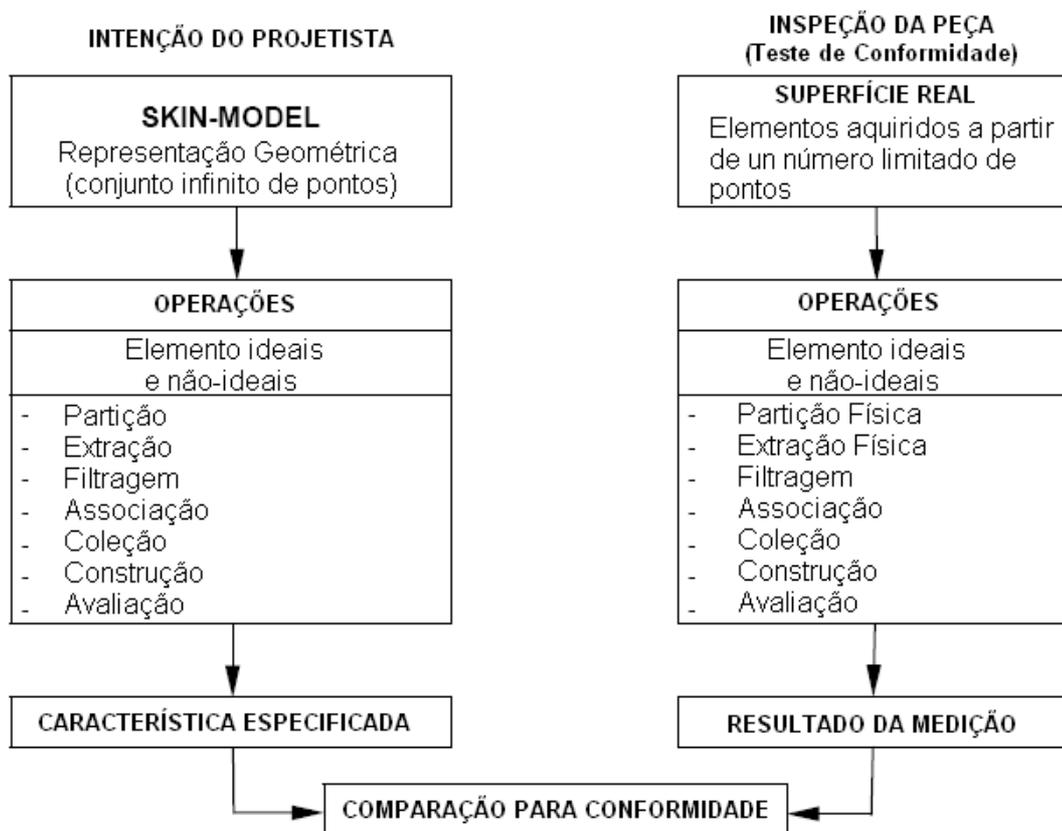


Figura 20 – Modelo de especificação técnica de peças de acordo com as normas GPS. Adaptado de <sup>[48]</sup>.

Essas operações são aplicadas aos elementos geométricos previamente descritos na Tabela 3. Utilizando esses elementos, podem ser descritas todas as peças prismáticas ou rotacionalmente simétricas <sup>[46]</sup>. Para ilustrar as operações descritas no Skin Model, pode ser utilizado o elemento geométrico “cilindro” (Figura 21).

No desenho técnico, a superfície do cilindro se apresenta como o elemento integral nominal. O elemento integral nominal corresponde à imaginação do projetista, e não está afetado por desvios. O cilindro também apresenta um eixo, definido no desenho como uma linha central. Todas as geratrizes da superfície do cilindro têm a mesma distância à linha central por definição. A peça real é então medida para descrever os desvios em relação à geometria nominal. Para isso, o elemento integral real é varrido superficialmente através de um instrumento de medição adequado, como por exemplo, uma MMC. Os pontos obtidos da superfície conformam o elemento integral extraído, neste caso, uma superfície parecida com a de um cilindro. Um eixo pode ser associado com o elemento integral extraído, o qual é chamado de elemento derivado extraído.

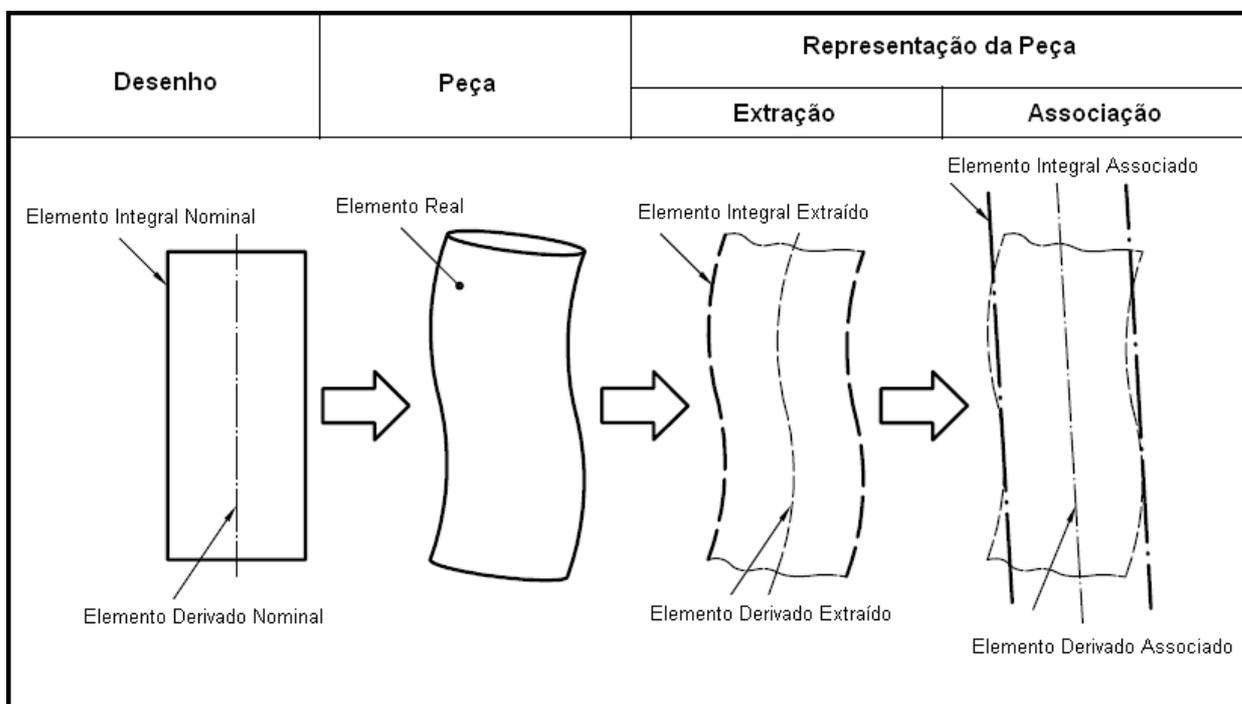


Figura 21 – Terminologia dos elementos geométricos para o caso do cilindro.  
Adaptado de <sup>[49]</sup>.

Finalmente, para avaliar os pontos medidos, é preciso calcular a partir deles um elemento geométrico ideal. Assim, o cilindro ideal calculado a partir do elemento integral extraído é o elemento integral associado, cujo eixo é chamado de elemento derivado associado.

Para uma completa descrição em relação à interação dos elementos geométricos entre si, é preciso especificar relações e interações entre elementos. Estas relações ou interações são necessárias para caracterizar distâncias ou

tolerâncias complexas, como localização e orientação. Uma descrição completa das possíveis tolerâncias que podem ser utilizadas num desenho técnico, é apresentada no Apêndice 1, na forma de diagrama de árvore.

#### **2.4.4 *Datums* ou referências**

Segundo a norma ISO 1101<sup>[35]</sup>, quatro definições fundamentais em relação a referências ou *datums* são necessárias:

Referência (*Datum*): Elemento geométrico teoricamente exato, como por exemplo, um eixo, um plano ou uma linha, ao qual os elementos tolerados são referenciados. Em algumas situações, uma referência pode estar constituída por um grupo de dois ou mais elementos geométricos, chamado de sistema de referências.

Elemento de Referência: Elemento real de uma peça, como por exemplo, uma aresta, uma superfície ou um furo, utilizado para estabelecer a localização de uma referência. Devido a que os elementos de referência estão sujeitos a erros e variações do processo de fabricação, pode ser necessário especificar tolerâncias de forma para eles.

Elemento de Referência Simulado: Uma superfície real com adequado acabamento superficial, como por exemplo, um plano óptico, um esquadro de granito ou um cilindro padrão, utilizado para estabelecer um contato físico com o elemento de referência. Os elementos de referência simulados são utilizados como fixação ou referência na fabricação e medição.

Referências Alvo: São elementos de referência físicos na peça, como linhas, pontos ou áreas, especialmente usinadas para funcionar como referências. As referências alvo são especificadas no desenho técnico, e são muito utilizadas em peças fundidas, quando a usinagem de superfícies inteiras não é conveniente do ponto de vista econômico ou prático. Em muitas situações, as referências alvo são funcionalmente mais representativas que as superfícies inteiras para estabelecer referência de localização e orientação (Figura 22).

De acordo às definições apresentadas previamente, para reproduzir *datums* numa MMC, será necessário o uso de superfícies reais de muito bom acabamento superficial e pequenos erros geométricos, como aquelas mencionadas na definição de Elemento de Referência Simulado. Assim, o operador deverá fixar os elementos

de referência da peça às superfícies de referência (esquadros, planos ópticos, etc.) e apalpar uma série de pontos nestes últimos. Os pontos medidos, obtidos das superfícies de referência, são utilizados para criar matematicamente as referências, que servirão posteriormente para avaliar as tolerâncias geométricas requeridas <sup>[41]</sup>. Para reproduzir eixos em peças com simetria radial, é conveniente o uso de mesas rotativas. Deste modo, o eixo mecânico da mesa pode ser utilizado como o eixo matemático necessário para estabelecer o *datum*.

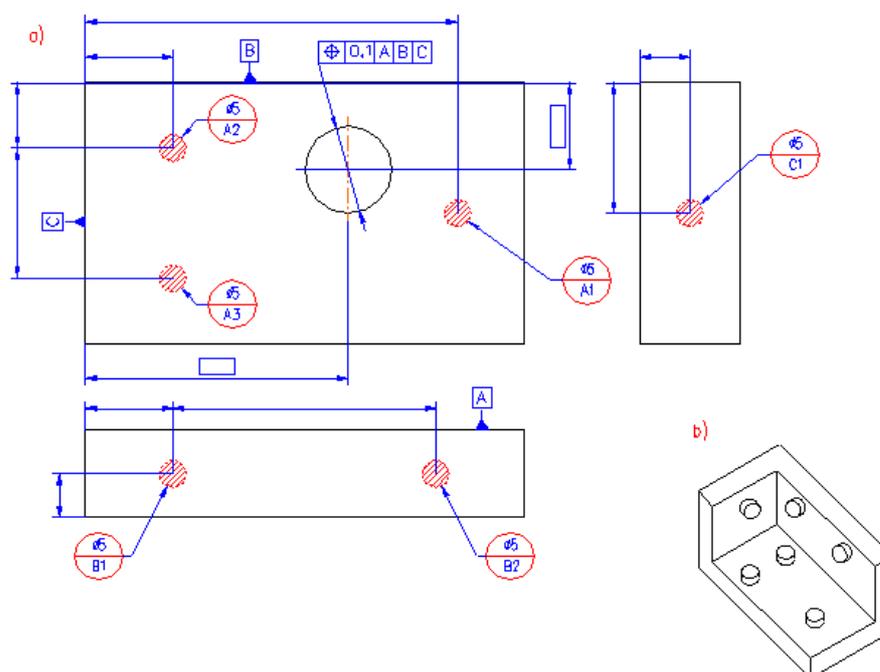


Figura 22 – Sistema de referências de três planos, com utilização de referências alvo. a) Desenho técnico. b) Esquema da fixação. Adaptado de <sup>[34]</sup>.

Porém, sendo que é muito mais fácil e rápido apalpar diretamente a peça, ao invés de fixar a peça em superfícies de referência e apalpar estas últimas, muitos operadores de MMC utilizam os pontos apalpados na superfície para estabelecer planos ou eixos de referência. Se este for o caso, o procedimento mais adequado seria realizar a medição de uma alta densidade de pontos igualmente espaçados, e utilizar ajuste de elementos pelo algoritmo de Tschebycheff. Mesmo assim, a criação de sistemas coordenados por apalpação direta da peça não é geralmente repetível de medição em medição.

Do ponto de vista da medição por coordenadas, as referências alvo são ideais, já que permitem estabelecer sistemas de referência muito mais facilmente, além de fornecer melhor repetitividade de medição em medição.

Usualmente, os softwares de medição instalados nas MMC fornecem diversos procedimentos para a definição de sistemas coordenados, gerando resultados dispares <sup>[34]</sup>. Assim sendo, erros na criação do sistema coordenado peça podem derivar em incertezas maiores que as próprias tolerâncias a serem medidas.

Alguns autores fornecem recomendações para uma avaliação qualitativa das incertezas decorrentes da criação do sistema coordenado peça, através de referências ou *datums* <sup>[27],[34]</sup>. Entretanto, essas recomendações estão muito influenciadas pela estratégia de medição, pelos algoritmos de ajuste e pela própria geometria da MMC, de modo que a análise quantitativa é complexa e de difícil solução.

A melhor abordagem a este problema é a criação de procedimentos consistentes de medição, utilizando as recomendações e definições das normas, e tendo em mente as melhores práticas do ponto de vista metrológico.

#### **2.4.5 Características de tamanho**

A terminologia de tamanho, assim como instruções gerais para sua especificação estão descritas na norma ISO 286-1 <sup>[42]</sup>. A definição de tamanho segundo esta norma é como segue:

*“Um número que expressa, em uma unidade em particular, o valor numérico de uma dimensão linear”.*

Assim sendo, todo outro tipo de característica (ângulos, etc.), são definidas especificamente, e não devem ser referenciados como tamanhos.

Devido à complexidade e importância dos elementos de tamanho no projeto mecânico e a metrologia dimensional, e sua correlação com os novos meios de medição como as MMC, o comitê ISO/TC 213 está trabalhando em uma nova classificação dos conceitos de tamanho dentro do escopo da futura norma ISO/CD 14405 <sup>[43]</sup>. Desta forma, o projetista poderá realizar uma definição mais apurada do mensurando, facilitando o trabalho do metrologista por coordenadas (Figura 23).

Uma consequência importante da utilização da norma ISO 8015 <sup>[33]</sup> em conjunto com a ISO 286-1 é o Princípio de Independência. Quando esse princípio é

utilizado, o desenho técnico indicará especificamente “ISO 8015”. O Princípio de Independência específica:

*“Cada requisito dimensional ou geométrico num desenho técnico deve ser atendido independentemente, a menos que uma relação em particular seja especificada”.*

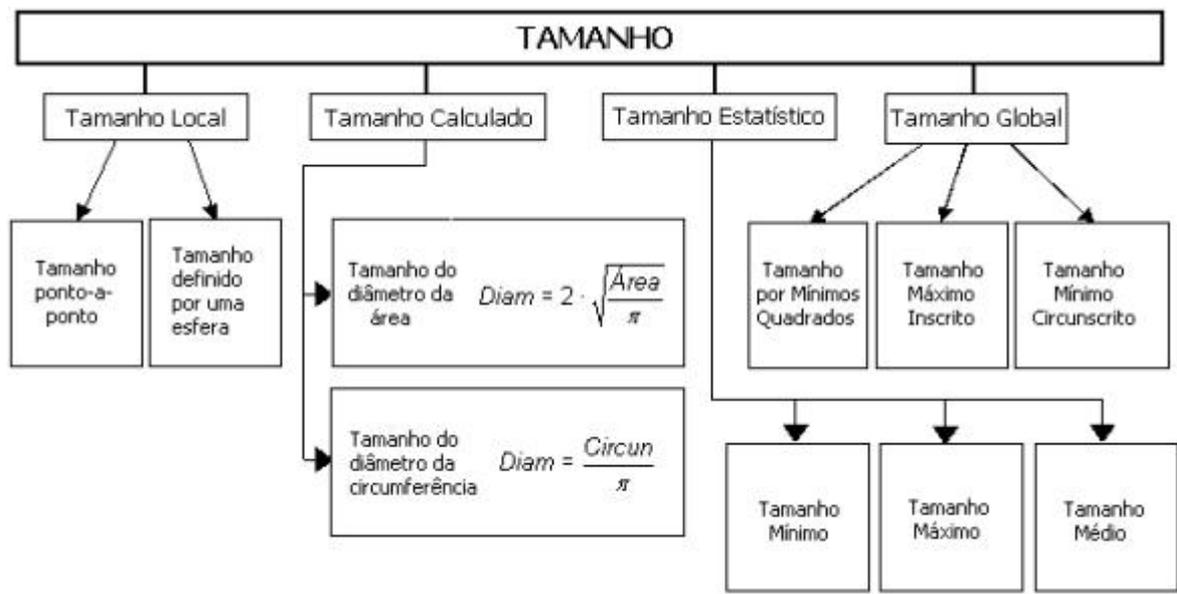


Figura 23 – Os conceitos de tamanho segundo a ISO/CD 14405. Adaptado de [43].

#### 2.4.6 Características de forma

As irregularidades nas superfícies ou perfis podem ser decompostas em forma, ondulação, rugosidade e trincas, dependendo da relação entre a distância das irregularidades e sua profundidade. O desvio de forma é o valor do desvio real de uma peça em relação a sua forma nominal ou ideal [34]. Para todos os desvios de forma é importante lembrar que a avaliação deve ser feita pelo método da Mínima Zona, como especificado na norma ISO 1101. Alguns desvios de forma típicos achados em círculos e cilindros são apresentados na Figura 24.

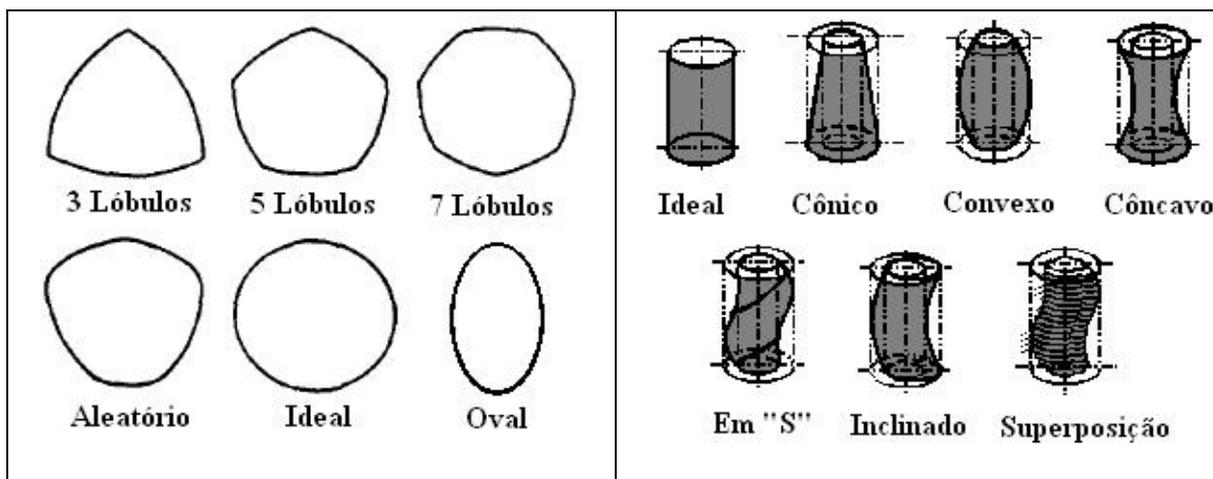


Figura 24 – Desvios de forma típicos em achados em círculos e cilindros. Adaptado de <sup>[34],[44]</sup>.

Existem seis tipos diferentes de tolerâncias para desvios de forma <sup>[34]</sup>:

**Retitude:** Desvios de forma em linhas, como geratrizes de cilindros ou cones, arestas e faces. A tolerância de retitude pode ser especificada em elementos geométricos derivados como linhas de simetria, planos de simetria ou eixos. Os desvios de retitude devem estar contidos dentro dos limites da zona de tolerância, constituída por duas linhas ou superfícies paralelas, ou dentro de um cilindro do tamanho especificado.

**Planeza:** Desvios de forma em superfícies e planos de simetria e na retitude de linhas sobre superfícies planas. Todos os pontos da superfície medida devem estar contidos dentro de dois planos paralelos separados pela distância tolerada.

**Circularidade:** Desvios de forma em perfis com geometria circular, como seções de cilindros e cones. Os desvios de circularidade para cada seção circular do elemento especificado devem estar contidos dentro de dois círculos concêntricos separados pela distância especificada na tolerância.

**Cilindricidade:** Desvios de retitude das geratrizes de cilindros, desvios de circularidade de seções circulares e desvios de paralelismo de geratrizes opostas. A zona de tolerância é definida por dois cilindros coaxiais separados pelo valor especificado. Este tipo de característica só pode ser avaliado sensivelmente por MMC ou máquinas de medir forma.

**Perfil de uma linha:** Erros de forma em linhas sobre superfícies livres ou constituídas por múltiplos raios de curvatura. A zona de tolerância é limitada por duas linhas envolvendo círculos cujos diâmetros são iguais ao valor da tolerância.

Os centros desses círculos estão localizados na linha com a forma teoricamente exata.

Perfil de uma superfície: Erros de forma em superfícies livres ou constituídas por múltiplos raios de curvatura. A zona de tolerância é limitada por duas superfícies abrangendo esferas com os diâmetros especificados, cujos centros estão localizados na superfície com a forma teoricamente exata. Na prática, as tolerâncias de perfil de linha ou superfície podem ser avaliadas por comparação com uma peça padrão, através de MMC, ou por meio de alguns tipos de sistemas ópticos de medição.

Uma relação das normas particulares a cada tipo de tolerância de forma e os métodos de avaliação é descrita na Tabela 4.

Tabela 4 – Tipo de avaliação para tolerâncias de forma e as normativas particulares a cada especificação. Adaptado de <sup>[34]</sup>.

Método de avaliação do elemento de referência	Retitude ISO 12780	Planeza ISO 12781	Circularidade ISO 12181	Cilindricidade ISO 12180	Perfil de linha ou superfície ISO 1101
Mínima Zona (ISO 1101)	MZLI	MZPL	MZCI	MZCY	N/D
Mínimos Quadrados	LSLI	LSPL	LSCI	LSCY	N/D
Superfície Superior	OPLI	N/D	N/D	N/D	N/D
Superfície Inferior	LOLI	N/D	N/D	N/D	N/D
Mínimo Circunscrito	N/D	N/D	MCCI	MCCY	N/D
Máximo Inscrito	N/D	N/D	MICI	MICY	N/D
Comparação com CAD ou peça padrão	N/D	N/D	N/D	N/D	Círculos ou Esferas
N/D: Não Disponível					

Do ponto de vista da medição por coordenadas, as características de forma são avaliadas geralmente pela técnica de varredura ou *scanning*, devido à necessidade de uma grande quantidade de pontos para a correta avaliação dos parâmetros de forma. O uso do *scanning* introduz erros adicionais à medição devido à natureza dinâmica do processo de medição. A correta avaliação deste tipo de erros é motivo de diversas pesquisas no mundo inteiro. Uma análise apurada da medição de forma por *scanning* em MMC pode se encontrar em <sup>[50]</sup>.

### 2.4.7 Características de orientação

Por definição, existem três características de orientação: paralelismo, perpendicularidade e angularidade, segundo a norma ISO 1101. Estritamente falando, as características de paralelismo e perpendicularidade podem ser consideradas casos limites de angularidade. As tolerâncias de orientação especificadas em elementos relacionados a *datums* não limitam os desvios de forma dos *datums* por se mesmas, sendo necessário em algumas situações especificar tolerâncias de forma para as próprias referências. Porém, as tolerâncias de orientação limitam os desvios de forma dos elementos especificados.

É possível realizar uma classificação dos diferentes tipos de tolerâncias de orientação, a partir dos elementos que serão especificados em relação às referências utilizadas. A classificação é detalhada na Tabela 5.

Medições de orientação podem ser avaliadas com eficiência em MMC. Devido ao fato de que os elementos especificados devem ser avaliados em toda sua extensão, uma alta densidade de pontos deve ser adquirida. No caso de elementos derivados, como eixos de cilindros, é recomendável realizar a medição por seções. Assim, cinco ou mais seções transversais são medidas e os centros de cada uma delas compõem uma linha em três dimensões, que pode ser avaliada por paralelismo, perpendicularidade ou angularidade.

Tabela 5 – Classificação das tolerâncias de orientação segundo os elementos e referências utilizados. Adaptado de <sup>[34]</sup>.

Tolerância de Orientação	Elemento Especificado	Referências ( <i>Datums</i> )			
		Só uma linha	Só um plano	Linha e plano	Dois planos
Paralelismo	Linha	Só uma linha	Só um plano	Linha e plano	Dois planos
	Plano	Só uma linha		Só um plano	
Perpendicularidade	Linha (eixo)	Só uma linha	Só um plano	Dois planos	
	Plano	Só uma linha		Só um plano	
Angularidade	Linha	Só uma linha	Só um plano	Dois planos	
	Plano	Só uma linha	Só um plano	Dois planos	

É interessante aproveitar alguns procedimentos de medição utilizados em metrologia dimensional convencional, para assim desenvolver estratégias de medição orientadas à aplicação. Exemplos muito demonstrativos podem se achar em <sup>[51]</sup>.

#### 2.4.8 Características de localização

Por definição da ISO 1101, existem quatro características de localização: posição, concentricidade, coaxialidade e simetria. As tolerâncias de localização, especificadas em elementos com relação a *datums*, não limitam erros de forma dos próprios elementos de referência, mas sim dos elementos especificados. As tolerâncias de localização é a forma mais universal de especificação geométrica e permite, portanto, ser utilizada em vez de outras tolerâncias.

As tolerâncias de localização são as tarefas de medição mais requisitadas das MMC, depois das tolerâncias de tamanho. Devido a que geralmente os elementos especificados são elementos derivados, a estratégia de medição deve refletir perfeitamente a definição do mensurando, já que erros na sua realização podem constituir a maior fonte de incertezas da medição.

No caso da localização de um furo, a recomendação é que o furo seja medido em pelo menos cinco seções transversais, cada uma medida com uma alta densidade de pontos. Os centros de cada círculo devem estar todos dentro da zona de tolerância cilíndrica. Muitos metrologistas avaliam esta tolerância como a posição do eixo do cilindro em relação aos *datums*. Esta estratégia é inadequada, já que a tolerância avaliada neste caso é a do eixo do cilindro, ao invés das seções circulares <sup>[53]</sup>.

Em tolerâncias de simetria, o procedimento correto é medir os elementos de referência e criar o elemento de simetria como *datum*. Posteriormente, pontos opostos dos planos de simetria são medidos e para cada par é calculado o ponto de simetria. As distâncias entre os pontos de simetria e o *datum* não devem exceder a metade do valor especificado.

Todas as tolerâncias de localização precisam de elementos de referências ou *datums*, os quais podem estar afetados por erro de forma. Sendo assim, extremo

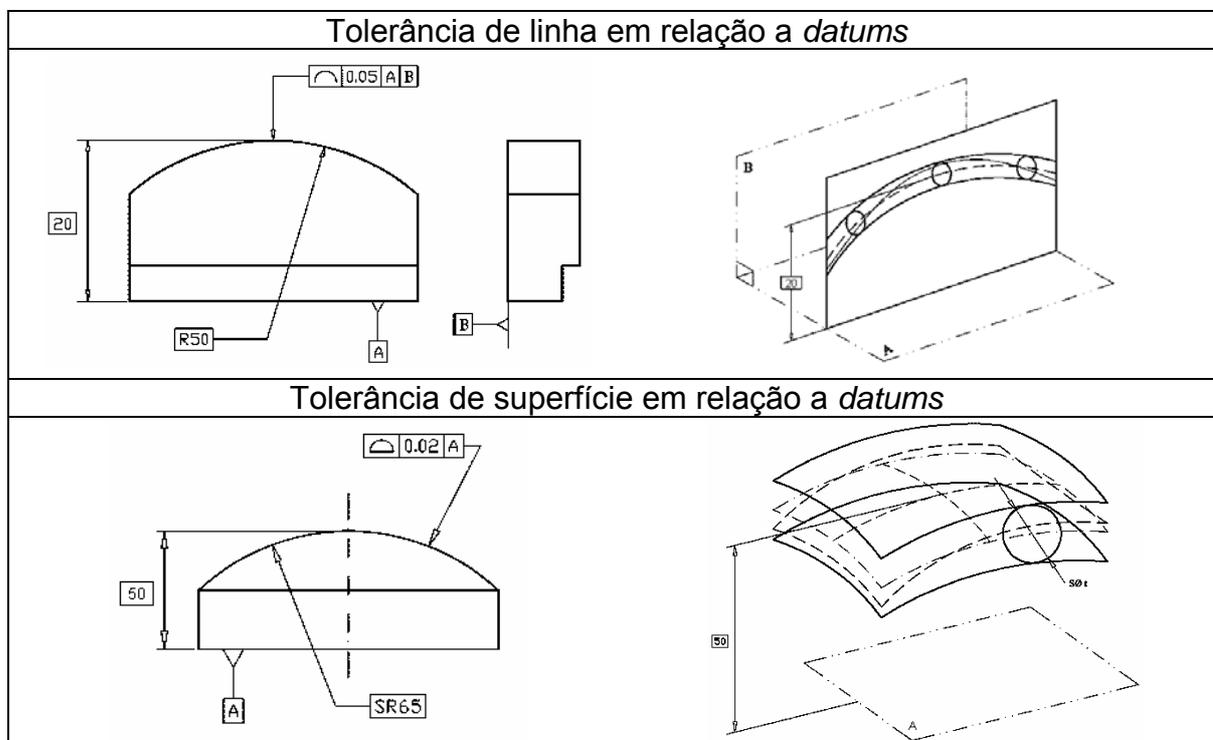
cuidado deve-se tomar para que erros na definição do sistema coordenado peça não influam significativamente nos resultados de medição.

### 2.4.9 Tolerâncias de linha ou superfície com *datums*

As tolerâncias de linhas e superfícies são utilizadas fundamentalmente para controlar desvios de forma da peça. Porém, quando este tipo de tolerâncias é utilizado em relação a sistemas coordenados ou *datums*, a orientação e a localização das características também estarão restringidas.

Assim sendo, as tolerâncias de perfil e superfície em relação a *datums* são muito restritivas, e como consequência, difíceis de produzir e medir. Do ponto de vista da medição por coordenadas, este tipo de características pode ser medida utilizando como referência o desenho CAD da peça. É preciso que a definição dos *datums* seja a adequada devido a que erros nestes influirão grandemente nos resultados. Alguns exemplos de especificação se apresentam na Tabela 6.

Tabela 6 – Exemplos de aplicação de tolerâncias de perfil e superfície em relação a *datums*. Adaptado de <sup>[34]</sup>.



Quando não é possível utilizar o desenho CAD da peça, o procedimento para avaliar este tipo de características pode ser muito complexo. Uma abordagem pode ser a medição da superfície da peça dividindo-a em elementos padronizados como

linhas e arcos. Os elementos são avaliados pelo algoritmo de Mínima Zona, restringindo-os de acordo aos valores nominais especificados no desenho técnico [52]. Um exemplo desta situação se apresenta na Figura 25.

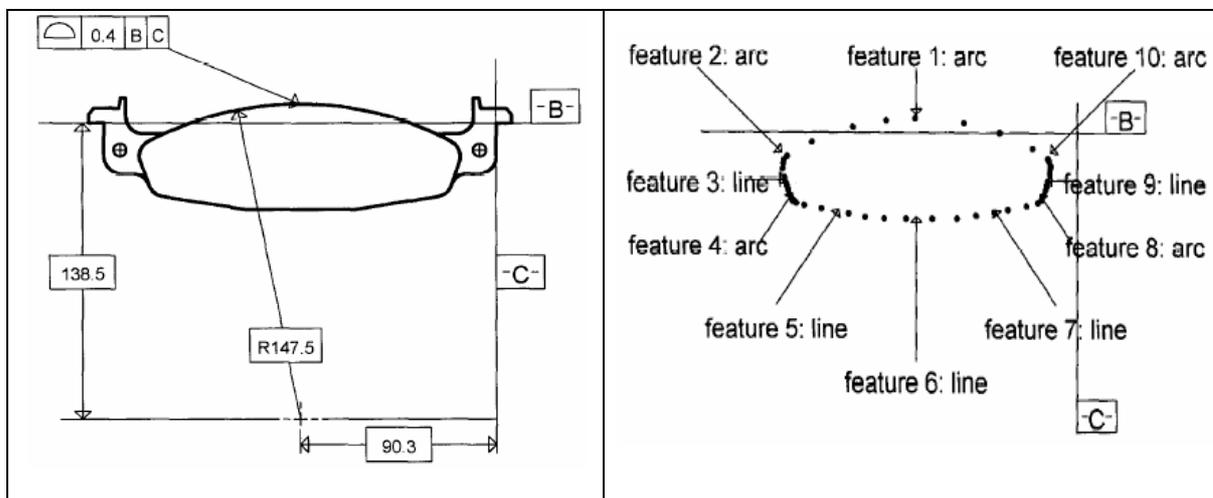


Figura 25 – Medição de uma tolerância de perfil em relação a *datums* numa MMC. Adaptado de [52].

#### 2.4.10 Tolerâncias de ângulos e cones

As tolerâncias de ângulo são determinadas por distâncias medidas ortogonalmente ao plano angular, e são especificadas em marcos de controle no desenho técnico. Em ângulos que não são considerados como cotas básicas, as tolerâncias podem ser apresentadas junto ao valor do ângulo especificado [34] (Figura 26).

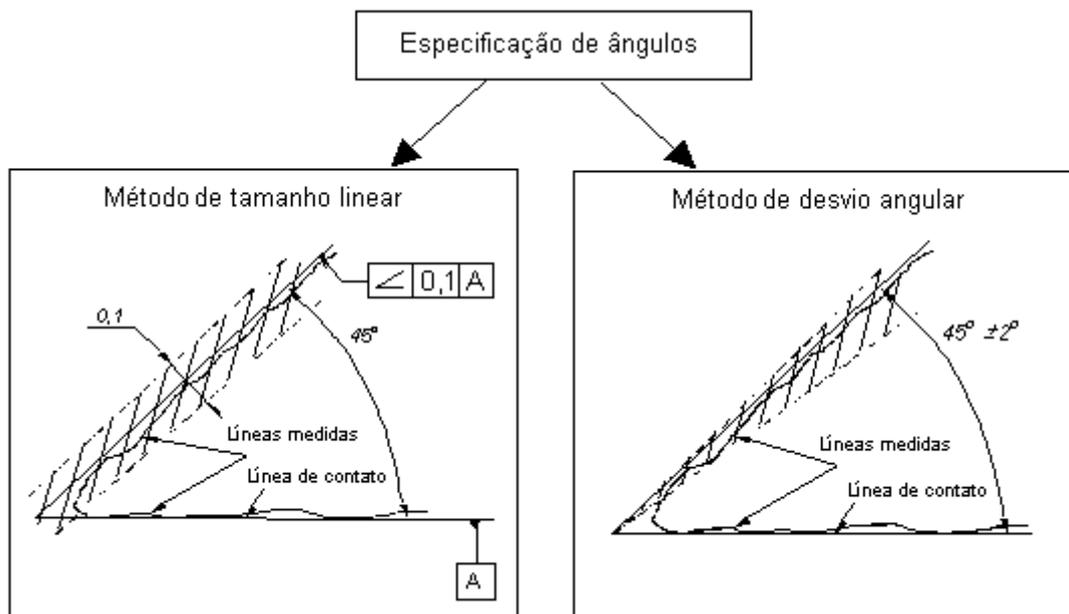


Figura 26 – As duas opções para especificação de ângulos. Adaptado de <sup>[34]</sup>.

Assim sendo, a principal diferença entre a especificação angular e a especificação linear, é que a primeira é independente do valor nominal do ângulo e do comprimento do lado que foi tolerado. Na especificação linear, quanto maior for o comprimento do lado, menor será o desvio angular permissível para o mesmo valor da tolerância. Portanto, um incremento no comprimento do lado permite aumentar a amplitude da zona de tolerância, sem incrementar os desvios angulares da superfície real que forma o ângulo.

É interessante destacar que as medições de ângulo não são afetadas por desvios na temperatura, já que a expansão térmica do material é proporcional em todos os sentidos. Por outro lado, no caso de especificação pelo método de desvio angular, é recomendável utilizar como referência o lado mais comprido, sempre e quando não for estabelecido o contrário no desenho técnico.

Todos os princípios de especificação angular são válidos para peças cônicas, considerando que a zona de tolerância é limitada por dois cones coaxiais distanciados no valor da tolerância especificada.

#### 2.4.11 Tolerâncias de batimento

Em geral, tolerâncias de batimento são utilizadas em peças com alguma simetria circular, quando é necessário conhecer os desvios de posição dos pontos na periferia da peça em relação a um eixo de rotação natural. Assim,

independentemente do tipo de tolerância de batimento, é preciso definir corretamente a referência ou *datum* que simulará o eixo de giro da peça.

Na metrologia convencional, medições de batimento são realizadas utilizando transdutores de deslocamento, a partir de uma montagem sobre blocos em V. O operador faz girar a peça sobre os blocos em V, apoiado no elemento cilíndrico de referência, e são medidos os desvios utilizando o comparador alinhado com a direção requerida pela especificação de batimento (radial, axial ou em qualquer direção).

Na medição por coordenadas, as referências são simuladas a partir da aquisição de uma grande quantidade de pontos e utilizando um método de ajuste adequado, nesses casos, o Máximo Cilindro Inscrito para referências cilíndricas internas ou Mínimo Cilindro Circunscrito para referências cilíndricas externas. Se a MMC inclui uma mesa rotativa, seu uso é ideal para definir o elemento de referência e avaliar os desvios de batimento. Porém, o alinhamento do eixo da peça com o eixo da mesa rotativa é difícil de ser realizado e pode-se tornar crítico para medições de alta exatidão. Medição por *scanning* também pode ser utilizada neste tipo de medições, devido a que o alto número de pontos adquiridos é de muita importância para a avaliação dos desvios e definição dos *datums*.

## 2.5 SÍNTESE

Uma revisão da tecnologia de medição por coordenadas foi apresentada neste capítulo. Especificamente, o conceito de rastreabilidade foi apresentado no entendimento atual da tecnologia, conjuntamente com as principais fontes de incertezas que afetam a medição. Foi apresentado ainda o conceito de incerteza de medição por tarefas específicas em MMC, ressaltando a problemática da amostragem e os algoritmos de ajuste de elementos geométricos. As técnicas apresentadas estão inseridas dentro do escopo da estratégia de medição, pilar fundamental para medições consistentes e rastreáveis, fortemente influenciadas pelo conhecimento do operador e o software de medição.

Uma ênfase especial foi dada à definição do mensurando, especificado no desenho técnico da peça a ser calibrada. O entendimento aprofundado da tarefa de

medição é outro dos pilares para o sucesso das medições efetuadas em MMC, assim como para a correta avaliação de incertezas.

No próximo capítulo serão apresentadas as principais aplicações das peças padrão, além dos principais métodos de calibração e avaliação de incertezas em MMC conhecidos na atualidade. Dessa forma, o estudo do estado da arte estará concluído, permitindo a introdução da proposta de solução no Capítulo 4 .

## **3 PEÇAS PADRÃO: USOS E MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO**

Neste capítulo, uma revisão das principais aplicações industriais das peças padrão, bem como suas metodologias para calibração com MMC, serão apresentadas. O objetivo fundamental é descrever os conceitos fundamentais por trás de cada metodologia, suas vantagens e desvantagens, possibilidades e limitações. O conhecimento aprofundado do estado da arte na calibração de peças padrão construirá uma ponte com a nova metodologia que será apresentada no próximo capítulo, quando o Método Híbrido for introduzido.

### **3.1 AS PEÇAS PADRÃO NA INDÚSTRIA E SUAS APLICAÇÕES**

Para completar o estudo inicial da tecnologia de medição por coordenadas do ponto de vista da calibração de peças, é necessário conhecer as aplicações destas na indústria e nos laboratórios de calibração. Por este motivo, serão descritos quatro grandes grupos de aplicações das peças padrão: verificação e zeragem de dispositivos, monitoramento contínuo e avaliação de incertezas em MMC.

#### **3.1.1 Verificação e zeragem de dispositivos de medição**

Na atualidade, as indústrias utilizam uma grande quantidade de dispositivos de medição para controlar características geométricas e dimensionais no chão de fábrica. Seu objetivo fundamental é controlar o processo de produção, fornecendo informação quantitativa sobre características pré-estabelecidas das peças fabricadas. Muitos dispositivos são também usados para avaliar a conformidade do produto com as especificações, na modalidade de inspeção 100%.

Nesta dissertação, dois diferentes tipos artefatos de referência serão descritos: padrões corporificados e peças de produção. Padrões corporificados referem-se àqueles artefatos especialmente fabricados para servirem como objetos de referência, apresentando boas características de dureza, baixo erro de forma e geometria simples (geralmente elementos planos e cilindros). Dado que são fabricados para serem especialmente rígidos e estáveis termicamente, seus preços são geralmente elevados. Entre os padrões corporificados encontram-se blocos padrão, padrões escalonados, placas de furos ou esferas, tetraedros de esferas padrão e cubos padrão, entre outros. Em algumas situações, é conveniente criar um padrão corporificado similar à peça de produção, mas com um acabamento superficial melhorado, estável térmica e mecanicamente, e construído a partir de elementos geométricos simples, como cilindros, planos e esferas. (Figura 27). Entretanto, calibrações periódicas desses artefatos devem ser realizadas para assegurar a rastreabilidade. Dependendo da complexidade relativa, o processo de calibração pode ser realizado com diferentes instrumentos de alta exatidão, tais como medidores de forma, máquinas de Abbe e MMC.

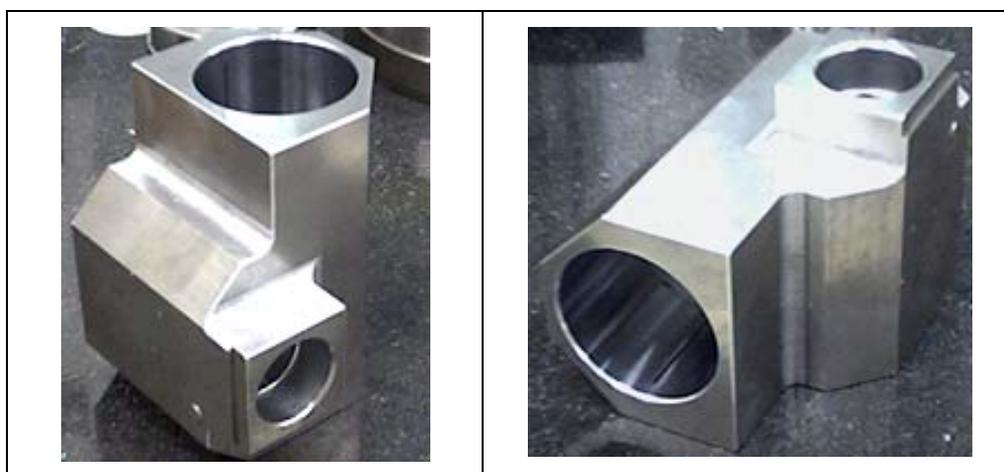


Figura 27 – Artefato para zeragem rápida de um dispositivo MARPOSS<sup>1</sup> dedicado à inspeção de carcaças de direção no chão de fábrica. Cortesia WHB Usinagem.

Por outro lado, peças de produção podem ser calibradas em MMC de referência, permitindo avaliar desvios sistemáticos de outras MMC ou sistemas de medição. Peças não calibradas, embora não permitam avaliar erros sistemáticos,

---

<sup>1</sup> MARPOSS é uma empresa multinacional que desenvolve sistemas de medição, padrões e soluções especiais sob encomenda para indústrias, entre outros.

podem ser úteis quando a necessidade é monitorar a estabilidade de uma MMC. Uma peça de produção usada como referência não precisa de um procedimento de medição especial, representa fielmente a tarefa de medição, seu custo é baixo e sua disponibilidade é imediata. Porém, algumas desvantagens como erros de forma, instabilidade do material a longo prazo, susceptibilidade à oxidação e necessidade de calibração, devem ser consideradas.

#### **3.1.1.1 Padrões corporificados simulando peças de produção**

A metrologia por coordenadas é muitas vezes empregada na calibração de peças padrão ou dispositivos de zeragem utilizados em dispositivos de medição especiais. Este tipo de sistemas de medição utiliza geralmente transdutores indutivos de deslocamento, combinados em diferentes tipos de fixação e montagem, dependendo da aplicação. A característica principal destes sistemas é velocidade de medição e facilidade de uso, sem detrimento da capacidade de medição. Devido ao seu princípio de funcionamento, a necessidade de artefatos ou medidas materializadas para realizar checagens periódicas e zeragem é evidente. Entretanto, o princípio de medição dos dispositivos com transdutores indutivos geralmente não permite uma adequada realização do mensurando, definido pelo desenho técnico da peça.

Quando considerarmos os erros de forma dos padrões de zeragem, os quais são geralmente desprezíveis, em conjunto com a mecânica do dispositivo, que faz contato com a peça ou o padrão em pontos definidos, é possível afirmar que a forma de realização do mensurando está totalmente predeterminada. Isto facilita grandemente o trabalho do metrologista por coordenadas, quem só precisa “imitar” o funcionamento do dispositivo de medição para calibrar o artefato usado na checagem ou zeragem. Assim, não é relevante a contribuição à incerteza de calibração dos erros de forma e textura superficial do padrão corporificado. Predominam, então, as contribuições da máquina e do meio ambiente.

#### **3.1.1.2 Peças de produção calibradas**

Na verificação e zeragem de dispositivos de medição dedicados, peças de produção podem ser utilizadas após uma calibração numa MMC de referência. O procedimento de calibração da peça deve corresponder fielmente com o

procedimento de medição real do sistema de medição dedicado. Nesse caso, a estratégia mais adequada é a apalpação em pontos específicos da superfície da peça e a avaliação de elementos geométricos através das mesmas equações utilizadas no sistema de medição dedicado. Um caso típico é a avaliação do diâmetro de um furo quando medido por quatro transdutores de deslocamento. Nessa situação, a avaliação do diâmetro é feita como a média entre as duas diferenças (em relação ao valor nominal) dos pontos diametralmente opostos. Assim, o procedimento de calibração com uma MMC deve ser a medição de quatro pontos igualmente espaçados e a avaliação das médias das distâncias entre pontos opostos.

### **3.1.2 Monitoramento contínuo de MMC**

Outra aplicação importante das peças padrão é o monitoramento contínuo de MMC. As organizações que utilizam um sistema de gestão da qualidade como o da norma ISO 9000, precisam definir procedimentos para a avaliação periódica dos seus instrumentos de medição, incluindo as MMC. A norma ISO 10360-2 no seu anexo A, menciona um procedimento para o monitoramento de MMC. Para esse fim, o teste de performance descrito nessa norma é utilizado fundamentalmente como teste de aceitação em contratos de compra-venda, contudo reduzido na quantidade de medições, localizações e orientações do padrão no volume da MMC. A intenção desse teste reduzido é provar que os resultados do teste de verificação não mudaram ao longo do tempo. Assim sendo, o monitoramento é realizado no dia-a-dia de funcionamento da MMC, até que algum valor de erro máximo supere o valor permissível ou até atingir a data de reverificação, usualmente um ano. Quando o teste de monitoramento apresentar valores acima dos valores permissíveis, correções físicas ou ajustes no CAA serão realizados, e uma nova verificação completa deverá ser executada.

A realização desse teste reduzido, ou *interim-check*, é baseada num artefato calibrado, geralmente alguns dos apresentados a seguir:

- Placa de furos ou esferas.
- Barra de furos ou esferas.

- Barra com capacidade para ser colocada entre uma esfera fixa e a esfera do apalpador<sup>1</sup>.
- Peça padrão dedicada.

Deve-se deixar em claro que, estritamente falando, para provar a estabilidade da MMC não é preciso conhecer os valores verdadeiros convencionais dos objetos de referência medidos. O único requisito é poder avaliar mudanças significativas nos parâmetros de medição que possam afetar a incerteza de medição. Como consequência, peças padrão calibradas permitirão, aliás, a avaliação de tendência, enquanto peças padrão não calibradas só permitirão avaliação de estabilidade.

### 3.1.2.1 Monitoramento contínuo com padrões corporificados

Historicamente, artefatos ou objetos de referência calibrados de tipo unidimensional, vêm sendo utilizados tanto para testes de verificação de performance e calibração de MMC, como para o monitoramento ao longo do tempo, dentro do escopo da ISO 10360-2. Os padrões deste tipo mais comumente empregados são os blocos padrão, padrões escalonados e barras de esferas. Padrões bidimensionais como as placas de furos ou esferas também são muito utilizados, principalmente para calibração e avaliação de erros geométricos. Finalmente, padrões tridimensionais, como tetraedros e cubos de esferas, foram introduzidos nos últimos anos para testes rápidos e monitoramento periódico (Figura 28).

Todos esses padrões são calibrados através do princípio de substituição, utilizando medidas materializadas de melhor exatidão ou por comparação direta com sistemas *lasers*. Isto é possível devido a que os elementos que constituem os padrões (planos, furos, esferas) apresentam uma muito boa textura superficial, e são construídos de forma que só características dimensionais lineares sejam calibradas (distância entre furos, esferas ou planos paralelos).

---

<sup>1</sup> Este tipo de artefato é produzido pela empresa inglesa RENISHAW. A denominação do produto dada pelo fabricante é MCG System (Machine Checking Gauge System). Mais informação em: <http://www.renishaw.com>



Padrão escalonado (1D). Cortesia Mitutoyo Co.



Placa de Furos (2D). Cortesia LabMetro, UFSC.



Tetraedro de Esferas (3D). Cortesia Unimetrik S.A.

Figura 28 – Artefatos de referência utilizados no monitoramento contínuo de MMC.

Todos os artefatos mencionados anteriormente precisam de dispositivos de fixação dedicados, programas especiais de medição CNC, algoritmos de avaliação e treinamento específico do operador. Além disso, o procedimento de medição pode ser demorado, pelo que o custo do tempo requerido para a medição deve ser somado ao próprio custo do artefato calibrado.

### 3.1.2.2 Monitoramento contínuo com peças de produção

Quando peças padrão são utilizadas para o monitoramento contínuo de MMC, os problemas de fixação, programação do CNC e treinamento do operador são diminuídos, além do tempo e custo total do procedimento de verificação. Porém, peças de produção calibradas com baixos níveis de incerteza são necessárias (Figura 29). Outra vantagem do uso de peças padrão é a possibilidade de avaliar a capacidade específica da MMC em medir as características geométricas e dimensionais da peça em questão <sup>[63]</sup>.

Embora a norma ISO 10360-2 permita o uso de peças padrão para o monitoramento de MMC, seu uso é prejudicado pela necessidade de fornecer incertezas na calibração. Porém, se o objetivo for o estudo da estabilidade da MMC ao longo do tempo, peças ou objetos não calibrados podem ser utilizados. Esta prática, ainda não padronizada por norma nenhuma na atualidade, foi utilizada para avaliar a deterioração do desempenho na MMC, causada por mudanças nas condições no meio ambiente, degradação dos subsistemas, ou variações do ciclo de medição, incluindo a posição da peça no volume da MMC <sup>[64]</sup>.



Figura 29 – Calibração de uma peça para ser usada como artefato de referencia para monitoramento de MMC no chão de fábrica <sup>[63]</sup>.

A metodologia de avaliação implica na construção de cartas de controle de média e amplitude, para detectar possíveis condições fora de controle no processo de medição (Figura 30). As características controladas são as mesmas usadas no processo normal de inspeção das peças, e permite tomar ações diretas no sistema de medição, no mesmo momento em que acontecem as variações. Peças padrão não calibradas podem também ser utilizadas em estudos de Repetitividade e Reprodutibilidade de sistemas de medição (GR&R) <sup>[65]</sup>.

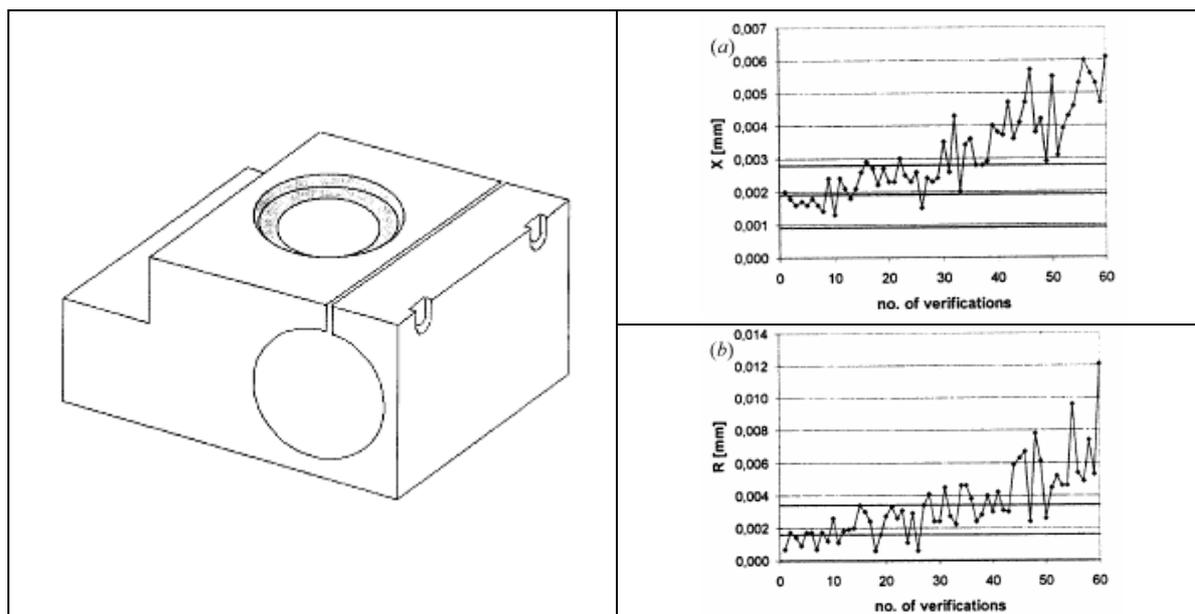


Figura 30 - Esquema de uma peça utilizada para monitoramento de MMC junto as cartas de controle de média e amplitude mostrando a variabilidade devida a temperatura <sup>[64]</sup>.

### 3.1.3 Avaliação de incertezas em MMC

A aplicação mais relevante das peças padrão, do ponto de vista da rastreabilidade das medições nas MMC, é a avaliação de incertezas em tarefas específicas. As peças padrão calibradas podem ser utilizadas no chão de fábrica para estabelecer rastreabilidade direta às medições através do método de substituição. Nestes casos, a vantagem reside na facilidade do procedimento de calibração, a partir de uma estratégia de medição mais simples, com um número de pontos menor e avaliação por método dos Mínimos Quadrados. Porém, quando este tipo de peças padrão for utilizado para avaliar incerteza de peças de produção, devem ser estimadas as incertezas decorrentes da variabilidade do processo de produção real, incluindo erros de forma e rugosidade superficial [60]. Na Figura 31 pode-se observar a carcaça de um sistema de direção de veículos leves utilizada como padrão interno de uma empresa dedicada à fabricação de peças para a indústria automotiva.

Na próxima seção será explicada a norma ISO que especifica o procedimento para avaliar incertezas em MMC a partir do uso de peças padrão.

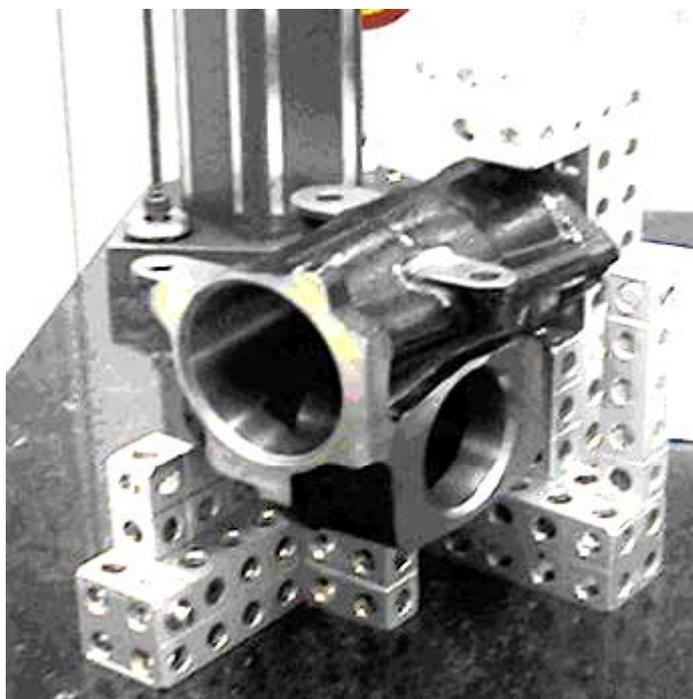


Figura 31 – Carcaça de direção padrão usada como referência para a avaliação de incertezas de uma MMC instalada no chão de fábrica. Cortesia WHB Usinagem.

### 3.1.3.1 A Norma ISO/TS 15530-3

A norma ISO 15530 é uma especificação técnica que forma parte do conjunto de normas GPS para a especificação geométrica de produtos. Seu objetivo principal é fornecer técnicas para avaliação de incertezas em medições realizadas em MMC. Esta norma consta de cinco partes, como se detalha a continuação <sup>[8]</sup>:

1. Descrição e conceitos gerais.
2. Uso de múltiplas estratégias de medição.
3. Uso de peça ou padrões calibrados.
4. Uso de simulação computacional.
5. Avaliação por especialistas.

Das mencionadas anteriormente, a única parte publicada até o momento é a Parte 3. O comitê ISO/TC 213 é o encarregado de preparar esta série de normas, e se espera que no final do ano seja publicada a Parte 2. O autor deste trabalho tem colaborado como revisor da versão *draft* dessa parte da norma, a qual será detalhada em maior profundidade ainda neste capítulo.

O objetivo fundamental da Parte 3 é fornecer uma técnica experimental para simplificar a avaliação de incertezas em medições com MMC. Nesta abordagem experimental, medições são realizadas da mesma forma que nas peças normais, mas sobre peças ou padrões previamente calibrados, com dimensões e geometria similar. A descrição desta técnica experimental é o elemento central desta norma. Portanto, a metodologia geral de avaliação de incertezas estará baseada no método de substituição. Assim mesmo, a padronização destes procedimentos de avaliação de incertezas serve como reconhecimento internacional de calibrações e outros resultados de medição.

As limitações deste método podem ser resumidas em: a disponibilidade de artefatos ou peças com as características geométricas desejadas, estabilidade, custos razoáveis, e a possibilidade de calibrar as peças padrão com valores de incerteza adequados.

Para fornecer rastreabilidade às medições, três fontes de incertezas principais são mencionadas na norma: contribuições devidas ao procedimento de medição; contribuições devidas à calibração da peça padrão; contribuições devidas às

variações das peças medidas (mudanças nos desvios da peça, coeficiente de dilatação térmica e textura superficial).

Um cenário possível descrito na norma acontece quando uma MMC é utilizada na linha de produção no chão de fábrica, com fins de assegurar a qualidade dos produtos fabricados, preenchendo os requisitos do sistema de qualidade. Assim, as incertezas de medição das características mais críticas das peças devem ser avaliadas, e seus valores devem estar dentro dos parâmetros estabelecidos na política de qualidade da empresa.

Para este fim, uma peça da produção é calibrada com uma MMC de alta exatidão num laboratório especializado. Isto pode ser feito por um laboratório de calibração acreditado, capaz de avaliar adequadamente cada característica requerida na peça. É muito importante que a estratégia de medição seja estabelecida de acordo com a definição GPS especificada no desenho técnico. Em geral, isto implica uma alta densidade de pontos medidos. Como resultado, é obtida uma peça padrão com todas as características rastreáveis, documentadas num certificado de calibração.

Posteriormente, a peça padrão é medida na MMC da linha de produção utilizando uma estratégia de medição adequada às medições do chão de fábrica, isto é, com um número reduzido de pontos adquiridos, devido fundamentalmente a razões econômicas. A medição é repetida pelo menos 20 vezes em diferentes condições (operadores, condições térmicas, fixação, etc), no decorrer de um período suficientemente longo de tempo. Finalmente, os resultados são coletados e avaliados segundo as formulas estabelecidas no corpo da norma.

Assim sendo, o cenário antes descrito na norma ISO 15530-3 gera como consequência a necessidade de peças padrão calibradas. A obtenção de uma metodologia consistente para calibrar estas peças será o foco principal desta dissertação.

### **3.2 CALIBRAÇÃO DE PEÇAS PADRÃO**

Segundo o Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia (VIM), o termo “Calibração” é definido como segue <sup>[16]</sup>:

*“Conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões”.*

O VIM também faz três observações em relação a esta definição:

1. O resultado de uma calibração permite tanto o estabelecimento dos valores do mensurando para as indicações como a determinação das correções a serem aplicadas.
2. Uma calibração pode, também, determinar outras propriedades metrológicas como o efeito das grandezas de influência.
3. O resultado de uma calibração pode ser registrado em um documento, algumas vezes denominado certificado de calibração ou relatório de calibração.

A definição de calibração para peças padrão pode ser empregada do mesmo modo que é empregada em calibrações de outro tipo de medidas materializadas, como blocos padrão, barras de esferas ou padrões escalonados, entre outros. O uso do termo calibração para peças padrão já foi utilizado por diversos pesquisadores da área, fundamentalmente após a publicação da terceira parte da norma ISO 15530 [63],[67].

Nesta seção, quatro diferentes métodos de calibração com MMC serão apresentados: calibração por medição direta, calibração por substituição, calibração por rebatimento e calibração segundo o projeto de norma ISO/TS 15530-2.

### **3.2.1 Calibração por medição direta na MMC**

O tipo de calibração mais simples utilizando uma MMC é a calibração por medição direta. Nesse tipo de calibração, a média dos resultados da medição obtidos por apalpação simples da peça e avaliação das características de interesse são utilizados como valores de referência no certificado de calibração da peça padrão. A avaliação de incertezas consiste então num balanço simples cuja rastreabilidade é fornecida fundamentalmente pelos resultados obtidos na última

calibração da MMC. A vantagem desta metodologia é fundamentalmente sua simplicidade e facilidade de execução e avaliação. Porém, existem diversas desvantagens que limitam sua aplicabilidade. Entre estas se pode mencionar a necessidade por estabilidade da MMC desde a última calibração e balanços de incerteza muito conservativos ou contaminados por erros sistemáticos não corrigidos. Além disso, devido a que os balanços de incerteza são geralmente baseados nos resultados da calibração, o número de graus de liberdade final tende a infinito, implicando na prevalência de componentes de incerteza do tipo B sobre os resultados empíricos da medição. Como conseqüência, os valores atuais da medição não têm influência significativa na composição do balanço de incertezas.

### **3.2.2 Calibração por substituição**

Na calibração por substituição é possível determinar de forma direta os erros sistemáticos atuantes na medição, a partir da medição de um artefato padrão calibrado simulando objeto a ser medido. Assim mesmo, é possível reduzir outras fontes de incerteza atuantes na medição. Quando utilizada, a técnica de substituição reduz a MMC a um simples comparador, embora diversas fontes de incerteza continuem influenciando a medição, como a repetitividade e a resolução limitada do sistema, entre outros.

Na calibração por substituição, o padrão corporificado calibrado permite realizar uma transferência do mensurando para a peça a ser calibrada, criando um vínculo direto entre as duas medidas. Do ponto de vista da rastreabilidade de medição, a técnica de substituição fornece um procedimento ideal, embora várias limitações lhes sejam impostas. Entre estas é possível citar a necessidade de padrões corporificados (medidas materializadas) com essencialmente a mesma forma, tamanho e material da peça a calibrar, medidos aproximadamente na mesma localização da MMC e com idêntica estratégia de medição <sup>[67]</sup>. Uma representação gráfica deste procedimento é apresentada na Figura 32.

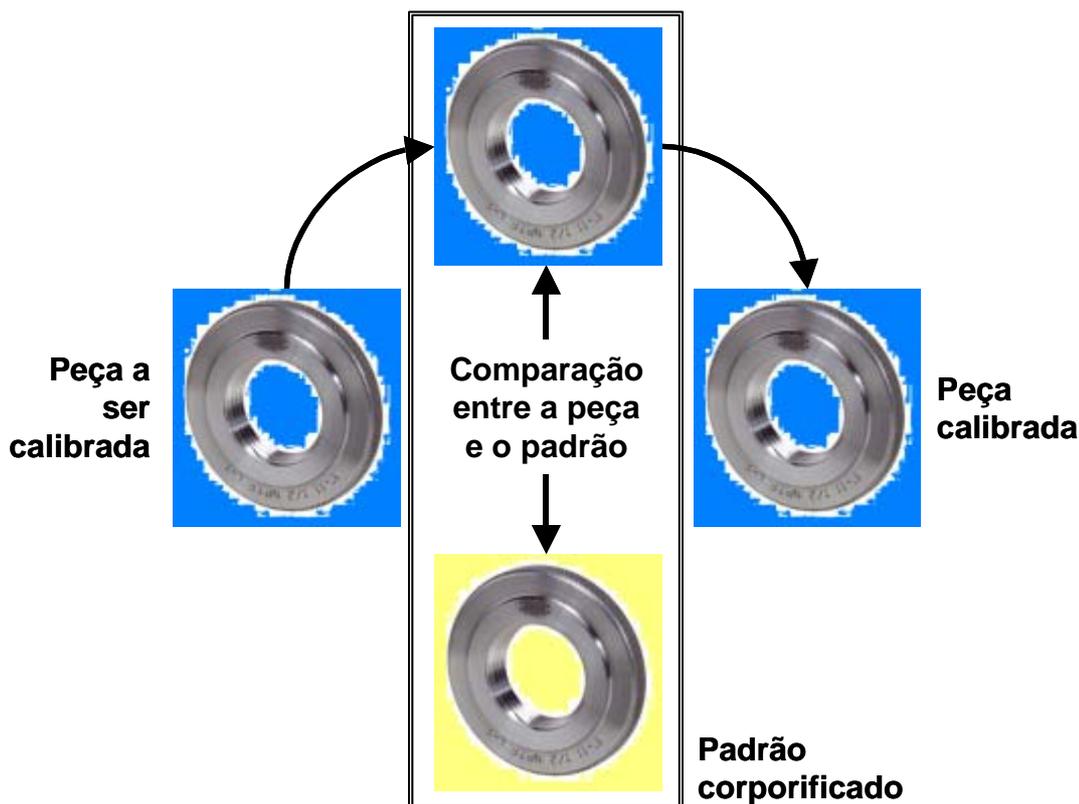


Figura 32 – O princípio de calibração pelo método de substituição. Adaptado de [67].

Um exemplo desta aplicação foi apresentado por Osawa et.al. [82], na calibração de um cilindro padrão por substituição com anéis calibrados e blocos padrão (Figura 33). Nesse caso, um anel padrão foi utilizado para calibrar por substituição o diâmetro do cilindro, enquanto um bloco padrão do mesmo valor nominal do cilindro foi utilizado para calibrar o comprimento. O anel padrão pode deslocar-se ao longo do eixo do cilindro, paralelo com o eixo X da MMC, sem violar o princípio de comparação. Assim, o valor da correção do erro sistemático pode ser derivado através da comparação das medições entre o diâmetro do cilindro e o anel padrão, utilizando a mesma configuração de apalpadores e estratégia de medição. Porém, a calibração do comprimento do cilindro não pode ser realizada idealmente sem violar o princípio de comparação, devido a que o bloco padrão encontra-se deslocado na direção do eixo Y. No entanto, devido a que o erro de guinamento do eixo X ( $x_{rz}$ ) é considerado desprezível, o deslocamento em X pode ser tolerado.

No entanto, a utilização do método da substituição na calibração de peças não é tão difundido no ambiente laboratorial, devido fundamentalmente à

necessidade de padrões corporificados com baixos níveis de incerteza, similares às peças reais a serem calibradas.

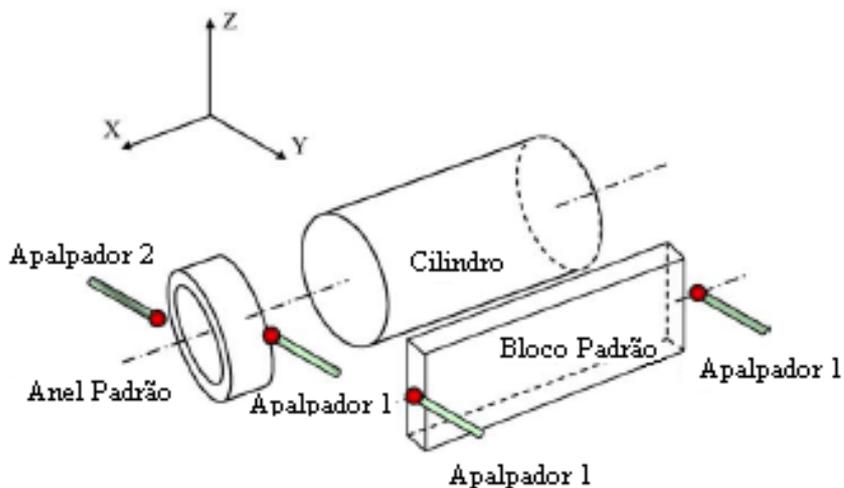


Figura 33 – Calibração de um cilindro padrão por substituição. Adaptado de [82].

Sávio et.al [83] propuseram, dentro do escopo do projeto europeu EasyTrac<sup>1</sup>, o desenvolvimento de padrões similares às peças a serem calibradas, criados a partir de medidas materializadas padronizadas, como cilindros padrão, anéis padrão, etc. Estes padrões são dispostos e combinados entre si de forma de “imitar” a forma, tamanho e geometria da peça, neste caso, a pá de uma turbina (Figura 34).



Figura 34 – Calibração de uma pá de turbina através do uso de objetos padrão modulares. Adaptado de [83].

<sup>1</sup> EasyTrac é o acrônimo em inglês para “Easier and cheaper traceability in industry by up to date methods of calibration”. EasyTrac é um projeto europeu cuja finalidade é fornecer métodos para facilitar e baratear a pirâmide de rastreabilidade em metrologia dimensional.

Posteriormente, o modelo CAD dos padrões combinados (chamado por seus autores como Padrão Modular de Forma Livre) é criado, de forma de estabelecer um padrão virtual a partir do qual os valores medidos ponto-a-ponto são comparados. Assim, as diferenças achadas entre o valor virtual do Padrão Modular de Forma Livre e os valores reais medidos, são utilizados para avaliar a incerteza da medição.

Embora os resultados achados com a metodologia descrita anteriormente são encorajadores em termos de baixo nível de incerteza, as limitações próprias do método de substituição continuam presentes, acrescentando-se ao problema de um maior tempo de medição, recursos de software adicionais para a criação do padrão virtual em CAD e a necessidade de boa similaridade entre o padrão modular criado e a peça a ser calibrada.

### **3.2.3 Calibração por rebatimento**

Desde o início da manufatura em série, as técnicas de rebatimento vêm sendo utilizadas com sucesso na medição dimensional. Um sumário das principais técnicas conhecidas de rebatimento em metrologia dimensional é devido a Evans et.al. [23]. Essas técnicas são todas baseadas em múltiplas medições, mudando a orientação relativa do objeto e do padrão (ou sistema de medição), de forma que os erros influenciem os resultados de forma diferente em cada medição. No caso ideal, os erros do padrão ou do sistema de medição mudam de sinal, permitindo a sua eliminação a partir de uma apropriada avaliação matemática dos resultados [81].

Geralmente, as técnicas de rebatimento são bem conhecidas pelo pessoal técnico dos laboratórios de referência nacionais e das universidades, mas não para os técnicos dos laboratórios de nível médio e do chão de fábrica [23]. Por esse motivo, os responsáveis pelo projeto europeu EasyTrac têm focado seu trabalho em criar métodos de compensação de erros através de técnicas de rebatimento, facilmente adaptáveis aos softwares de medição das MMC [81]. Um resumo das dos principais procedimentos de medição por rebatimento é apresentado na Tabela 7, classificado pela característica a ser medida.

O conhecimento dessas técnicas e procedimentos para a eliminação de erros sistemáticos na medição por coordenadas é de grande importância na calibração de

peças padrão, pois a necessidade por incertezas menores e maior exatidão dos resultados requer procedimentos de medição muito mais apurados.

Tabela 7 – Procedimentos de medição por rebatimento em MMC <sup>[23],[81]</sup>.

<b>Característica</b>	<b>Procedimento e Recomendações</b>
Retitude	Rebatimento de 180° ao redor da linha de medição.
Ângulos retos	Cada lado do ângulo deve estar paralelo a um eixo da MMC. Rebatimento de 180° ao redor do lado do ângulo que está paralelo ao eixo cinemático de ordem inferior e posteriormente uma translação para que as posições dos lados do ângulo nas escalas permaneçam sem variação.
Qualquer ângulo em objetos pequenos	Giro de 90° ao redor do plano do ângulo e cálculo da média; assim, as influencias locais do erro de perpendicularidade e os erros nas escalas são eliminados.
Grade em 2D	Uma posição inicial e subseqüentes rebatimentos de 180° ao redor de cada um dos 3 eixos cartesianos da MMC. (Resolução por sistema de equações). Embora os erros lineais das escalas permanecem inalterados, poderão ser corrigidos separadamente.
Grade em 3D	Uma posição inicial e subseqüentes rotações de 90°, 180°, 270° ao redor de cada um dos 3 eixos cartesianos da MMC. Este procedimento elimina erros de retitude das escalas e alguns erros de tombamento e guinamento. Os erros das escalas X, Y, Z e os rolidos são parcialmente eliminados.
Cilindricidade ou circularidade de objetos relativamente pequenos	Em MMC com mesa rotativa: medição de N posições dos perfis circulares, cada um girado no plano em $(360/N)^\circ$ em relação à posição anterior. Girar os perfis para uma origem em comum e avaliar a média dos perfis. Assim os erros da mesa rotativa são eliminados. Em MMC sem mesa rotativa: Medir 4 perfis em cada seção girando a peça 90° cada vez. Girar os perfis para uma origem em comum e avaliar a média dos perfis. Assim, os erros de perpendicularidade e os erros diferenciais das escalas da MMC são eliminados. Se o eixo do cilindro não é perpendicular ao primeiro eixo cinemático da MMC, repetir as medições girando o cilindro 180° ao redor de um eixo da MMC que seja perpendicular ao eixo do cilindro.
Engrenagens	Procedimento similar ao de cilindridade. Prestar atenção ao erro característico de apalpação (utilizar substituição com esfera ou cilindro padrão)
Esferas	Procedimento similar ao de cilindridade.
Comprimentos	Medição em 3 posições mutuamente ortogonais (o erro médio das escalas não é eliminado: utilizar substituição).

Talvez o caso mais conhecido de técnicas de rebatimento é a calibração de esquadros padrão em MMC. Neste caso, o esquadro padrão é colocado na MMC e são obtidas múltiplas medições nas faces a serem calibradas. Posteriormente, o esquadro é virado 180° ao redor do lado que está paralelo ao eixo cinemático de ordem inferior, cuidando de que a posição relativa do esquadro em relação às escalas permaneça sem variação entre posições como é apresentado na Figura 35. Devido a que o erro de perpendicularidade da MMC permanece invariável entre medições, enquanto o erro de perpendicularidade do esquadro muda de sinal,

ambos os erros podem ser avaliados através de um sistema de equações apropriado.

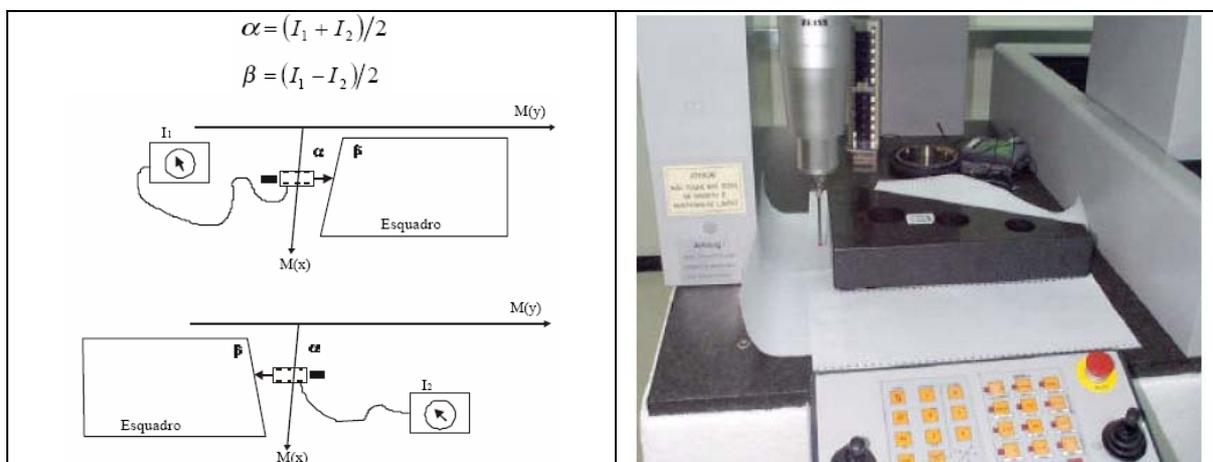


Figura 35 – Método de rebatimento para calibração de perpendicularidade em esquadros. Adaptado de [23], [67].

Uma aplicação interessante da metodologia é o procedimento de qualificação da esfera do apalpador por rebatimento criada no PTB [23]. A técnica consiste no uso de duas esferas de apalpador de diferente diâmetro e um bloco padrão de comprimento desconhecido. Se o bloco padrão for medido com cada uma das esferas, e conseqüentemente o diâmetro de uma delas for medido utilizando a esfera restante, é possível estabelecer um sistema de equações que permita obter tanto o diâmetro das esferas como o comprimento do bloco padrão (Figura 36). Esta técnica é particularmente útil quando a esfera do apalpador for qualificada com o fim de ser utilizada na calibração de blocos padrão ou padrões escalonados.

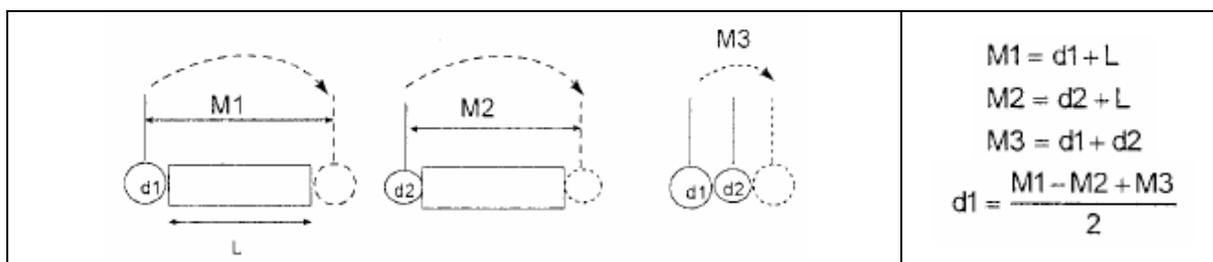


Figura 36 – Estratégia de qualificação da esfera do apalpador por rebatimento, utilizada no PTB para medições de comprimento de alta exatidão. Adaptado de [23].

### 3.2.4 O projeto de norma ISO/TS 15530-2

A Parte 2 da norma ISO/TS 15530 [84] (Uso de múltiplas estratégias de medição), em estado de *draft* na atualidade, visa estabelecer um procedimento

experimental padronizado que permita avaliar incertezas em medições em MMC, de uma forma simples e consistente.

No entanto, essa parte da norma descreve um procedimento para a calibração de artefatos com MMC, utilizando múltiplas estratégias de medição e múltiplas orientações, sendo o complemento ideal da Parte 3, já que permite calibrar peças padrão que podem ser utilizadas na avaliação de incertezas no chão de fábrica.

O princípio fundamental desta metodologia consiste em realizar medições da peça várias vezes, mudando duas condições de medição: a distribuição dos pontos na superfície da peça e a orientação do artefato no volume da MMC. Uma análise de variâncias é realizada sobre os resultados, isolando duas contribuições à incerteza:

1. A influência da repetitividade da MMC na tarefa específica de medição, em conjunto com a influência da distribuição de pontos correlacionada com o desvio de forma, ondulação e rugosidade da peça.
2. A influência dos erros geométricos da MMC junto com as influências do processo de qualificação do apalpador.

Nos casos onde o mensurando é uma distância, um tamanho ou uma posição, mais três contribuições à incerteza são determinadas:

1. O erro médio na medição de distância é determinado através da medição de um padrão de comprimento. Assim, os resultados da medição são corrigidos, em forma proporcional ao comprimento, por esse erro médio achado na medição do padrão. A incerteza da correção é avaliada considerando a incerteza do padrão de comprimento e a repetitividade das medições.
2. O erro médio do diâmetro do apalpador e os desvios padrão correspondentes, para mensurandos internos e externos, é determinado através da medição de padrões adequados (anéis padrão, esferas padrão, etc).
3. As incertezas na correção da temperatura da MMC, do artefato e dos padrões de comprimento são determinadas através de medições da

condição térmica de cada componente, utilizando termômetros calibrados com suas respectivas incertezas.

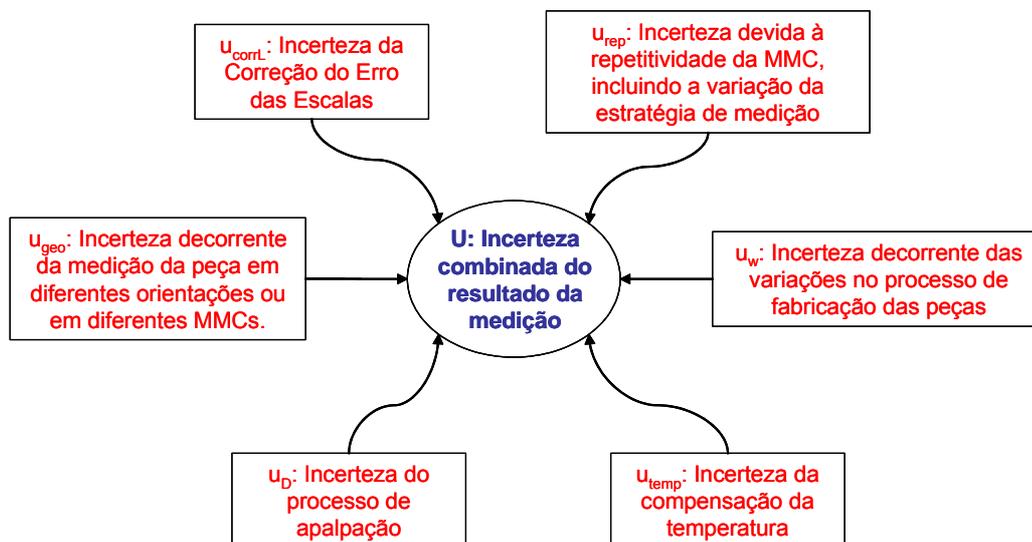


Figura 37 – As contribuições à incerteza segundo a norma ISO/DTS 15530-2 <sup>[84]</sup>.

Finalmente, todas as contribuições são combinadas e expandidas para obter a incerteza correspondente à tarefa específica de medição. Um valor médio obtido a partir de todas as medições realizadas é calculado e corrigido (quando for o caso), resultando no valor calibrado informado no relatório de calibração.

Como consequência do procedimento mencionado anteriormente, são necessários diferentes tipos de objetos e acessórios que possibilitem a execução das medições, incluindo: jogos de anéis padrão, blocos padrão ou *step-gages*, esferas padrão calibradas, sistema de apalpador múltiplo, sistema de fixação para a peça e os padrões e sistema de monitoramento da temperatura da MMC, da peça a ser calibrada e dos padrões físicos utilizados.

Por outra parte, a metodologia detalhada no *draft* da norma implica num mínimo de vinte repetições em quatro orientações da peça, variando a estratégia de medição entre medições. Assim mesmo, no caso de medições de tamanho e posição, são necessárias nove repetições dos padrões de geometria circular para avaliar o erro do apalpador, e mais nove repetições do padrão de comprimento para avaliar o erro das escalas.

O procedimento mencionado anteriormente requer de uma considerável quantidade de tempo de medição e de avaliação dos resultados. Mesmo assim, a grande vantagem da metodologia é seu caráter experimental, possibilitando uma

análise realista do processo de medição. Outra característica do procedimento, que decorre do uso de múltiplas estratégias e posições da peça na MMC, é a aleatorização de componentes de erro sistemático inerentes ao próprio sistema. Como conseqüência, existe uma tendência a fornecer valores conservativos das incertezas da medição.

### **3.3 AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS NA MEDIÇÃO POR COORDENADAS**

Segundo o VIM <sup>[16]</sup>, o termo “Incerteza de Medição” é definido como segue:

*“Parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser fundamentadamente atribuídos a um mensurando”.*

O VIM também faz três observações em relação a esta definição:

1. O parâmetro pode ser, por exemplo, um desvio padrão (ou um múltiplo dele), ou a metade de um intervalo correspondente a um nível de confiança estabelecido.
2. A incerteza de medição compreende, em geral, muitos componentes. Alguns destes componentes podem ser estimados com base na distribuição estatística dos resultados das séries de medições e podem ser caracterizados por desvios padrão experimentais. Os outros componentes, que também podem ser caracterizados por desvios padrão, são avaliados por meio de distribuição de probabilidades assumidas, baseadas na experiência ou em outras informações.
3. Entende-se que o resultado da medição é a melhor estimativa do valor do mensurando, e que todos os componentes da incerteza, incluindo aqueles resultantes dos efeitos sistemáticos, como os componentes associados com correções e padrões de referência, contribuem para a dispersão.

No caso específico da metrologia por coordenadas, diversas metodologias foram desenvolvidas ao longo dos anos para estimar incertezas de medição. Nas seguintes seções serão descritas as principais metodologias utilizadas na

atualidade, apresentando as vantagens e desvantagens de cada uma, juntamente com seu escopo de utilização.

### 3.3.1 Método dos coeficientes de sensibilidade (GUM)

Naqueles casos em que é possível estabelecer uma solução analítica para a definição do mensurando, como uma função dos parâmetros de medição, é relativamente fácil seguir as recomendações do GUM para a avaliação da incerteza de medição. Segundo o Guia, primeiro é necessário listar cada fonte de incerteza, quantificar cada uma delas através do desvio padrão, determinar seus coeficientes de sensibilidade e de correlação com às outras fontes de incerteza, somar os produtos dos desvios padrão pelos seus coeficientes ao quadrado e informar a incerteza padrão expandida com um fator de abrangência, tipicamente dois <sup>[11]</sup>. Portanto, esta técnica é muito útil quando o modelo matemático de medição é bem conhecido, e as fontes de incertezas podem ser adequadamente quantificadas. Um bom exemplo da aplicação deste método pode se achar na medição de pequenos diâmetros em MMC <sup>[5]</sup>.

Laboratórios de calibração de nível médio já têm adaptado a metodologia do GUM para avaliação de incertezas. Porém, a abordagem empregada é o desenvolvimento de um balanço de incertezas, baseado num modelo matemático de medição aditivo simples. Neste modelo, cada fonte de incerteza é avaliada individualmente, sendo a principal fonte de erros o erro de comprimento avaliado na calibração. Desvios na temperatura e o erro de repetitividade seguem em importância como fontes de incerteza. Densidade de pontos reduzida e realização simplificada do mensurando são geralmente utilizados. Como consequência desta avaliação simplificada, valores relativamente otimistas das incertezas são achados, resultando na potencial perda da rastreabilidade. Porém, modelos mais apurados e realistas podem ser aplicados, possibilitando uma melhor avaliação de incertezas quando o modelo de medição é definido para uma tarefa específica. Uma aplicação desta abordagem na medição de carrocerias de carro através de MMC tipo braço, foi realizada por Weckenmann no ano 2001 <sup>[18]</sup> (Figura 38).

Nesse trabalho, seis fontes de incerteza principais foram analisadas:

- Incerteza devida ao erro de geometria da MMC.

- Incerteza devida à deformação elástica da carroceria quando medida pela MMC.
- Incerteza devida à rugosidade da carroceria.
- Incerteza devida à expansão térmica da carroceria
- Incerteza devida à compensação inexata da temperatura da peça.
- Incerteza devida ao operador da MMC.

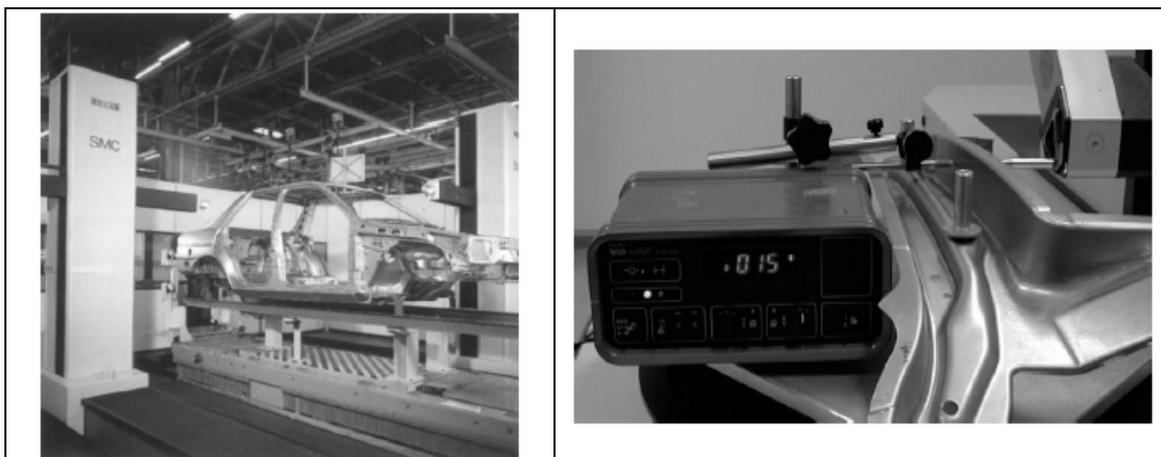


Figura 38 – Medição da carroceria de um carro e avaliação do erro devido à deformação elástica da chapa pela força de apalpação da MMC. Adaptado de <sup>[18]</sup>.

Os valores dos desvios padrão para cada componente de incerteza foram achados através de experimentos específicos, dados do certificado de calibração da MMC, medição da temperatura e conhecimento prévio. Foram supostos coeficientes de sensibilidade unitários e coeficientes de correlação nulos para as fontes de incerteza. Finalmente, a soma quadrática dos desvios foi realizada, e o resultado expandido por um fator de dois ( $\cong 95\%$  de confiança).

Um problema importante desta metodologia é que a maioria das fontes de incertezas é avaliada como sendo de tipo B, implicando em uma grande quantidade de conhecimento fundamentalmente não empírico do processo de medição. Isso resulta em valores dos graus de liberdade finais tendendo a infinito. Como resultado, pouca informação do estado real do processo de medição é avaliada.

Outro problema importante da aplicação dessa metodologia são os valores relativamente altos das incertezas de medição achados. Entretanto, no ambiente controlado do laboratório de calibração, com operador qualificado, estratégia coerente com a definição do mensurando e tempo maior para a realização de

repetições, a utilização desta metodologia pode ser bem sucedida. Para isso, uma sistemática adequada deve ser estabelecida e mantida para cada tipo de mensurando avaliado, enquanto diferentes testes empíricos devem ser realizados ao longo do tempo para quantificar todas as principais fontes de incertezas envolvidas na medição.

### 3.3.2 Simulações computacionais

Existem diversos métodos de simulação computacional que tentam fornecer estimativas de incertezas em tarefas específicas de MMC. Todos eles apresentam um modelo matemático da máquina e o processo de medição, utilizados para substituir os modelos analíticos de propagação de incertezas, como são definidos no modelo GUM clássico. As simulações computacionais são todas baseadas no conceito de propagação de incertezas de Monte Carlo, no qual as variáveis de entrada do modelo matemático são geradas aleatoriamente a partir de modelos de distribuição de incertezas previamente estabelecidos.

A metodologia de simulação por Monte Carlo para a avaliação de incertezas já é utilizada em muitas situações onde os requisitos impostos no método recomendado no GUM não são cumpridos. Embora na atualidade não exista uma norma internacional que regule este tipo de simulação para a avaliação de incertezas, é de esperar que o comitê TMB<sup>1</sup> da ISO publique proximamente o Suplemento 1 do GUM (Métodos Numéricos para Propagação de Distribuições), atualmente em fase de *draft*.

O método de Monte Carlo geral é útil na medição por coordenadas, especificamente na avaliação de algumas componentes específicas que influem na medição. Yan et.al. estudaram a influência do erro das escalas da MMC, decomposição dos erros geométricos e redução de variâncias, através de simulação computacional por Monte Carlo<sup>[77],[78],[79]</sup>. Eles realizam um estudo simples dos erros atuantes no sistema, permitindo estabelecer valores quantitativos dos erros das escalas numa MMC particular (Figura 39).

---

<sup>1</sup> TMB é a sigla em inglês para o Technical Management Board da ISO, o qual agrupa o Vice-Presidente de Gerenciamento Técnico e doze membros eleitos, incluindo ANSI nos Estados Unidos.

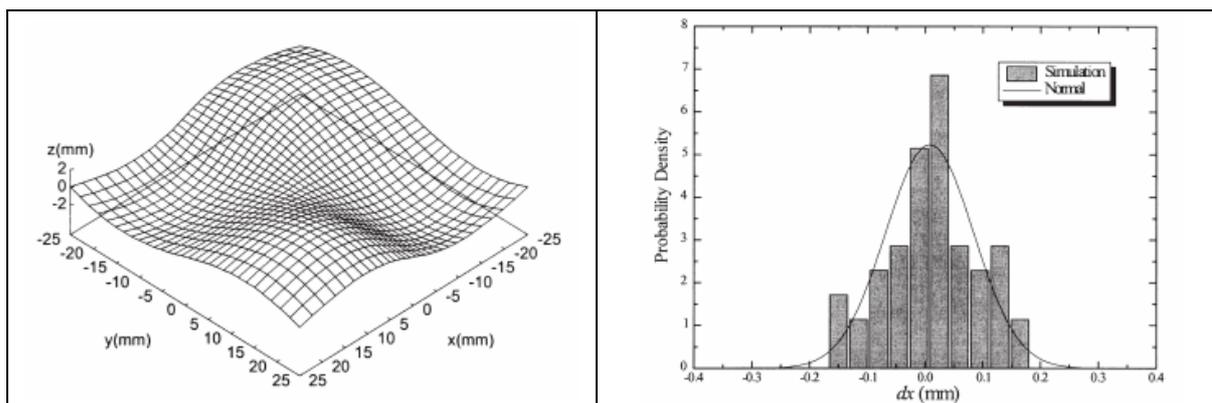


Figura 39 – Simulação da medição de um plano por Monte Carlo e a distribuição de probabilidade do erro da máquina na escala X. Adaptado de [77].

Outra técnica matemática que vem sendo objeto de estudo em numerosas pesquisas é a técnica de *bootstrap* ou reamostragem. Basicamente, o objetivo desta técnica é obter múltiplas amostras a partir de um único conjunto de dados, diminuindo o tempo de medição e facilitando a análise. Essa técnica foi utilizada por Choi et.al. para a análise de planeza em medições por coordenadas [80]. A metodologia da técnica de *bootstrap* pode-se entender a partir da Figura 40.

É de esperar que todos os esforços relativos ao uso de ferramentas computacionais para a avaliação de incertezas por Monte Carlo, levem à criação de um pacote de software que seja amplamente disseminado, como parte de um *toolbox* ou conjunto de ferramentas computacionais de metrologia [5].



Figura 40 – Técnica de bootstrap aplicada à análise de planeza. Adaptado de [80].

Nas próximas seções, serão descritos os três métodos de simulação computacional para avaliação de incertezas em MMC mais utilizados na atualidade. Estes são a *Virtual CMM (VCMM)*, o PUNDIT/CMM e Simulação por Condições de Contorno.

### 3.3.2.1 Máquina de Medir por Coordenadas Virtual (VCMM)

A Máquina de Medir por Coordenadas Virtual permite estimar incertezas para uma tarefa específica de medição, numa MMC em particular, a partir de simulações realizadas pelo método de Monte Carlo. O princípio de funcionamento da VCMM é apresentado na Figura 41.

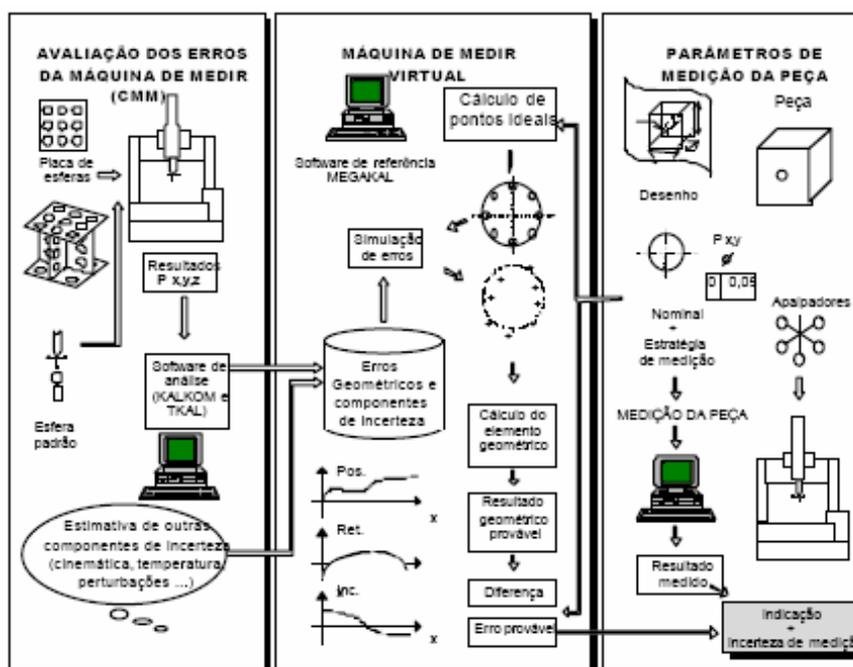


Figura 41 – O princípio da MMC Virtual (Virtual CMM) desenvolvida pelo PTB. Adaptado de [67].

Basicamente, a VCMM realiza simulações ponto a ponto das medições, emulando a estratégia de medição e o comportamento físico da MMC, com todas as fontes de incertezas contaminando a medição [10].

O funcionamento da VCMM depende essencialmente do fornecimento de parâmetros de entrada adequados, descrevendo todas as contribuições à incerteza de medição. Atualmente, três contribuições fundamentais são consideradas:

- MMC e seu ambiente de medição, incluindo desvios sistemáticos da geometria, incertezas da calibração, deformação térmica da MMC, expansão térmica das escalas e derivas no tempo.
- Processo de apalpação, incluindo o comportamento do apalpador como uma função da direção de apalpação, incertezas da calibração ou

qualificação do apalpador e incertezas devidas ao uso de apalpador múltiplo ou indexável.

- o Peça, incluindo a sua expansão térmica e rugosidade superficial.

Todas as contribuições são avaliadas através de testes específicos e dados atuais da medição. No caso dos desvios geométricos da MMC, testes de performance são realizados utilizando placas de esferas ou furos calibradas e software dedicado, o qual permite avaliar os 21 erros paramétricos clássicos da MMC. No caso dos erros do processo de apalpação, estes são tipicamente avaliados com testes específicos sobre uma esfera padrão. O monitoramento da distribuição de temperaturas no momento da medição servirá como entrada para a compensação dinâmica dos desvios decorrentes da expansão-contração da MMC e a peça. Finalmente, quando todos os parâmetros necessários para a simulação foram coletados, o software da VCMM pode entrar em operação.

Assim, a peça a ser medida é apalpada em pontos específicos de acordo com a estratégia de medição selecionada e os pontos coordenados são armazenados. Posteriormente, o software da VCMM gera conjuntos sucessivos de pontos coordenados (tipicamente 100-200 conjuntos), adicionando erros sistemáticos e aleatórios aos pontos já medidos. Para cada conjunto de pontos, o software de medição da MMC<sup>1</sup> avalia as características geométricas e dimensionais requeridas. Os resultados são avaliados estatisticamente através da média e desvio padrão, e a incerteza resultante é expandida por um fator de abrangência, usualmente dois [70],[71].

Esta metodologia é uma variação da técnica de Monte Carlo, já que para cada ponto medido, um novo valor é achado a partir de um conjunto de erros criados por geradores Gaussianos, utilizando desvios padrão previamente conhecidos.

A VCMM apresenta diversas vantagens, sendo a principal a capacidade de fornecer incertezas em tarefas específicas de uma forma consistente e prática para o operador da MMC. Porém, algumas desvantagens limitam seu uso a laboratórios de calibração de alto nível. Entre estes, é possível mencionar:

---

<sup>1</sup> Atualmente estão em funcionamento o CALYPSO da Zeiss e o QUINDOS da Leitz Messtechnik Wetzlar.

- Alto custo de implementação, devido à necessidade de testes em artefatos caros (placas de esferas ou furos) utilizando softwares dedicados<sup>1</sup>.
- Necessidade de operadores altamente qualificados e conhecedores da tecnologia.
- Necessidade de utilização de software de medição proprietários (CALYPSO, QUINDOS), impedindo sua implementação em MMC de outras marcas.
- Não contemplação da interação específica do erro de forma da peça e a estratégia de apalpação, fixação, limpeza, entre outros.
- Necessidade de computadores com processadores poderosos para diminuir o tempo de simulação.

### 3.3.2.2 O Software PUNDIT/CMM™

Outro tipo de simulador de incertezas para tarefas específicas em MMC é o software PUNDIT/CMM™, desenvolvido pela empresa MetroSage<sup>2</sup>. As contribuições à incerteza consideradas por este método provêm da MMC em si, o sistema de apalpador, as condições ambientais, forma e textura superficial da peça e estratégia de amostragem dos elementos geométricos. Baseado nestas contribuições, o software avalia a incerteza de medição para cada parâmetro GD&T especificado na peça<sup>[72]</sup>. O princípio de funcionamento é similar ao do VCMM, como é apresentado na Figura 42.

As contribuições à incerteza devidas ao sistema de apalpador são simuladas a partir de informação obtida do teste especificado na normativa ISO 10360-5<sup>[73]</sup>. Em relação às condições meio-ambientais, é possível simular expansão-contração tanto da peça como da MMC a partir de informação atualizada da temperatura e coeficientes de expansão, incluindo parâmetros de resfriamento contínuo da peça ao

---

<sup>1</sup> O software da VCMM utiliza resultados obtidos pelo software KALKOM, cuja função é o cálculo dos erros paramétricos em MMC, a partir de medições realizadas em placas de furos ou esferas calibradas.

<sup>2</sup> MetroSage LLC é uma empresa americana fundada em 1999, cujo objetivo é fornecer ferramentas de software para as indústrias, concentrando-se nas áreas de metrologia e de aceitação do produto. PUNDIT/CMM permite avaliar incertezas em tarefas específicas a partir de conhecimento prévio sobre a MMC, a peça e o processo de medição.

longo do transcurso da medição. O comportamento da MMC é representado a partir das informações do teste de performance especificados na norma ANSI-ASME B89.4.1 [74]. Após todos os parâmetros de simulação serem informados, o aplicativo realiza simulações por Monte Carlo e os resultados são analisados estatisticamente. A metodologia de simulação é apresentada na Figura 43.

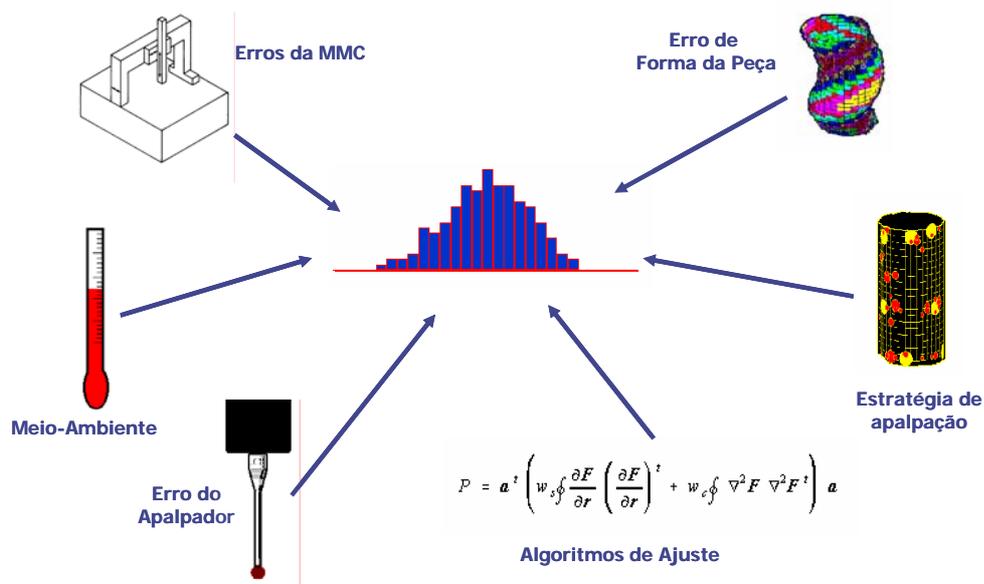


Figura 42 – O conceito do PUNDIT. Adaptado de [72].

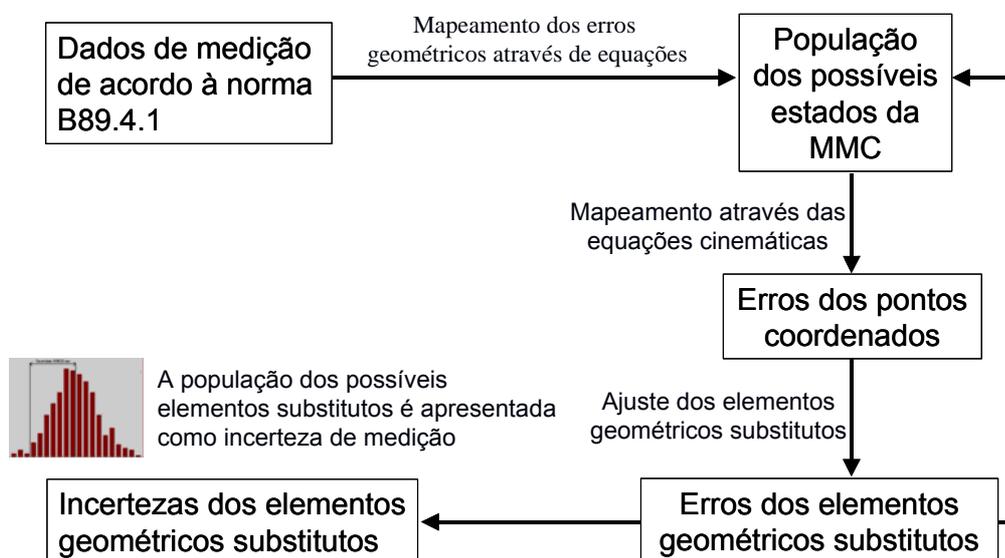


Figura 43 – Simulação por restrições do software PUNDIT. Adaptado de [72].

Este aplicativo apresenta uma vantagem em relação ao VCMM devido a contempla especificamente a interação entre o erro de forma e textura superficial da peça em relação à estratégia de medição. Além disso, não são necessários padrões específicos nem softwares dedicados, permitindo um custo de implementação

inferior. Porém, esta metodologia de simulação ainda apresenta o problema de estar baseado em uma grande quantidade de informação prévia ou de Tipo B, cuja tendência é superestimar incertezas. Como resultado, a aplicação desta metodologia não é totalmente apropriada no ambiente laboratorial, senão mais bem na área industrial e como ferramenta para seleção da MMC mais adequada para uma tarefa específica de medição.

### **3.3.2.3 Simulação por condições de contorno**

A simulação por condições de contorno é considerada pelos seus criadores como uma generalização da VCMM, descrita anteriormente. O conceito consiste em representar o estado paramétrico atual da máquina (o conjunto de erros paramétricos) como um ponto particular no espaço infinito de possíveis estados da MMC. Inicialmente, o ponto pode estar em qualquer posição, mas enquanto maior conhecimento da máquina é obtido a partir de testes específicos, menor é o espaço em que o ponto representando o estado atual da MMC pode estar localizado <sup>[5]</sup>. A informação a partir da qual são simulados os possíveis estados virtuais da MMC, são geralmente testes de performance como a ANSI-ASME B89.4.1 ou a ISO 10360-2.

Na prática, é realizada uma medição virtual da tarefa na qual é preciso avaliar incertezas (e.g. diâmetro de um cilindro). A medição virtual é avaliada utilizando a técnica de Monte Carlo. A partir dos pontos medidos virtualmente, é avaliado o estado paramétrico da MMC segundo o teste de performance escolhido (B89.4.1 ou a ISO 10360-2). Se o teste de performance virtual representa um estado possível da MMC, quando comparado com o teste de performance real já executado, os resultados são armazenados para análise futura. O procedimento é repetido até que várias centenas de estados virtuais são obtidas. Após a coleção de estados virtuais, os resultados são analisados estatisticamente segundo o GUM. Um modelo detalhado do procedimento de avaliação de incertezas através da técnica de Simulação por Condições de Contorno foi desenvolvida por Abbe et.al. <sup>[75]</sup> (Figura 44).

A seqüência complexa de operações a serem realizadas segundo o algoritmo proposto incrementa o risco de contabilizar mais de uma vez as fontes de erro no resultado de medição e, como conseqüência, fornecendo valores conservativos de incertezas, limitando seu uso aos laboratórios no chão de fábrica.

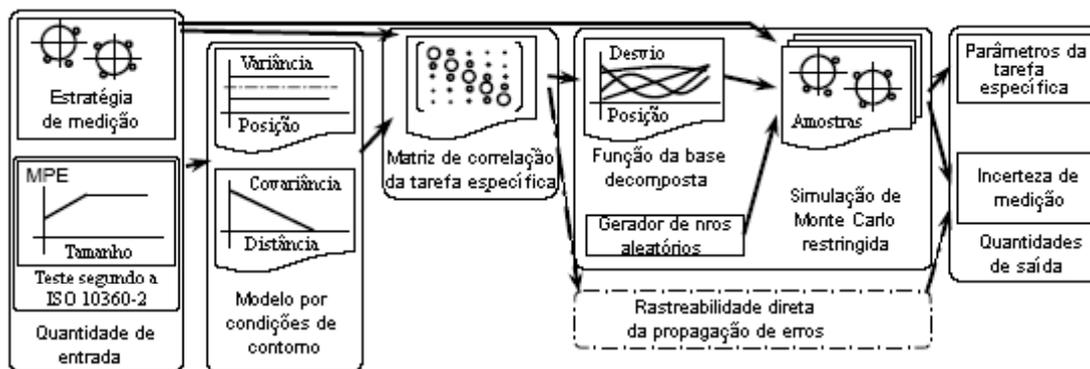


Figura 44 – Avaliação de incertezas em tarefas específicas através do conceito da Simulação por Condições de Contorno. Adaptado de <sup>[75]</sup>.

### 3.3.3 Avaliação por especialistas

As incertezas tipo B definidas no GUM tipicamente representam valores baseados na opinião de especialistas na área. Experiência na utilização da tecnologia de medição por coordenadas ou experiência acumulada na utilização de uma MMC em particular, combinadas com o *feedback* fornecido por múltiplas medições e testes de performance, podem fornecer ao especialista a informação necessária para avaliar de forma realista incertezas, utilizando estritamente o método tipo B.

Essa técnica foi utilizada durante décadas por metrologistas experientes para avaliar quantitativamente fontes particulares de incertezas ou grupos de incertezas, e até balanços de incertezas completos. Os metrologistas podiam estimar os efeitos dos erros paramétricos sem ajuda de modelos matemáticos complexos, devido ao conhecimento aprofundado do comportamento térmico e geométrico da MMC, os erros de Abbe e repetitividade, entre outros <sup>[5]</sup>.

Levando em conta o conhecimento dos especialistas, é possível melhorar e até simplificar a estimação de incertezas descrita no GUM, especificamente na medição por coordenadas, a partir da sistematização das experiências dos especialistas.

Estritamente falando, a opinião de um especialista não é outra coisa que conhecimento *a-priori* do processo de medição <sup>[69]</sup>. Esse tipo de conhecimento a priori é a base da estatística Bayesiana, a qual é a fundação primária do GUM. A estimação da incerteza devida ao operador, no exemplo apresentado na seção anterior, é um exemplo clássico de avaliação por especialistas.

O comitê técnico da ISO/TC 213 já está estudando a formalização da avaliação por especialistas na metrologia por coordenadas, no escopo da ISO/TS 15530. A Parte 5 desta norma, “Uso de Avaliação por Especialistas”, permitirá, quando for publicada, padronizar a metodologia e servir como referência para intercomparações em medições por coordenadas.

### **3.4 LIMITAÇÕES DOS MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS**

Todas as metodologias de calibração de peças padrão descritas anteriormente, apresentam uma série de vantagens e desvantagens que decorrem da abordagem empregada na medição e avaliação de incertezas. Do ponto de vista do laboratório de calibração, o qual fornece serviços metrológicos à indústria, duas variáveis fundamentais definem a adequabilidade de uma metodologia: quantidade de trabalho (tempo) e recursos necessários para aplicar a metodologia, e o nível de confiança em que a incerteza declarada garante a rastreabilidade da medição correspondente ao SI. Idealmente, a melhor metodologia de calibração seria aquela que forneça valores mínimos de incerteza dos resultados de medição, utilizando a menor quantidade de tempo e recursos. Porém, não existe na atualidade uma metodologia universalmente aceita que apresente essas características <sup>[6]</sup>.

Uma comparação entre as principais metodologias para calibração com MMC foi apresentada por Phillips et.al. <sup>[6]</sup>, utilizando como variáveis a distância relativa entre a medição a ser realizada e a própria calibração da MMC, e a quantidade de trabalho necessária para realizar a calibração. Nesse estudo, o autor conclui que a calibração direta (baseada fundamentalmente em resultados do teste de performance da MMC) pode ser realizada com relativamente pouco trabalho, porém a rastreabilidade dos resultados fica comprometida. No caso do método de substituição, embora muito trabalhoso, a rastreabilidade dos resultados permite estabelecer um elo direto entre medição e calibração na medição por coordenadas.

Uma análise objetiva da bibliografia existente relacionada às diferentes metodologias de avaliação de incertezas na medição por coordenadas permite estabelecer um quadro de comparação qualitativo, utilizando parâmetros comuns. Os parâmetros de comparação selecionados para esse fim foram:

1. Rastreabilidade: capacidade de demonstrar uma cadeia pela qual as medições são referenciadas ao SI, permitindo expressar a incerteza dessas medições em relação ao padrão internacional.
2. Compreensibilidade: capacidade de aprender e interpretar corretamente o procedimento de medição e avaliação de incertezas detalhado na metodologia analisada.
3. Custo: refere-se tanto aos recursos materiais e humanos necessários, como ao tempo total requerido para a calibração.
4. Versatilidade: capacidade da metodologia se adequar facilmente às necessidades de cada tarefa de medição específica.
5. Capacidade de detectar erros sistemáticos: quando a metodologia de calibração permite detectar, avaliar e eliminar, se possível, as fontes de incerteza sistemáticas atuantes na medição.
6. Capacidade de detectar erros aleatórios: quando os erros de natureza aleatória podem ser avaliados corretamente, seja a partir de um modelo de erro de Tipo A ou Tipo B.

Classificando as metodologias de avaliação de incertezas descritas neste capítulo e utilizando os parâmetros mencionados previamente, foi construída uma matriz de comparação como se apresenta na Tabela 8.

Tabela 8 - Matriz de comparação das diferentes metodologias de avaliação de incertezas em medições com MMC. Adaptado de <sup>[5][6][9][71][72][81]</sup>.

	Rastreabilidade	Compreensibilidade	Custo	Versatilidade	Detecta Erros Sistemáticos	Detecta Erros Aleatórios
Método dos coeficientes de sensibilidade (GUM)						
Simulação computacional						
Avaliação por especialistas						
Múltiplas Posições (ISO/DTS 15530-2)						

A análise da Tabela 8 permite concluir que não existe uma metodologia ótima de avaliação de incertezas em medições por coordenadas. Aquelas metodologias com melhores características de rastreabilidade tendem a ser relativamente menos

versáteis. Se a versatilidade é incrementada, os custos também aumentam proporcionalmente. Outra conclusão importante obtida a partir da análise da tabela reside em que o problema de detecção de erros sistemáticos está correlacionado com o custo da metodologia empregada. Entretanto, os erros de natureza aleatória são corretamente avaliados pela maioria dos métodos.

### 3.5 SÍNTESE

As principais aplicações das peças padrão na indústria foram apresentadas neste capítulo, com a finalidade de justificar o estudo aprofundado dos métodos de calibração. Assim, foram apresentadas as principais metodologias existentes para a calibração de peças padrão. Estas são: calibração por medição direta, calibração por substituição e calibração por rebatimento. Ainda, a metodologia que será uma norma internacional, a ISO/TS 15530-2, foi revisada, a partir da análise da sua versão *draft*. No caso da avaliação de incertezas na medição por coordenadas, foram descritos o método dos coeficientes de sensibilidade, a simulação computacional, e a avaliação por especialistas, conjuntamente com suas principais vantagens e desvantagens.

Todas as metodologias descritas estão em uso na atualidade, embora algumas delas sejam mais amplamente difundidas que outras. Especificamente, dentro da categoria de simulações computacionais, a VCMM tem uma presença maior no ambiente laboratorial. Porém, devido a seu alto custo e complexidade, esteja limitada a laboratórios de referência de alto nível. No caso de laboratórios de nível médio, a aplicação do Método dos Coeficientes de Sensibilidade (GUM) está muito difundida, devido principalmente a seu baixo custo e compreensibilidade.

A partir da avaliação da bibliografia existente, foi apresentada uma matriz de comparação qualitativa entre as metodologias descritas, utilizando parâmetros de comparação comuns, facilitando a interpretação dos pontos positivos e negativos de cada metodologia.

Finalmente, a correta definição do mensurando, a criação de procedimentos consistentes e apurados, o conhecimento aprofundado da tecnologia de medição por coordenadas e a aplicação das melhores características dos métodos de calibração existentes, constituirão os pilares do Método Híbrido, o qual será apresentado no próximo capítulo.

## 4 O MÉTODO HÍBRIDO: UMA PROPOSTA DE SOLUÇÃO

Hoje em dia, já não é discutida a necessidade de fornecer corretamente incertezas aos resultados de medição, mas a dificuldade existente para sua correta avaliação persiste. Esse problema é maior quanto maior for a complexidade do sistema e do processo de medição, como no caso das MMC. Nos capítulos anteriores, foram detalhadas a problemática, as técnicas e as metodologias existentes para resolver esse problema.

Neste capítulo será apresentada uma nova metodologia, denominada aqui de Método Híbrido, que permite criar procedimentos consistentes de medição e calibração de peças padrão. Isso inclui toda a informação necessária para a execução experimental da medição, distribuição dos pontos, ajuste de elementos geométricos e procedimento de apalpação, entre outros parâmetros. Assim sendo, a avaliação de incertezas terá uma correlação direta com a definição da tarefa de medição e a estratégia de medição selecionada para essa tarefa.

A idéia básica do Método Híbrido é combinar os melhores aspectos das principais metodologias já existentes para a calibração de peças padrão em MMC. De tal modo, as técnicas e procedimentos de medição mais adequados para cada tarefa de medição (substituição, rebatimento, múltiplas estratégias, etc) são inseridos num documento mestre chamado de Procedimento de Calibração, onde todas as informações relevantes ao processo de medição são detalhadas. O conteúdo do Procedimento de Calibração será multimídia, com texto, gráficos, fotos, vídeos e toda informação relevante à medição. Todas as informações contidas nesse documento mestre serão definidas a partir do conhecimento prévio dos métodos de calibração, das estratégias de apalpação, ajuste e amostragem, e do conhecimento aprofundado da definição do mensurando, extraído do desenho técnico da peça.

Para facilitar a inserção de toda essa informação no documento mestre, um recurso de Inteligência Artificial chamado de Raciocínio Baseado em Casos (RBCa) <sup>[88]</sup>, será implementado dentro de um software protótipo gerado para tal fim. Depois de executada a medição segundo o Procedimento de Calibração, as informações obtidas são utilizadas para a avaliação de incertezas, baseada na metodologia do GUM e modelada especificamente para cada grupo básico de mensurandos definidos no GPS.

Fundamentalmente, o princípio do Método Híbrido é baseado na idéia de que não é possível definir um único procedimento e um único modelo de avaliação de incertezas, para todos os possíveis mensurando tratados na medição por coordenadas. Assim, cada tarefa de medição é única e, portanto, um procedimento de medição e avaliação de incertezas único deverá ser definido <sup>[85],[86]</sup>. As vantagens desta abordagem residem na diminuição dos erros devidos a más definições das estratégias de medição, erros do operador e interpretação do mensurando. Além disso, procedimentos de calibração bem definidos permitem incrementar a confiança nos resultados, melhorar a rastreabilidade do processo de medição, diminuir incertezas e criar uma base de conhecimento reutilizável, muito útil no ambiente laboratorial. Os compromissos do método podem ser resumidos na necessidade de operadores qualificados, uma base de dados de procedimentos apropriada, e infraestrutura física adequada para sua implementação.

Este capítulo estará dividido em quatro partes:

1. Os três tipos diferentes de calibração de peças padrão, segundo as necessidades atuais da indústria.
2. A sistemática de criação de procedimentos detalhados de calibração de peças padrão, baseados nos três tipos de calibração já mencionados.
3. O método de avaliação de incertezas, baseado no GUM e de acordo ao procedimento de calibração definido no ponto anterior.
4. Finalmente, uma síntese do Método Híbrido será incluída, ressaltando os pontos fortes e os pontos fracos da metodologia.

## 4.1 OS TRÊS TIPOS DE CALIBRAÇÃO SEGUNDO AS NECESSIDADES DA INDÚSTRIA

A aplicação final da peça padrão fundamentará a utilização de uma estratégia de medição em particular. A definição do mensurando varia para cada aplicação, embora a mesma peça seja utilizada como padrão. Diferenciar cada aplicação é de grande importância, já que de sua definição dependerá a metodologia de calibração. Mesmo assim, se o procedimento utilizado for o apropriado para àquela tarefa específica, um mesmo modelo de avaliação de incertezas pode ser utilizado, cuidando de considerar e avaliar corretamente todas as fontes de incerteza atuando na medição.

### 4.1.1 Tipo 1: Calibração por Pontos

Neste tipo de calibração, aplicações especiais são definidas geralmente pelo cliente ou pelo fornecedor de um sistema de medição dedicado, o qual precisa de valores de referência fornecidos por uma ou várias peças padrão. Assim, os valores de referência da peça padrão, calibrada através de uma MMC, servirão como parâmetros de *setup* ou zeragem no sistema de medição dedicado. Dessa forma, a Calibração por Pontos de peças padrão visa suprir a demanda por verificação e zeragem de dispositivos de medição, aplicação já apresentada no capítulo anterior.

Um bom exemplo de peça padrão, projetada para a zeragem periódica de um sistema de medição dedicado, é aquela previamente apresentada na Figura 27. Esse padrão foi desenvolvido pelo fabricante de dispositivos de medição MARPOSS. O sistema de medição utiliza trinta transdutores de medição de tipo indutivo, montados num sistema apropriado, permitindo a avaliação de dezessete características geométricas e dimensionais. As dezessete características medidas não coincidem necessariamente com aquelas especificadas no desenho técnico da peça, embora sua avaliação permita obter informação sobre o estado da peça e do processo de fabricação.

O procedimento de calibração dessas peças padrão deverá estar de acordo com a especificação dos pontos de controle, apresentada na Figura 45. O apalpador da MMC deverá apresentar uma ponta com tamanho e forma similares às dos transdutores indutivos, e deverá apalpar os mesmos pontos de contato. A avaliação

matemática da medição dentro do software da MMC deverá refletir a análise utilizada no sistema dedicado, o qual utiliza os resultados obtidos por diferentes transdutores de medição, combinando-os adequadamente para achar os valores das características geométricas e dimensionais da peça. Além disso, a fixação da peça deverá ser respeitada, imitando a disposição utilizada na medição no dispositivo.

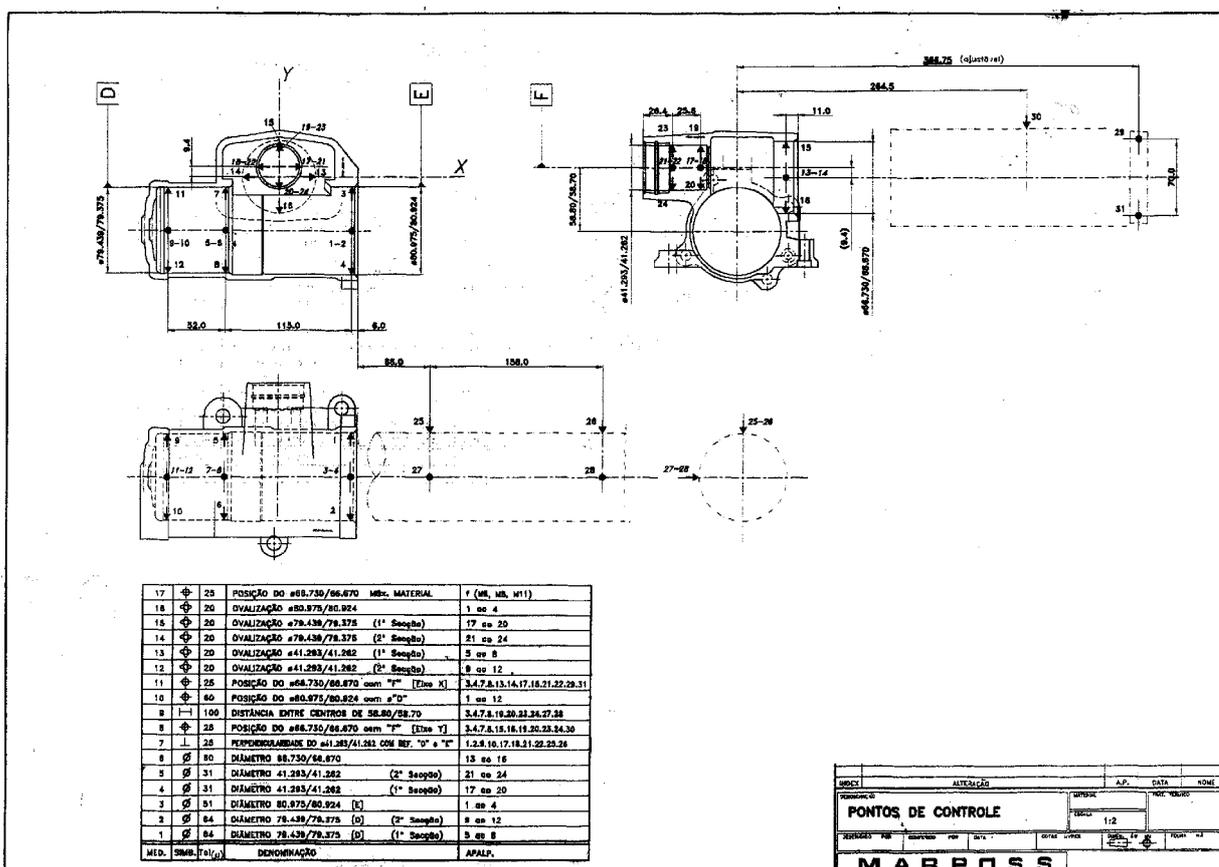


Figura 45 – Pontos de controle usados num sistema de medição por transdutores indutivos. Cortesia WHB Usinagem.

#### 4.1.2 Tipo 2: Calibração por Características

Quando é preciso avaliar incertezas em medições por coordenadas realizadas na produção, peças padrão podem ser utilizadas como medidas materializadas, fornecendo rastreabilidade direta a partir do princípio de substituição. Na Calibração por Características, uma ou várias peças são obtidas da linha de produção, com o intuito de calibrar numa MMC as suas principais características geométricas e dimensionais. A definição do mensurando para este tipo de calibração é obtida do desenho técnico da peça, que servirá como documento mestre para o desenvolvimento dos procedimentos de medição específicos para cada

característica selecionada. Assim, a Calibração por Características visa suprir a demanda por avaliação de incertezas em MMC, outra das aplicações das peças padrão apresentadas no capítulo prévio.

Um exemplo de peça padrão, utilizada para avaliação de incertezas nas medições por coordenadas é apresentado na Figura 46. A peça é um bloco de compressor de refrigeração, cuja inspeção é realizada no chão de fábrica utilizando uma MMC DEA Mistral <sup>[87]</sup>. Foram selecionadas aleatoriamente três peças da linha de produção e quatro características geométricas foram calibradas numa MMC de maior exatidão. Os valores obtidos da calibração foram utilizados como referência para a avaliação de incertezas segundo a ISO/TS 15530-3.

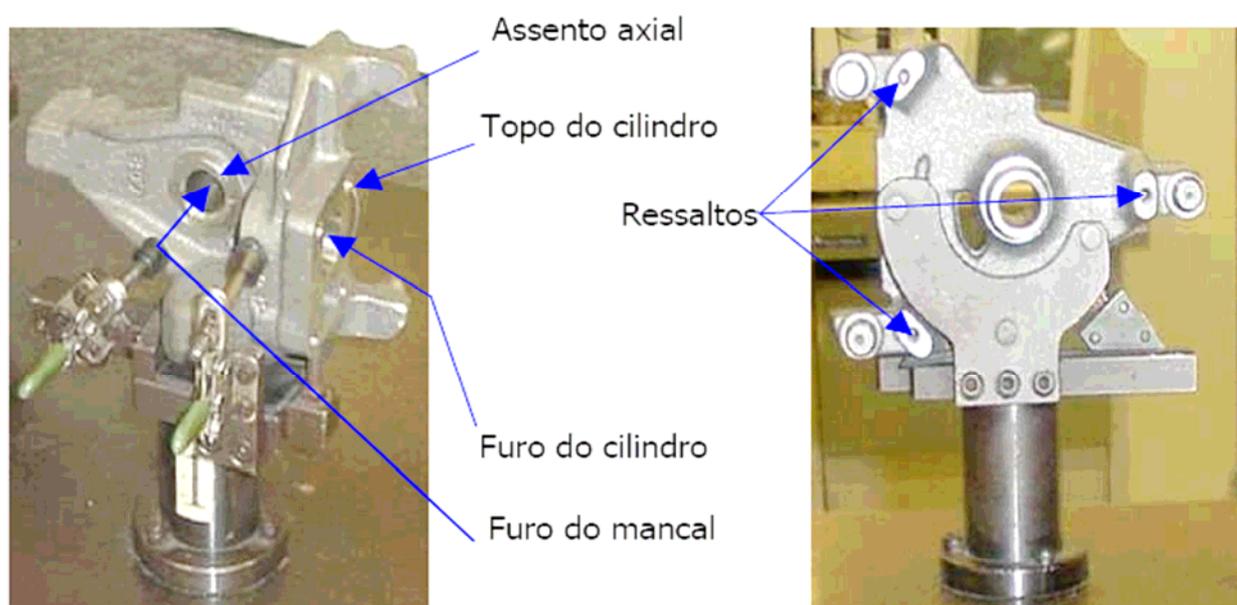


Figura 46 – Bloco de compressor para refrigeração, utilizado como padrão na avaliação de incertezas segundo a Norma ISO/TS 15530-3. Adaptado de <sup>[87]</sup>.

O procedimento de calibração dessas peças padrão deverá estar de acordo com a definição do mensurando, interpretado a partir das especificações técnicas da peça. As cotas a serem calibradas deverão ser selecionadas objetivamente, analisando os requerimentos de qualidade do cliente final do produto manufaturado. Cada cota deverá ser avaliada com um procedimento de medição detalhado, cujo objetivo será determinar o valor do mensurando do ponto de vista funcional da peça. As normas GPS (ou GD&T se for o caso) deverão ser corretamente interpretadas e, no caso de incongruências ou discrepâncias, uma análise conjunta entre o cliente e o fornecedor do serviço de calibração deverá ser realizada.

A Calibração por Características apresenta desafios técnicos e metrológicos amplamente discutidos nos capítulos anteriores. Portanto, a sistemática que será apresentada na próxima seção estará focada em resolver essa problemática, permitindo ser aplicada em situações de menor complexidade.

#### **4.1.3 Tipo 3: Calibração por Condição**

Na Calibração por Condição, características específicas da peça padrão são avaliadas a fim de servir como referência em estudos de estabilidade. Nesse caso, características de robustez e estabilidade térmica e dimensional das peças são muito desejadas. Peças obtidas diretamente da linha de produção podem ser adequadas ao uso em monitoramento de MMC, quando as condições laboratoriais de conservação e medição sejam apropriadas.

Se a aplicação principal da peça padrão calibrada por Condição for avaliar a estabilidade da MMC ao longo do tempo, o procedimento de calibração pode ser aplicado utilizando a mesma máquina que será monitorada. Assim sendo, a Calibração por Condição de peças de produção visa suprir a demanda por monitoramento contínuo de MMC, o último grande grupo de aplicações das peças padrão discutido no capítulo anterior.

Embora na atualidade esteja muito difundida a idéia do uso de padrões especiais (placas de furos, tetraedros, blocos padrão, etc) para o monitoramento de MMC segundo a ISO 10360-2, a aplicação de peças calibradas apresenta diversas vantagens:

- Rápida adaptação no ambiente de medição, devido à familiaridade da peça pelos operadores da MMC.
- Procedimentos de medição e programas CNC já desenvolvidos, facilitam a implementação da política de checagem diária ou *interim-check* da MMC.
- Economia para o usuário, que não precisa comprar padrões adicionais para estudar o comportamento da sua MMC ao longo do tempo.

## 4.2 SISTEMÁTICA PARA A CRIAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE CALIBRAÇÃO EM MMC

### 4.2.1 O Procedimento de Calibração

A base para o desenvolvimento consistente do processo de calibração de peças padrão é a criação de um documento mestre, aqui chamado de Procedimento de Calibração, que contém o detalhe de todas as informações relevantes à medição. Quanto maior for a quantidade e a qualidade da informação inserida no documento mestre, menores serão as chances de introduzir erros sistemáticos na medição. Todo o conhecimento colocado no documento poderá ser reutilizado, permitindo a otimização progressiva das calibrações realizadas no laboratório. A redução do erro do operador e sua relação com a estratégia de medição são uma consequência direta de procedimentos de medição bem elaborados. Desse modo, o conhecimento da tecnologia de medição por coordenadas e a definição do mensurando permitirão ao operador desenvolver estratégias de calibração orientadas à função, segundo o tipo de calibração (Tipo 1, Tipo 2 ou Tipo 3).

O conteúdo do Procedimento de Calibração deverá fornecer as informações requeridas na Tabela 9 e na Tabela 10. Cada característica a ser medida deverá preencher um único Procedimento de Calibração. Se for o caso de uma peça padrão com vinte diferentes cotas a serem calibradas, vinte Procedimentos individuais deverão ser preenchidos. Nesse caso, informações repetidas podem ser compartilhadas por diferentes características, permitindo a reutilização da informação.

Tabela 9 – Conteúdos mínimos recomendados do Procedimento de Calibração (1)

<p><b>Dados do cliente</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Data de solicitação</li> <li>• Contratante</li> <li>• Solicitante</li> <li>• Nome da peça padrão</li> <li>• Número de série da peça padrão</li> <li>• Desenho técnico/modelo CAD</li> <li>• Ordem interna</li> <li>• Incerteza requerida</li> <li>• Descrição do requisito do cliente</li> </ul>	<p><b>Dados do laboratório de calibração</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nome do laboratório</li> <li>• Credenciamento INMETRO</li> <li>• Número de ordem interna</li> <li>• MMC usada na calibração</li> <li>• Registro interno da MMC</li> <li>• Rastreabilidade da MMC</li> <li>• Condições ambientais durante a medição</li> <li>• Data da medição</li> <li>• Operador e Revisor</li> </ul>
--------------------------------	---	--	---

Tabela 10 – Conteúdos mínimos recomendados do Procedimento de Calibração (2)

<b>Análise da tarefa de medição</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificação da tolerância medida e análise da característica e dos datums</li> <li>• Identificação dos elementos físicos a serem medidos ou referências físicas na peça.</li> <li>• Desenho técnico da peça detalhando a especificação a ser medida</li> <li>• Foto da peça ou modelo CAD</li> </ul>	<b>Fixação da peça</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de fixação escolhida (do cliente, modular, etc)</li> <li>• Cuidado da peça (limpeza, manuseio, etc)</li> <li>• Foto da fixação</li> <li>• Esquema de montagem</li> </ul>
<b>Posição da peça na MMC</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quantidade de posições escolhidas para a medição</li> <li>• Fotos da peça nas diferentes posições de medição</li> </ul>	<b>Qualificação do apalpador</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Procedimento de qualificação utilizado.</li> <li>• Padrões para qualificação.</li> </ul>
<b>Tipo de Apalpador</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Configuração do apalpador</li> <li>• Tipo e tamanho dos elementos do apalpador (ponta e haste)</li> <li>• Foto ou esquema da configuração do apalpador</li> </ul>	<b>Padrões adicionais</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Análise da necessidade de padrões para medição por substituição</li> <li>• Padrões escolhidos e informação da calibração</li> <li>• Análise do princípio de medição do padrão</li> </ul>
<b>Erro do apalpador (10360-5)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erro de forma da ponta</li> <li>• Erro de diâmetro da ponta</li> <li>• Erro de posição da esfera padrão</li> </ul>	<b>Medição por Scanning</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recomendações</li> <li>• Parâmetros de scanning utilizados (velocidade de medição, força de medição, passo, modo forma conhecida ou desconhecida)</li> </ul>
<b>Parâmetros CNC e condições ambientais</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidade de apalpação, força de medição, aproximação do apalpador.</li> <li>• Temperatura da peça, MMC e padrões durante a medição.</li> </ul>	<b>Datums</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de elemento geométrico, número de pontos, tipo de ajuste, distribuição dos pontos.</li> <li>• Fotos ou esquemas os elementos geométricos usados como datums</li> </ul>
<b>Elementos medidos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de elemento</li> <li>• Número de pontos</li> <li>• Distribuição</li> <li>• Ajuste e Filtragem</li> <li>• Fotos ou esquemas dos elementos e distribuição aproximada dos pontos</li> </ul>	<b>Programa CNC</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Criação e armazenamento digital do programa CNC</li> <li>• Teste do programa incluindo check-list</li> <li>• Número de ciclos (repetições)</li> <li>• Programa completo e tempo de medição</li> </ul>
<b>Avaliação dos resultados</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Análise do relatório de medição</li> <li>• Recompilação dos resultados</li> <li>• Avaliação de incertezas</li> </ul>	<b>Documentação</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Registro de ocorrências (diário de bordo)</li> <li>• Registro na base de dados de procedimentos</li> <li>• Recomendações de otimização</li> <li>• Reaproveitamento de informações</li> </ul>

#### **4.2.2 Inteligência Artificial: aplicação do Raciocínio Baseado em Casos na criação de procedimentos de calibração**

Na prática, desenvolver procedimentos de medição com o grau de detalhe apresentado na seção anterior é problemático. A quantidade de conhecimento e informações requeridas dificulta o trabalho do executor da calibração. Embora o princípio do Método Híbrido especifique a necessidade por um tratamento particular de cada tarefa de medição, na vida real, muitas situações apresentam semelhanças ou igualdades. Essas similaridades entre diferentes situações podem ser aproveitadas, de forma de economizar tempo de planejamento e otimizar a execução da calibração. Atualmente, quando o operador de uma MMC enfrenta a tarefa de planejar e executar uma medição, sua inteligência orienta seu raciocínio na procura de situações problemáticas parecidas, já resolvidas no passado. Assim, o operador analisa mentalmente a situação atual e intenta adaptar uma solução a partir do seu conhecimento prévio.

A situação descrita previamente é conhecida na área da Inteligência Artificial (IA) como raciocínio baseado em casos (RBCa). O RBCa é uma técnica que encontra soluções para um novo problema a partir de soluções correspondentes a problemas semelhantes já resolvidos, ou seja, emprega raciocínio baseado em analogia <sup>[88]</sup>. Geralmente esta técnica é adotada na ausência de uma formulação geral para a solução, mas necessita de disponibilidade de informações sobre eventos passados.

Na técnica de RBCa a base de casos (BC) é criada para armazenar o conhecimento de eventos passados, sendo que o usuário tem acesso a ela e pode modificá-la, retirando ou adicionando conhecimento quando julgar relevante. Quando um novo problema ocorre, busca-se na BC similaridades com os casos já armazenados e, quando essas são encontradas, a solução do evento obtido como resultado da busca é usada para solucionar o problema atual (Figura 47).

Inicialmente o usuário tem que armazenar casos já conhecidos e devidamente avaliados na base de casos (BC) para garantir um conhecimento inicial ao programa e permitir que o mesmo entre em funcionamento. A avaliação nesta etapa é muito importante para conferir a esta BC um conhecimento seguro e robusto. No caso da

criação de procedimentos de medição, a avaliação pode ser realizada por um engenheiro metrologista, com experiência na metrologia por coordenadas <sup>[89]</sup>.

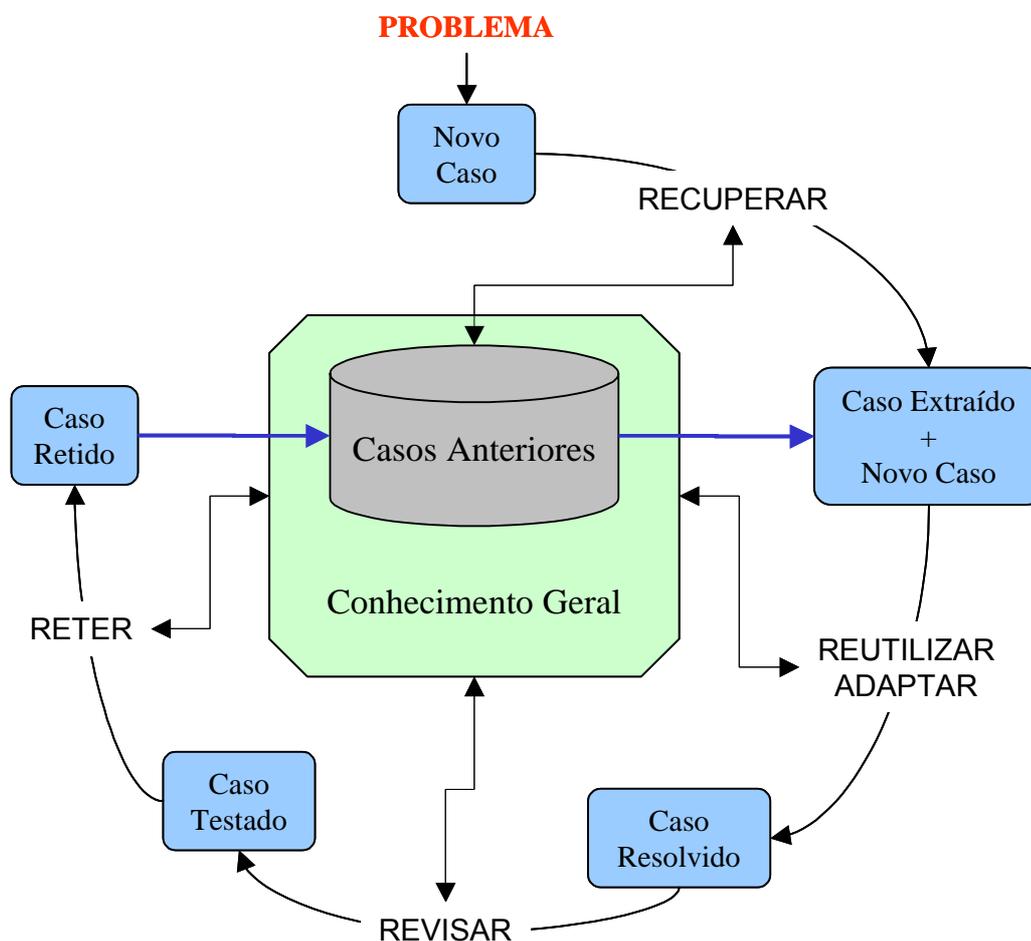


Figura 47 – Ciclo de funcionamento do Raciocínio Baseado em Casos (RBCa). Adaptado de <sup>[90]</sup>.

Com a ocorrência de um novo problema irá fazer-se uma avaliação da situação para formalizá-la e permitir que possa se realizar a recuperação do caso. Na recuperação ocorre a comunicação direta com a BC em busca das ligações e similaridades, obtendo com isso o caso ou os casos que mais se aproximam do problema. Esta busca de casos semelhantes é baseada em índices que descrevem as características relevantes do problema, tanto nos casos armazenados quanto nos novos casos a serem analisados. Os índices devem traduzir as circunstâncias para o vocabulário do usuário de forma mais genérica possível. Para um exemplo de aplicação a um problema de diagnóstico médico, os índices poderiam ser os sintomas relevantes e dados históricos do paciente <sup>[90]</sup>.

Se na etapa de busca o sistema encontra um caso idêntico ao problema em estudo, irá se propor a mesma solução. Entretanto, caso venham a existir diferenças entre o caso em estudo e o recuperado, pode ser necessário adaptar-se a solução do caso recuperado à nova situação. Após uma crítica e avaliação da solução proposta, o novo caso pode vir a ser armazenado ou não no banco de casos. Na segunda opção o armazenamento do caso é importante para que se previna a repetição do mesmo erro no futuro <sup>[88]</sup>.

O RBCa tem a vantagem de utilizar o conhecimento específico dos casos e apresenta uma abordagem incremental, sustentada pelo aprendizado, desde que uma nova experiência pode ser armazenada a cada vez que um caso diferente dos já existentes tenha sido resolvido, tornando-o imediatamente disponível para a solução de problemas futuros. Além disso, a difícil fase de extração do conhecimento especialista é facilitada nos sistemas de RBCa, pois pode ser realizada com o preenchimento direto dos fatos que descrevem um caso. O RBCa proporciona um excelente mecanismo de aprendizagem, que pode ser utilizado para aquisição automática de conhecimento. Assim, é possível construir uma memória corporativa e compartilhar experiências entre pessoas <sup>[91]</sup>.

A aplicação do RBCa é realizada através algoritmos de seleção, dos quais o mais utilizado é o *Nearest Neighbor Algorithm* (NNA) ou algoritmo do vizinho mais próximo <sup>[91],[92]</sup>. O NNA apresenta as vantagens de fácil programação, adaptabilidade e simplicidade, justificando assim o seu uso neste trabalho.

O NNA é baseado no cálculo de distâncias entre pontos num espaço multidimensional, reduzindo-se ao Teorema de Pitágoras quando o número de dimensões é igual a dois. A melhor forma de explicar o funcionamento do algoritmo é através de um exemplo prático. Considere-se o problema de escolher a compra de um produto qualquer considerando dois parâmetros: preço e qualidade. Esses parâmetros, chamados de índices em RBCa, precisam ser quantificados numa escala apropriada para o algoritmo NNA poder funcionar. Escolhendo uma escala de 1 até 10 para cada índice, é possível estabelecer o valor de 1 para a pior qualidade e o menor preço e o valor de 10 para a melhor qualidade e o maior preço. Assim, é possível classificar diversos produtos dentro desse espaço bidimensional. O objetivo é achar aquele produto que mais se aproxime da condição ideal, neste caso, o menor preço e a maior qualidade. Essa situação é apresentada graficamente na

Figura 48, considerando quatro produtos diferentes. É fácil perceber a partir da análise do gráfico, que o Produto 4 é aquele que mais se aproxima da condição ideal.

Matematicamente, é preciso avaliar o valor numérico das distâncias entre o valor alvo e cada produto e dividi-las pela maior distância entre dois pontos qualquer dentro da área definida pelos índices. Essas razões numéricas fornecem valores quantitativos da proximidade de cada produto em relação ao alvo. Considerando o valor complemento de cada razão, isto é o valor 1 menos a razão, chegamos a um parâmetro que indica o grau de concordância entre uma possível solução e o valor ideal. O raciocínio anterior pode ser mais bem explicado através das equações que regem o algoritmo. Sejam X e Y dois pontos num espaço de N dimensões:

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_N) ; Y = (y_1, y_2, \dots, y_N). \quad (1)$$

A distância euclidiana entre eles é dada por:

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \quad (2)$$

Portanto, a distância entre um ponto qualquer P e o valor alvo é dada por:

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - Alvo_i)^2} \quad (3)$$

A maior distância entre dois pontos contidos nesse espaço n-dimensional é:

$$D_{\max} = \sqrt{\sum_{i=1}^N [\max(n_i) - \min(n_i)]^2} \quad (4)$$

Assim, a concordância para o ponto P é dada por:

$$\text{Concordância} = C = \frac{D_{\max} - D}{D_{\max}} = 1 - \frac{D}{D_{\max}} \quad (5)$$

Quanto menor for a distância D entre o valor atual e valor alvo, maior será o grau de concordância achado para uma solução. A concordância é o melhor estimador do grau de semelhança achado para uma solução.

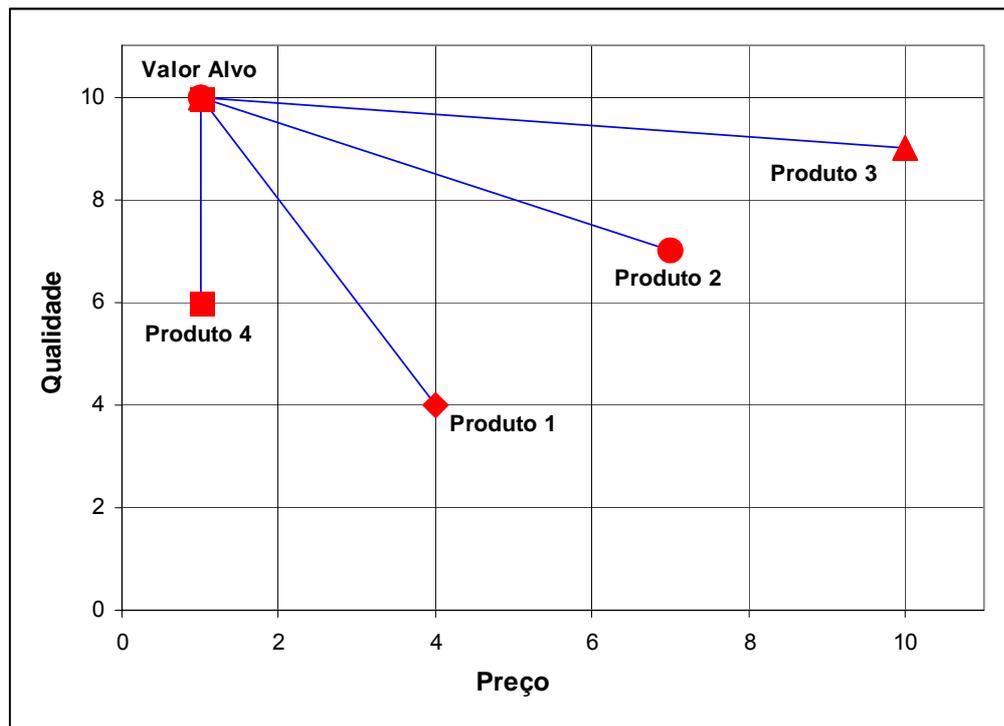


Figura 48 – Relação preço-qualidade de diversos produtos em relação ao produto alvo ideal.

Para permitir a aplicação do algoritmo NNA na criação de procedimentos de calibração de peças padrão, foram definidos oito diferentes índices de classificação:

1. Máquina a ser usada na calibração
2. Tipo de fixação a ser utilizada
3. Número de posições da peça
4. Tipo de apalpador
5. Tipo de calibração
6. Padrões adicionais a serem utilizados
7. Tipo de características GPS
8. Número de ciclos (repetições) da medição.

A seleção dos índices reflete a necessidade por melhor representar a situação prévia à calibração da peça padrão no ambiente laboratorial. O operador tem à sua disposição uma quantidade de informação limitada das características da peça, sua aplicação final e os sistemas de medição disponíveis dentro do laboratório. No entanto, a pré-seleção dos índices foi baseada nas diferentes bibliografias citadas

nos capítulos anteriores. Mais especificamente, informações importantes foram obtidas de Bosch <sup>[14]</sup>, Flack <sup>[94][95]</sup>, Humienny <sup>[34]</sup>, Weckenmann <sup>[21]</sup>, Noronha <sup>[67]</sup>, Nielsen <sup>[40][45][46]</sup> e Henklein <sup>[90]</sup>. De qualquer forma, a seleção dos índices nem sempre obedece a regras puramente sistemáticas. Outros especialistas no assunto podem sugerir a adição de mais alguns índices ou remover outros. Assim, a eficiência do algoritmo NNA dependerá também do conteúdo da BC e a experiência do operador.

Cada índice apresenta níveis discretos que são susceptíveis a uma quantificação linear. Os diferentes níveis para cada índice dependem da situação particular do laboratório de calibração no qual será utilizada a sistemática. Por tal motivo, os níveis utilizados serão detalhados no próximo capítulo, quando o estudo de caso na Fundação CERTI for apresentado. Nesse estudo de caso, o retorno do sistema facilitará a seleção da melhor solução armazenada na BC, ao apresentar todos os casos ordenados em ordem decrescente pelo seu grau de concordância em relação ao caso atual.

Finalmente, quando uma calibração for realizada numa peça em particular e o Procedimento de Calibração for corretamente estabelecido, os níveis específicos selecionados para cada índice poderão ser armazenados na BC, permitindo a sua posterior recuperação em futuras calibrações.

### **4.2.3 Gestão do processo**

Do ponto de vista metodológico, é preciso estabelecer o escopo de aplicação do Método Híbrido para calibração de peças padrão em MMC. Inicialmente, a capacidade do laboratório de calibração deve ser bem estabelecida, para assim assegurar a rastreabilidade das medições realizadas. O cliente deverá fornecer todas as informações necessárias para uma correta execução da calibração, incluindo o desenho técnico da peça, características específicas a calibrar, uso final da peça padrão, incerteza requerida e dispositivos de fixação, quando for o caso. O laboratório encaminhará o pedido do cliente aos responsáveis da execução da calibração, os quais avaliarão todas as informações obtidas. Após a análise das informações, será realizado o planejamento da calibração para cada cota, utilizando como base o Procedimento de Calibração Mestre. Esse documento mestre é recuperado e adaptado a partir de uma base de dados de procedimentos, utilizando

como ajuda um software com os algoritmos de IA já programados (MasterPart). Na etapa inicial, quando a BC encontra-se vazia, o Procedimento Mestre é apresentado como um formulário contendo campos que deverão ser preenchidos pelo especialista responsável pela calibração.

Finalizada a execução da calibração e a avaliação de incertezas para cada cota, é realizada a documentação completa do processo, que inclui os relatórios de medição, os Procedimentos de Calibração e o certificado de calibração da peça. Nesse momento, as informações poderão ser armazenados na BC do sistema RBCa, para uso futuro do laboratório. Finalmente, o cliente receberá a peça calibrada e o certificado de calibração correspondente. No caso de reclamações, poderá ser feita uma reavaliação do processo numa reunião conjunta entre os responsáveis da calibração e o usuário final da peça padrão.

As ações mais importantes relacionadas ao processo de calibração foram resumidas na forma de um fluxograma, como apresentado na Figura 49 e na Figura 50.

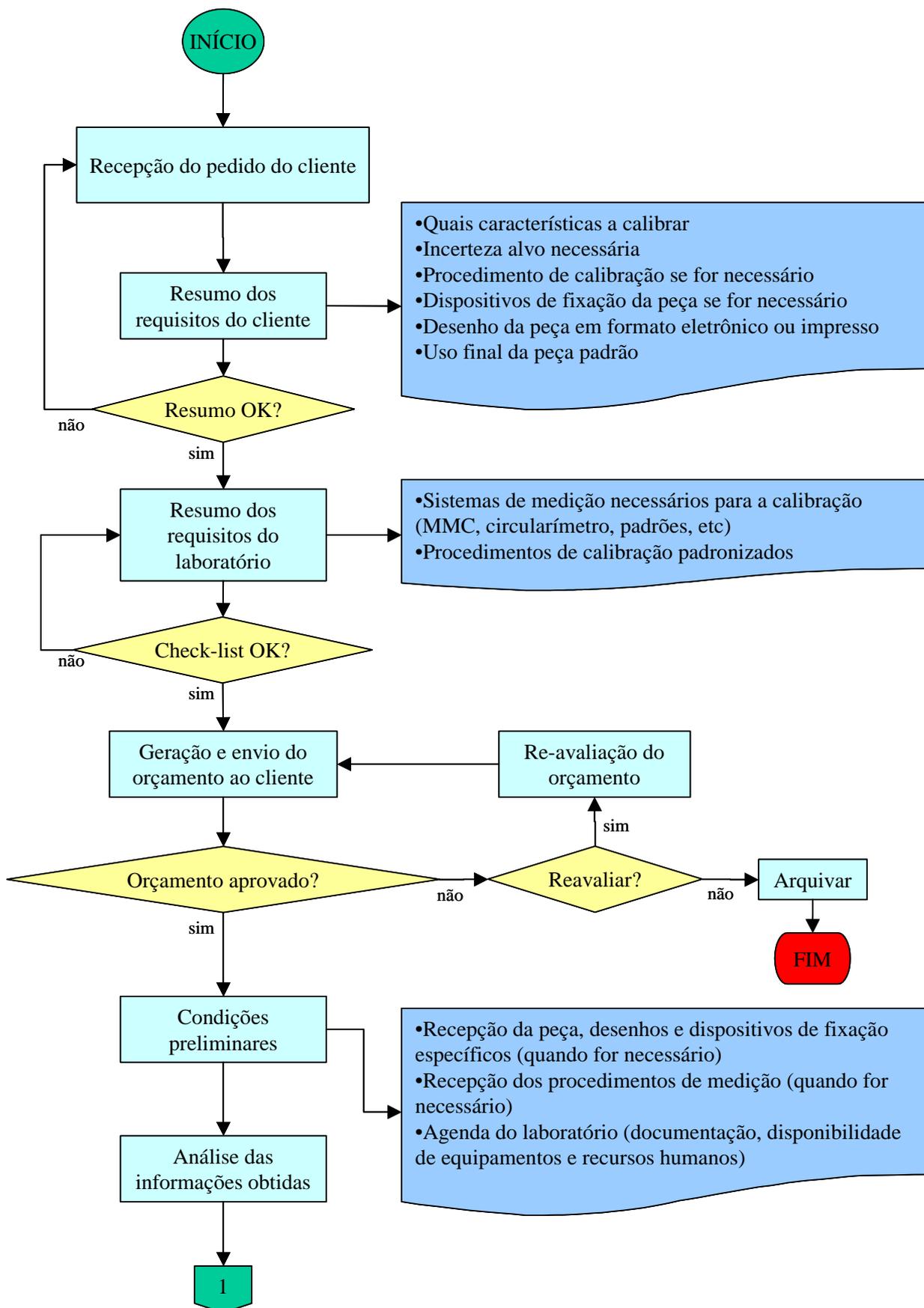


Figura 49 – Fluxograma do processo de calibração de peças padrão pelo Método Híbrido.

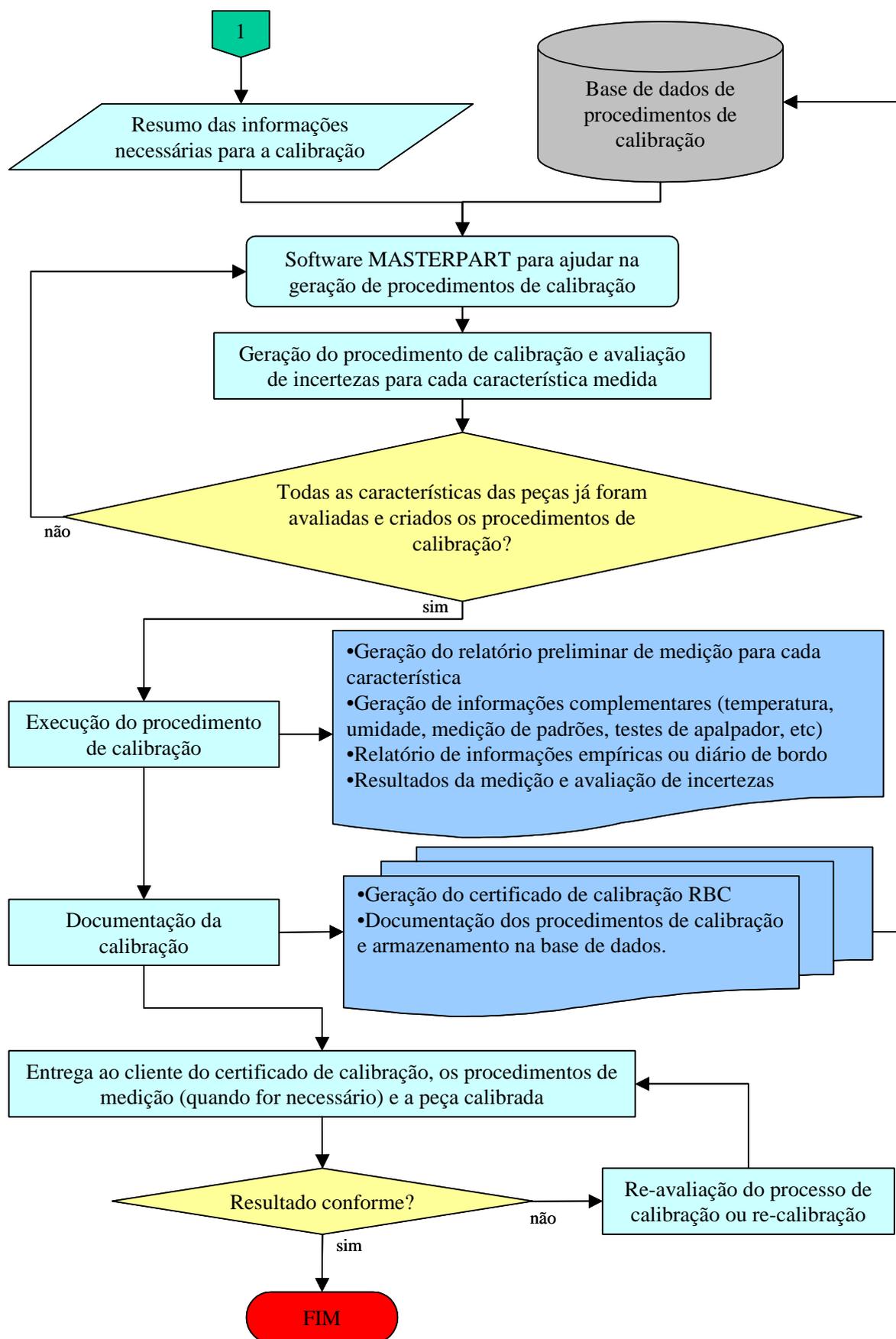


Figura 50 – Fluxograma do processo de calibração de peças padrão pelo Método Híbrido (continuação).

### 4.3 METODOLOGIA GERAL PARA AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS PELO MÉTODO HÍBRIDO

Quando o Procedimento de Calibração for corretamente preenchido, a medição poderá ser executada. As informações contidas no Procedimento Mestre e os resultados obtidos após a execução da calibração permitirão a realização da avaliação de incertezas para cada cota medida.

A metodologia de avaliação de incertezas proposta está baseada inteiramente no GUM. Isto quer dizer que todas as hipóteses decorrentes do Guia serão mantidas, incluindo a hipótese de erros sistemáticos corrigidos. No caso da metrologia por coordenadas, essa hipótese implica que os erros sistemáticos decorrentes dos chamados 21 erros paramétricos da MMC são corrigidos, seja pela aplicação de CAA ou por métodos práticos como substituição ou rebatimento. Naqueles casos em que a utilização de CAA ou alguns dos métodos práticos de correção não forem aplicados, devido a problemas de índole prática ou econômica, é recomendado o uso da metodologia de múltiplas posições da peça na MMC (ISO/DTS 15530-2). Assim, os erros sistemáticos podem ser parcialmente aleatorizados e inseridos no balanço de incertezas como quantidades Tipo A.

O modelo geral proposto apresenta seis fontes principais de incertezas atuantes na medição: Repetitividade, MMC, Apalpador, Peça, Temperatura e Correção por Substituição. Essas fontes de incertezas são avaliadas através de um modelo aditivo simples (Tabela 11).

Porém, cada uma das fontes de incerteza é avaliada diferentemente, dependendo da definição do mensurando e a informação disponível durante a calibração. A influência da MMC pode ser avaliada através da calibração por substituição, rebatimento ou a partir da informação encontrada nos testes de desempenho ou calibração da MMC (ISO 10360-2, ANSI-ASME B89.4.1). No caso do apalpador, os erros podem ser avaliados através da aplicação do teste especificado na norma ISO 10360-5. A influência da temperatura deve ser avaliada utilizando o modelo matemático de expansão térmica da peça, o padrão de comprimento (se houver) e as escalas da MMC. Nesse caso, é preciso conhecer os coeficientes de expansão térmica e as temperaturas médias medidas durante o transcurso da medição. Quando for utilizado o método de calibração por substituição

para tamanhos, o modelo matemático da correção deve aplicar-se, avaliando a incerteza decorrente da aplicação do método. No caso do erro da peça, sua avaliação pode ser feita através de testes *in-situ* na peça ou utilizando informação prévia do processo de fabricação ou medições anteriores. De qualquer forma, sua influência pode ser minimizada através de estratégias de alta densidade de pontos e ajuste orientado à aplicação. Finalmente, a repetitividade da MMC é avaliada através de medições repetidas da característica a ser calibrada, incluindo as referências (quando houver).

Tabela 11 – As equações gerais do Método Híbrido de avaliação de incertezas.

<b>Resultado da Medição = <math>Y \pm U</math> ; <math>Y</math> = Valor estimado do mensurando ; <math>U</math> = Incerteza de medição</b>						
<b><math>U = K_{95\%} \cdot u_c</math></b>						
$Y = S_1 \cdot X_1 + S_2 \cdot X_2 + S_3 \cdot X_3 + S_4 \cdot X_4 + S_5 \cdot X_5 + S_6 \cdot X_6$ ; Equação de medição.						
$X_{1...6}$ : As seis fontes de incerteza consideradas no modelo geral de medição medição.						
$S_{1...6}$ : Os parâmetros de sensibilidade específicos para cada fonte de incerteza.						
<b><math>X_1</math></b>	<b><math>X_2</math></b>	<b><math>X_3</math></b>	<b><math>X_4</math></b>	<b><math>X_5</math></b>	<b><math>X_6</math></b>	
Repetitividade	MMC	Apalpador	Peça	Temperaturas (peça, escalas e padrão)	Correção por substituição	
$u_c = [S_1 \cdot u(X_1)^2 + S_2 \cdot u(X_2)^2 + S_3 \cdot u(X_3)^2 + S_4 \cdot u(X_4)^2 + S_5 \cdot u(X_5)^2 + S_6 \cdot u(X_6)^2]^{1/2}$						
$v_{1,2,3,4,5,6}$ = Graus de liberdade das fonte de incertezas						
$V_{eff} = u_c^4 / [u(X_1)^4 / v_1 + u(X_2)^4 / v_2 + u(X_3)^4 / v_3 + u(X_4)^4 / v_4 + u(X_5)^4 / v_5 + u(X_6)^4 / v_6]$						
Fator de Abrangência	V (graus de liberdade)	1	3	5	10	$\infty$
	$K_{95,45\%}$	13,97	3,31	2,65	2,28	2

Para os fins deste trabalho, seis grandes grupos diferentes de mensurandos são considerados: tamanho, forma, orientação, localização, batimento e perfis de linha e superfície. Assim, cada grupo apresenta um método de avaliação diferente, embora dentro do escopo do modelo de avaliação geral.

A chave do método aqui apresentado decorre dos chamados parâmetros de sensibilidade da medição. Esses parâmetros refletem o fato de que algumas fontes de erro podem influenciar ou não a medição, dependendo do mensurando que está sendo avaliado. Esta idéia foi inspirada por um trabalho prévio de Salisbury<sup>[9]</sup>. Assim, os parâmetros podem tomar o valor de zero quando a fonte de erro específica não influencia significativamente na medição de um mensurando em particular, e toma o valor de um quando sua influência é significativa. Portanto, cada um dos seis grandes grupos de características apresentará um conjunto de parâmetros de sensibilidade diferentes, como se apresenta na Tabela 12.

Tabela 12 – Coeficientes de sensibilidade das seis fontes de incerteza, classificados segundo o mensurando e o tipo de calibração. Adaptado de <sup>[9]</sup>.

	Tipo de Calibração	Repetitividade	MMC	Apalpador	Peça	Temperatura	Correção por substituição
<b>Tamanho</b>	Tipos 1, 3	1	1	1	1	1	0
	Tipo 2	1	0	1	1	1	1
<b>Forma</b>	Tipos 1, 3	1	0	1	0	0	0
	Tipo 2.	1	1	1	0	0	0
<b>Orientação</b>	Tipos 1, 2, 3	1	0	1	0	0	0
<b>Localização</b>	Tipos 1, 2, 3 (posição, simetria)	1	1	1	1	1	0
	Tipo 1, 2, 3 (coaxialidade concentricid.)	1	0	1	0	0	0
<b>Batimento</b>	Tipos 1, 3	1	0	1	0	0	0
	Tipo 2	1	1	1	1	0	0
<b>Perfil</b>	Tipos 1, 3	1	0	1	0	0	0
	Tipo 2	1	1	1	1	1	0

Um exemplo bem conhecido é o caso de medição de forma em condições de temperatura estáveis, porém fora do valor padronizado de 20° C. Nesse caso, temperaturas sistematicamente diferentes do valor de referência não influenciarão significativamente a medição, devido ao fato de que, em geral, as características de forma não dependem da temperatura.

As vantagens dessa abordagem são a simplificação do modelo geral de avaliação, eliminação de fontes de incertezas não significativas e redução dos valores de incerteza achados, quando comparados com modelos de medição que não diferenciam entre mensurandos. Uma desvantagem decorre da necessidade de operadores qualificados, que diferenciem as fontes de incerteza e seu grau de influência numa determinada medição. Porém, essa desvantagem é reduzida quando uma sistemática adequada for introduzida. Deste modo, nas próximas seções serão detalhados os modelos de avaliação de incertezas para cada um dos seis grupos de características, incluindo todas as equações necessárias para analisar quantitativamente a incerteza da medição. A definição das principais variáveis a serem utilizadas nas equações para avaliação de incertezas é apresentada na Tabela 13.

Tabela 13 – Definição dos parâmetros fundamentais utilizados nas equações do Método Híbrido.

$T_{p,e,s}$ : Temperaturas da peça, escalas e padrão de comprimento, respectivamente.
$T_0$ : Temperatura de referência (ISO 1) = 20 °C.
$\alpha_{p,e,s}$ : Coeficientes de expansão térmica da peça, escalas e padrão de comprimento, respectivamente.
$\bar{L}_m$ : Valor médio da característica medida, obtido a partir de $n$ repetições da medição.
$\bar{L}_s$ : Valor médio do padrão medido por substituição.
$L_n$ : Valor nominal do padrão usado na substituição.
$L_C$ : Comprimento calibrado do padrão usado na substituição.
$A + K \cdot L/1000$ : Equação obtida do certificado de calibração da MMC, referida ao erro médio máximo expandido em 95%. A = Parcela de incerteza constante [ $\mu\text{m}$ ]. K = Parcela de incerteza proporcional ao comprimento medido [ $\mu\text{m}$ ]. L = comprimento medido [mm].
$M_{L,S,F}$ : Erros máximos na troca de apalpador, na medição de comprimento e na medição de forma, achados no teste do apalpador, segundo a norma ISO 10360-5.
$\bar{L}_m(0^\circ)$ : Valor médio da característica medida sem rebater (Valor medido em graus). $\bar{L}_m(180^\circ)$ : Valor médio da característica medida rebatida 180° (Valor medido em graus). Nota: para simplificar a execução da calibração, um único tipo de medição por rebatimento será aplicado especificamente para medições de orientação.
$\bar{E}f_{medido}$ : Erro de forma do padrão de forma medido (esfera padrão, anel padrão)
$Ef_{calibrado}$ : Erro de forma calibrado do padrão de forma (esfera padrão, anel padrão)
$r$ : Distância entre os elementos de referência ( <i>datums</i> ) e o elemento especificado.

#### 4.3.1 Avaliação de incertezas para características de tamanho

As características de tamanho são, do ponto de vista da metrologia por coordenadas, as de maior importância. Nesse grupo encontram-se tamanhos externos e internos, degraus e distâncias entre elementos geométricos.

Devido a sua natureza, as características de tamanho são muito sensíveis a temperaturas não uniformes e, portanto, especial cuidado deve-se tomar em relação às condições ambientais durante a medição. Como consequência, as equações apresentadas para o modelo de avaliação de incertezas apresentam correção por expansão térmica tanto da peça como das escalas da MMC. Além disso, é importante lembrar que a avaliação deve ser realizada do ponto de vista funcional do elemento medido. Assim, a recomendação geral é a utilização de alta quantidade de pontos medidos e ajuste de elementos por Tchebycheff, quando for necessário.

Dessa forma, a influência da peça na medição pode ser convenientemente reduzida até chegar a ponto de ser não significativa, quando a estratégia de medição apropriada for utilizada. No caso de tolerâncias apertadas, a utilização de medição por substituição deve ser aplicada para assegurar a eliminação de erros sistemáticos na medição.

Como regra geral, a repetitividade da MMC é avaliada por medições repetidas da característica avaliada, realizadas dentro de um período relativamente curto de tempo. A avaliação desse parâmetro é de grande importância, pois funciona como um indicador de possíveis problemas relativos à medição. O valor médio das medições da característica de tamanho é o melhor estimador do mensurando, mas precisa ser corrigido pelo efeito da temperatura. As equações para este tipo de característica são resumidas na Tabela 14.

Tabela 14 – Resumo das equações para avaliação de incertezas e os parâmetros de sensibilidade específicos das características de tamanho.

Elemento Especificado	Tipo de Calibração	Repetitividade	MMC	Apalpador	Peça	Temperatura	Correção por substituição
Elementos de Tamanho: -Tamanho Externo -Tamanho Interno -Step (Degrau) -Distância	Tipo 1 e Tipo 3	$S_1 = 1$	$S_2 = 1$	$S_3 = 1$	$S_4 = 1$	$S_5 = 1$	$S_6 = 0$
		$X_1$ $u(X_1)$ $v_1$	$X_2$ $u(X_2)$ $v_2$	$X_3$ $u(X_3)$ $v_3$	$X_4$ $u(X_4)$ $v_4$	$X_5$ $u(X_5)$ $v_5$	$X_6$ $u(X_6)$ $v_6$
	Tipo 2	$S_1 = 1$	$S_2 = 0$	$S_3 = 1$	$S_4 = 0$	$S_5 = 1$	$S_6 = 1$
		$X_1$ $u(X_1)$ $v_1$	$X_2$ $u(X_2)$ $v_2$	$X_3$ $u(X_3)$ $v_3$	$X_4$ $u(X_4)$ $v_4$	$X_5$ $u(X_5)$ $v_5$	$X_6$ $u(X_6)$ $v_6$
$X_1 = \frac{\bar{L}_m}{1 + \alpha_p \cdot (T_p - T_0) - \alpha_e \cdot (T_e - T_0)} ; X_2 = 0 ; X_3 = 0 ; X_4 = 0 ; X_5 = 0 ;$ $X_6 = L_n \cdot \left[ 1 - \frac{\bar{L}_s}{[1 + \alpha_s \cdot (T_s - T_0) - \alpha_e \cdot (T_e - T_0)] \cdot L_c} \right]$							
$u(X_1) = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L}_m)^2}{n-1}} / \sqrt{n}}{1 + \alpha_p \cdot (T_p - T_0) - \alpha_e \cdot (T_e - T_0)} ; u(X_2) = \frac{A + K \cdot \frac{L}{1000}}{2} ; u(X_3) = \frac{M_L + M_s}{\sqrt{3}} ;$ $u(X_4) = 0 ; u(X_5) = 0 ; u(X_6) = \frac{L_n \cdot u(L_s)}{[1 + \alpha_s \cdot (T_s - T_0) - \alpha_e \cdot (T_e - T_0)] \cdot L_c}$							

#### 4.3.2 Avaliação de incertezas para características de forma

Características de forma podem ser convenientemente avaliadas em MMC, quando a estratégia de medição for corretamente planejada. Nesse caso, a

utilização de *scanning* é fundamental para a aquisição rápida de uma alta densidade de pontos. Porém, o uso dessa ferramenta introduz erros na medição. A avaliação do erro do apalpador pode ser convenientemente quantificado através da execução do teste especificado na norma ISO 10360. O tamanho da superfície a ser avaliada é um parâmetro a ser levado em conta, já que permite considerar quando a influência dos erros geométricos da MMC começa a ser significativa. Por esse motivo, superfícies maiores que o 30% do eixo maior da MMC devem ser medidas comparando com objetos de referência calibrados (anéis padrão, esfera padrão, etc). A diferença entre o valor do erro de forma achado na medição do padrão e seu valor calibrado é um bom estimador do erro da MMC. Além disso, a natureza do mensurando implica numa influência não significativa da temperatura e da peça no resultado de medição.

As equações para este tipo de característica são resumidas na Tabela 15.

Tabela 15 - Resumo das equações para avaliação de incertezas e os parâmetros de sensibilidade específicos das características de forma.

Elemento Especificado	Tipo de Calibração	Repetitividade	MMC	Apalpador	Peça	Temperatura	Correção por substituição
Características de orma: -Retitude -Circularidade -Planeza -Cilindricidade	Tipo 2	$S_1 = 1$	$S_2 = 1$	$S_3 = 1$	$S_4 = 0$	$S_5 = 0$	$S_6 = 0$
		$X_1$ $u(X_1)$ $v_1$	$X_2$ $u(X_2)$ $v_2$	$X_3$ $u(X_3)$ $v_3$	$X_4$ $u(X_4)$ $v_4$	$X_5$ $u(X_5)$ $v_5$	$X_6$ $u(X_6)$ $v_6$
	Tipo 1 e Tipo 3	$S_1 = 1$	$S_2 = 0$	$S_3 = 1$	$S_4 = 0$	$S_5 = 0$	$S_6 = 0$
		$X_1$ $u(X_1)$ $v_1$	$X_2$ $u(X_2)$ $v_2$	$X_3$ $u(X_3)$ $v_3$	$X_4$ $u(X_4)$ $v_4$	$X_5$ $u(X_5)$ $v_5$	$X_6$ $u(X_6)$ $v_6$
$X_1 = \bar{L}_m$ ; $X_2 = 0$ ; $X_3 = 0$ ; $X_4 = 0$ ; $X_5 = 0$ ; $X_6 = 0$							
$u(X_1) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L}_m)^2}{n-1}} / \sqrt{n}$ $u(X_2) = \frac{(\bar{E}f_{medido} - Ef_{calibrado})}{\sqrt{3}}$ $u(X_3) = \frac{M_F}{\sqrt{3}}$ $u(X_4) = 0$ ; $u(X_5) = 0$ ; $u(X_6) = 0$							

#### 4.3.3 Avaliação de incertezas para características de orientação

Características de orientação podem ser corretamente medidas em MMC utilizando rebatimento. Nesse caso, no mínimo duas posições da peça serão necessárias para a medição. Porém, superfícies relativamente pequenas não são influenciadas por erros sistemáticos residuais, simplificando a execução a uma única

posição. Por tal motivo, é conveniente realizar testes orientados à aplicação, como por exemplo, a medição de perpendicularidade num esquadro padrão.

Neste grupo de características encontram-se perpendicularidade, paralelismo e angularidade, todas as quais não são influenciadas pela temperatura. Além disso, quando a estratégia de medição for apropriada, a influência da peça pode também ser considerada não significativa.

As equações para este tipo de característica são resumidas na Tabela 16.

Tabela 16 - Resumo das equações para avaliação de incertezas e os parâmetros de sensibilidade específicos das características de orientação.

Elemento Especificado	Tipo de Calibração	Repetitividade	MMC	Apalpador	Peça	Temperatura	Correção por substituição
Características de orientação: -Paralelismo -Perpendicul. -Angularidade	Tipo 1 e Tipo 2	$S_1 = 1$	$S_2 = 0$	$S_3 = 1$	$S_4 = 0$	$S_5 = 0$	$S_6 = 0$
	Tipo 3	$X_1$ $u(X_1)$ $v_1$	$X_2$ $u(X_2)$ $v_2$	$X_3$ $u(X_3)$ $v_3$	$X_4$ $u(X_4)$ $v_4$	$X_5$ $u(X_5)$ $v_5$	$X_6$ $u(X_6)$ $v_6$
$X_1 = \frac{ \bar{L}_m(0^\circ) - \bar{L}_m(180^\circ) }{2}; X_2 = 0; X_3 = 0; X_4 = 0; X_5 = 0; X_6 = 0$							
$u(X_1) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L}_m)^2}{n-1}} / \sqrt{n}; u(X_2) = 0; u(X_3) = \frac{M_L + M_F}{\sqrt{3}}; u(X_4) = 0; u(X_5) = 0; u(X_6) = 0$							

#### 4.3.4 Avaliação de incertezas para características de localização

Características de localização são as mais complexas de ser avaliadas e, portanto, susceptíveis de maiores erros na medição. Devido à necessidade de estabelecer relações com elementos de referência (*datums*), quanto maior for a distância entre o elemento especificado e suas referências, maior será a influência de erros sistemáticos residuais e da temperatura. Uma componente particularmente difícil de avaliar quantitativamente é a influência do erro de forma e rugosidade da peça combinado com a estratégia particular de medição. Porém, essa componente pode ser minimizada quando estratégias com alta densidade de pontos e algoritmos de ajuste orientados à função forem utilizados. No entanto, alta densidade de pontos pode ser um problema do ponto de vista prático-econômico. Assim, uma possível abordagem ao problema é o uso de simulação computacional. É possível desenvolver algoritmos relativamente simples que ajudam a quantificar a influência

da estratégia de medição quando aplicada numa peça em particular. Além disso, é possível avaliar essa influência quando a estratégia de baixa densidade de pontos é repetida várias vezes, mudando a posição relativa dos pontos entre ciclos de medição, como é sugerido na norma ISO/DTS 15530/2.

As equações para este tipo de característica são resumidas na Tabela 17.

Tabela 17 - Resumo das equações para avaliação de incertezas e os parâmetros de sensibilidade específicos das características de localização.

Elemento Especificado	Tipo de Calibração	Repetitividade	MMC	Apalpador	Peça	Temperatura	Correção por substituição
<b>Características de localização:</b> -Posição -Simetria	<b>Tipo 1 e Tipo 2 e Tipo 3</b>	<b>S<sub>1</sub> = 1</b>	<b>S<sub>2</sub> = 1</b>	<b>S<sub>3</sub> = 1</b>	<b>S<sub>4</sub> = 1</b>	<b>S<sub>5</sub> = 1</b>	<b>S<sub>6</sub> = 0</b>
		X <sub>1</sub> u(X <sub>1</sub> ) v <sub>1</sub>	X <sub>2</sub> u(X <sub>2</sub> ) v <sub>2</sub>	X <sub>3</sub> u(X <sub>3</sub> ) v <sub>3</sub>	X <sub>4</sub> u(X <sub>4</sub> ) v <sub>4</sub>	X <sub>5</sub> u(X <sub>5</sub> ) v <sub>5</sub>	X <sub>6</sub> u(X <sub>6</sub> ) v <sub>6</sub>
<b>S<sub>1</sub> = 1</b>		<b>S<sub>2</sub> = 0</b>	<b>S<sub>3</sub> = 1</b>	<b>S<sub>4</sub> = 0</b>	<b>S<sub>5</sub> = 0</b>	<b>S<sub>6</sub> = 0</b>	
X <sub>1</sub> u(X <sub>1</sub> ) v <sub>1</sub>		X <sub>2</sub> u(X <sub>2</sub> ) v <sub>2</sub>	X <sub>3</sub> u(X <sub>3</sub> ) v <sub>3</sub>	X <sub>4</sub> u(X <sub>4</sub> ) v <sub>4</sub>	X <sub>5</sub> u(X <sub>5</sub> ) v <sub>5</sub>	X <sub>6</sub> u(X <sub>6</sub> ) v <sub>6</sub>	
<b>Características de localização:</b> -Coaxialidade -Concentricid.							
$X_1 = \bar{L}_m ; X_2 = 0 ; X_3 = 0 ; X_4 = 0 ; X_5 = 0 ; X_6 = 0$							
$u(X_1) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L}_m)^2}{n-1}} / \sqrt{n} ; u(X_2) = \frac{A + K \cdot \frac{L}{1000}}{2} ; u(X_3) = \frac{M_L + M_S + M_F}{\sqrt{3}} ; u(X_4) = 0 ;$ $u(X_5) = \frac{ r \cdot T_0 \cdot (\alpha_e - \alpha_p) + r \cdot (\alpha_p \cdot T_p - \alpha_e T_e) }{\sqrt{3}} ; u(X_6) = 0$							

#### 4.3.5 Avaliação de incertezas para características de batimento

Características de batimento podem ser consideradas como características de forma avaliadas em relação a *datums*. Portanto, os mesmos problemas apresentados para as características de localização devem ser considerados. Mesmo assim, devido à natureza da relação dos elementos medidos em relação aos elementos de referência, a influência dos erros sistemáticos não corrigidos pode ser negligenciada quando o tamanho relativo dos diâmetros for pequeno em relação ao volume de medição da MMC. Além disso, estratégias com altas densidades de pontos permitem considerar a influência do erro de forma da peça como não significativo em relação com as demais fontes de incertezas.

Devido à simetria cilíndrica implícita nas características de batimento, o uso de um quinto eixo ou mesa rotativa, quando estiver disponível, pode simplificar e melhorar a performance geral da medição, se comparada com medição ponto-a-ponto.

As equações para este tipo de característica são resumidas na Tabela 18.

Tabela 18 - Resumo das equações para avaliação de incertezas e os parâmetros de sensibilidade específicos das características de localização.

Elemento Especificado	Tipo de Calibração	Repetitividade	MMC	Apalpador	Peça	Temperatura	Correção por substituição
Características de batimento: -Radial -Axial -Em qualquer direção.	Tipo 2	$S_1 = 1$	$S_2 = 1$	$S_3 = 1$	$S_4 = 1$	$S_5 = 0$	$S_6 = 0$
		$X_1$ $u(X_1)$ $v_1$	$X_2$ $u(X_2)$ $v_2$	$X_3$ $u(X_3)$ $v_3$	$X_4$ $u(X_4)$ $v_4$	$X_5$ $u(X_5)$ $v_5$	$X_6$ $u(X_6)$ $v_6$
	Tipo 1 e Tipo 3	$S_1 = 1$	$S_2 = 0$	$S_3 = 1$	$S_4 = 0$	$S_5 = 0$	$S_6 = 0$
		$X_1$ $u(X_1)$ $v_1$	$X_2$ $u(X_2)$ $v_2$	$X_3$ $u(X_3)$ $v_3$	$X_4$ $u(X_4)$ $v_4$	$X_5$ $u(X_5)$ $v_5$	$X_6$ $u(X_6)$ $v_6$
$X_1 = \bar{L}_m$ ; $X_2 = 0$ ; $X_3 = 0$ ; $X_4 = 0$ ; $X_5 = 0$ ; $X_6 = 0$							
$u(X_1) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L}_m)^2}{n-1}} / \sqrt{n}$ $; u(X_2) = \frac{A + K \cdot \frac{L}{1000}}{2}$ $; u(X_3) = \frac{M_L + M_S + M_F}{\sqrt{3}}$ $; u(X_4) = 0 ; u(X_5) = 0$ $; u(X_6) = 0$							

#### 4.3.6 Avaliação de incertezas para características de perfil de linha e superfície

Características de perfil de linhas e superfícies só podem ser avaliadas na prática utilizando uma MMC, quando o desenho da peça em formato eletrônico (CAD 3D) estiver disponível. Além disso, é preciso que o aplicativo permita a medição e avaliação de elementos geométricos baseados em CAD. No caso de perfis com relação a *datums*, erros sistemáticos não corrigidos podem influenciar grandemente a medição, além de variações na temperatura. No caso de perfis sem relação a *datums*, a avaliação reduz-se a uma medição de forma restrita ao perfil referido no CAD da peça. Medição por Substituição é possível, quando padrões de forma similar à peça estiverem disponíveis <sup>[93]</sup>. Porém, só será necessário quando não exista correção numérica do tipo CAA.

As equações para este tipo de característica são resumidas na Tabela 19.

Tabela 19 - Resumo das equações para avaliação de incertezas e os parâmetros de sensibilidade específicos das características de localização.

Elemento Especificado	Tipo de Calibração	Repetitividade	MMC	Apalpador	Peça	Temperatura	Correção por substituição
Características de perfil de linha e superfície:	Tipo 2	$S_1 = 1$	$S_2 = 1$	$S_3 = 1$	$S_4 = 1$	$S_5 = 1$	$S_6 = 0$
		$X_1$ $u(X_1)$ $v_1$	$X_2$ $u(X_2)$ $v_2$	$X_3$ $u(X_3)$ $v_3$	$X_4$ $u(X_4)$ $v_4$	$X_5$ $u(X_5)$ $v_5$	$X_6$ $u(X_6)$ $v_6$
-Com relação a datums -Sem relação a datums	Tipo 1 e Tipo 3	$S_1 = 1$	$S_2 = 0$	$S_3 = 1$	$S_4 = 0$	$S_5 = 0$	$S_6 = 0$
		$X_1$ $u(X_1)$ $v_1$	$X_2$ $u(X_2)$ $v_2$	$X_3$ $u(X_3)$ $v_3$	$X_4$ $u(X_4)$ $v_4$	$X_5$ $u(X_5)$ $v_5$	$X_6$ $u(X_6)$ $v_6$
$X_1 = \bar{L}_m$ ; $X_2 = 0$ ; $X_3 = 0$ ; $X_4 = 0$ ; $X_5 = 0$ ; $X_6 = 0$							
$u(X_1) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L}_m)^2}{n-1}} / \sqrt{n}$ ; $u(X_2) = \frac{A + K \cdot \frac{L}{1000}}{2}$ ; $u(X_3) = \frac{M_L + M_S + M_F}{\sqrt{3}}$ ; $u(X_4) = 0$ ; $u(X_5) = \frac{ r \cdot T_0 \cdot (\alpha_e - \alpha_p) - r \cdot (\alpha_p \cdot T_p - \alpha_e T_e) }{\sqrt{3}}$ ; $u(X_6) = 0$							

#### 4.4 BIBLIOGRAFIAS, NORMAS E RECOMENDAÇÕES

As principais normas, artigos, dissertações e livros que auxiliam no desenvolvimento de procedimentos consistentes de medição e avaliação de incertezas em MMC, são apresentadas na Tabela 20.

O objetivo dessa tabela é facilitar ao leitor a busca de informações importantes relacionadas à calibração de peças padrão. Embora outras bibliografias possam ser encontradas, aqui estão resumidas as principais referências sobre o tema abordado.

A classificação foi realizada em quatro grandes grupos de conhecimento: tecnologia de medição por coordenadas, avaliação de incertezas em MMC, estratégias e métodos de medição em MMC e especificação geométrica de produto (GPS e GD&T).

Tabela 20 – Resumo das principais referências relacionadas à calibração de peças padrão.

	<b>Tecnologia de MMC</b>	<b>Avaliação de Incerteza em MMC</b>	<b>Estratégias e Métodos de Medição em MMC</b>	<b>GPS e GD&amp;T</b>
<b>Livros Manuais Dissertações</b>	Bosch [14]; Schmidt [50] Flack [94][95]	Oliveira [87]; Bosch [14]	Flack [27]; Moore [37]; Smith [54]; Yau [55]; Cross [96][97]	Humienny [34]; Griffith [51]
<b>Artigos Científicos</b>	Sartori [20]; Weckenmann [21]	Wilhelm [5]; Phillips [6] [68]; Salsbury [9]; Trapet [10] [59]; Van Dorp [12]; Weckenmann [18]; Morse [61]; Noronha [67]; Yan [77][78][79]; Savio [93]	Hocken [7]; Evans [23]; Weckenmann [32] [63]; Edgeworth [36]; Chan [44]; Trapet [81]; Starczak [86]	Bennich [13]; Nielsen [40][45][46]; Durkabasa [48]
<b>Normas</b>	ISO 10360 [15][73][99][100][101][102]; ASME B89.4.1[74]	ISO 15530-3 [8]; ISO/DTS 15530-2 [84]; ISO-GUM [11]; ISO/Dguide 9998 [76]; ISO 14253 [58][98]; ISO 17450-2 [62]	VDI/VDE 2617 Blatt 2.2 [22]; ISO 8015 [33]; VDI/VDE 2631 Blatt 9 [103]	ISO 1 [25]; ISO 1101 [35]; ISO 14368 [47]; ISO 14660 [49]; ASME Y14.5M [29]

## 4.5 SÍNTESE

Neste capítulo foi apresentada uma metodologia para calibração de peças padrão em MMC, incluindo o desenvolvimento de procedimentos de medição e avaliação de incertezas. Essa metodologia, aqui chamada Método Híbrido, foi desenvolvida tomando como base material bibliográfico de qualidade reconhecida. No entanto, como toda sistemática, é somente uma visão simplificada da realidade, sendo esta muito mais complexa e detalhada. Assim, é possível que algumas das suposições feitas no decorrer do trabalho sejam inadmissíveis sob o ponto de vista prático, econômico ou científico. Em particular, a praticidade da metodologia e sua adaptação às condições laboratoriais de serviços metrológicos precisam ser comprovadas. No próximo capítulo será mostrada a implementação da metodologia na calibração de uma carcaça de direção, dentro do escopo de serviços de medição oferecidos pelo Laboratório de Medição por Coordenadas da Fundação CERTI.

## **5 ESTUDO DE CASO: IMPLEMENTAÇÃO INFORMATIZADA DA METODOLOGIA NA FUNDAÇÃO CERTI**

A aplicação dos conceitos elaborados nos capítulos anteriores ocorreu na Fundação CERTI, instituição sem fins lucrativos dedicada à pesquisa e desenvolvimento tecnológico. A implementação foi realizada no Laboratório de Medição por Coordenadas, unidade que pertence Centro de Metrologia Instrumentação (CMI). O Laboratório de Medição por Coordenadas presta diversos serviços, incluindo medição de peças e ferramental, calibração de padrões e dispositivos, digitalização de peças para engenharia reversa, calibração de máquinas de medir por coordenadas, elaboração de programas de medição personalizados, assessoria e treinamento. O laboratório apresenta sistema de climatização, atendendo aos requisitos da norma VDI/VDE Classe II, com insuflamento de ar frio pelo piso:  $(20,0 \pm 0,3)$  °C. O credenciamento na Rede Brasileira de Calibração (RBC) na área dimensional vem sendo atendido do ano 1993. Detalhes do laboratório são ilustrados na Figura 51.

Atualmente, o laboratório realiza serviços de calibração de peças padrão para a indústria, de acordo a procedimentos internos desenvolvidos por uma equipe técnica de engenheiros e técnicos com treinamento especializado. No entanto, devido à complexidade da problemática e especialmente no que se diz à avaliação de incertezas, foi apresentado o presente trabalho com o intuito de melhorar a capacidade de atender às necessidades dos clientes.

A metodologia foi aplicada numa única peça do mercado automotivo, para confirmar que os resultados de medição são consistentes. Mesmo assim, foi realizada uma comparação utilizando outras duas metodologias: procedimento da Fundação CERTI acreditado pela RBC e simulação computacional utilizando o

software PUNDIT<sup>®</sup>. A primeira dessas metodologias é a utilizada atualmente no Laboratório de Medição por Coordenadas do CMI; a segunda consiste em avaliação de incertezas via simulação, utilizando um software desenvolvido nos Estados Unidos pela empresa MetroSage.

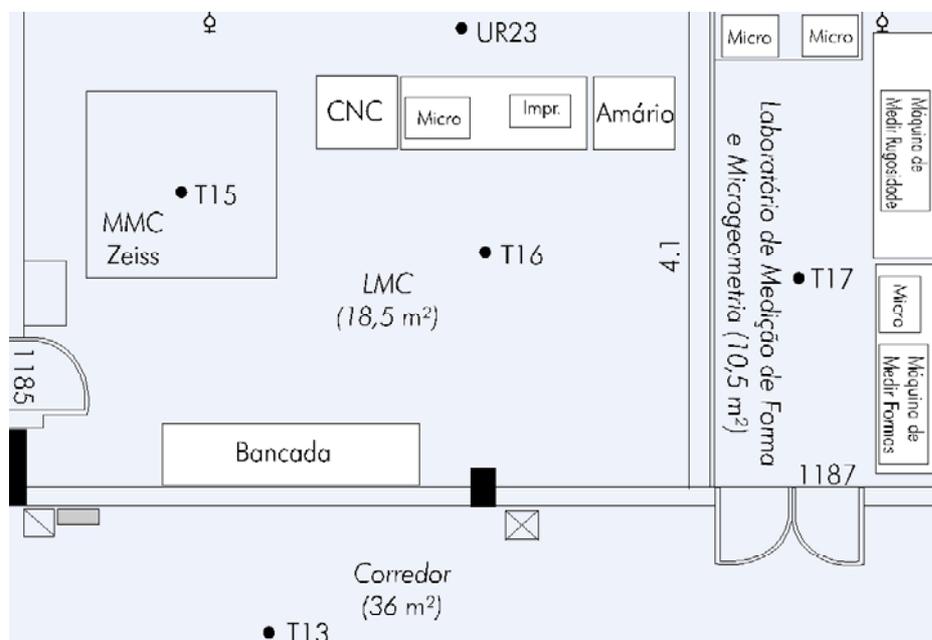


Figura 51 – Detalhes do Laboratório de Metrologia Dimensional da Fundação CERTI. Observe-se a MMC Zeiss ZMC 550 e o lay-out dos sensores de temperatura para o controle da climatização (T15, T16, etc.).

## 5.1 A PROBLEMÁTICA DA PEÇA SELECIONADA

Tendo em vista a aplicação da sistemática no Laboratório de Medição por Coordenadas, foi selecionada uma peça junto a um parceiro industrial. Nesse caso, a empresa WHB Componentes Automotivos, com sede em Curitiba, Paraná, quem já utiliza os serviços do laboratório, solicitou a calibração de uma carcaça de direção para usar como referência no seu laboratório de metrologia. A empresa WHB produz diversos componentes para a indústria automotiva, dos quais podem mencionar-se cabeçotes de cilindros, blocos de motor, caixas de câmbio, caixas de transmissão, coletores e balancins, e tem como clientes a Audi, Volkswagen, General Motors e Ford, entre outros.

### **5.1.1 A necessidade do cliente**

No início do estudo de caso, foi organizada uma visita de dois dias à sede da empresa em Curitiba, para avaliar o estado atual do processo de produção e medição de peças no chão de fábrica. Dentro do escopo da visita, foram obtidas informações relevantes ao processo de manufatura e usinagem das carcaças de direção, como assim também dados importantes relacionados aos métodos e meios de medição utilizados, condições ambientais e recursos humanos dedicados à inspeção de produtos. Em particular, foi obtida informação relacionada ao desenho técnico da peça, fixação na MMC, tempo total de medição, número de pontos medidos e características geométricas e dimensionais avaliadas. Por outra parte, foi realizada uma reunião conjunta com os chefes de engenharia, fabricação e qualidade da empresa, visando discutir as necessidades de melhoria analisadas depois de obtida a informação. Uma primeira sugestão foi a realização do teste de performance segundo a Norma ISO 10360-5, do apalpador indexável Renishaw PH10M utilizado na medição da peça selecionada. Posteriormente, foram discutidos alguns assuntos relacionados ao treinamento específico do pessoal envolvido nas tarefas de medição no laboratório de metrologia. Devido a um compromisso de confidencialidade assumido previamente com a empresa, o detalhe dessas informações não pode ser revelado nesta dissertação.

Como resultado da interação desenvolvida no escopo da visita foi decidida a necessidade por uma peça padrão calibrada, a qual foi obtida aleatoriamente da linha de produção. Essa peça padrão seria calibrada nas instalações da Fundação CERTI, e os resultados da calibração servirão como referência direta no processo de inspeção de carcaças de direção. Especificamente, os resultados permitirão a avaliação de incertezas no chão de fábrica, a partir da aplicação da norma ISO 15530-3. Além disso, a seleção das cotas específicas a serem calibradas foi definida, considerando futuros estudos adicionais como o monitoramento da estabilidade da MMC.

### **5.1.2 Carcaça de caixa de direção para caminhonetes HSG-P/S - BA**

A peça selecionada para calibração é uma carcaça de direção utilizada em caminhonetes leves, projetada pela empresa Visteon dos Estados Unidos. A carcaça

pertence a um conjunto de direção do tipo de esferas recirculantes, a qual fornece alta precisão, alta capacidade de pressão hidráulica, potência assistida do tipo balanceado, fricção minimizada e maior segurança. O sistema de direção como produto final e o diagrama de funcionamento são apresentados na Figura 52. Outra característica é a baixa variabilidade na localização axial do eixo, permitindo uma suspensão consistente do veículo.

Como os sistemas de direção dos veículos são componentes críticos do ponto de vista de segurança dos passageiros, todas as peças devem ser inspecionadas para avaliar conformidade com as especificações. Há dois sistemas de medição alternativos para realizar essa inspeção: um sistema para avaliação simultânea de múltiplas cotas por meio de sensores indutivos e uma MMC marca DEA, localizada numa sala de medidas próxima à linha de produção.

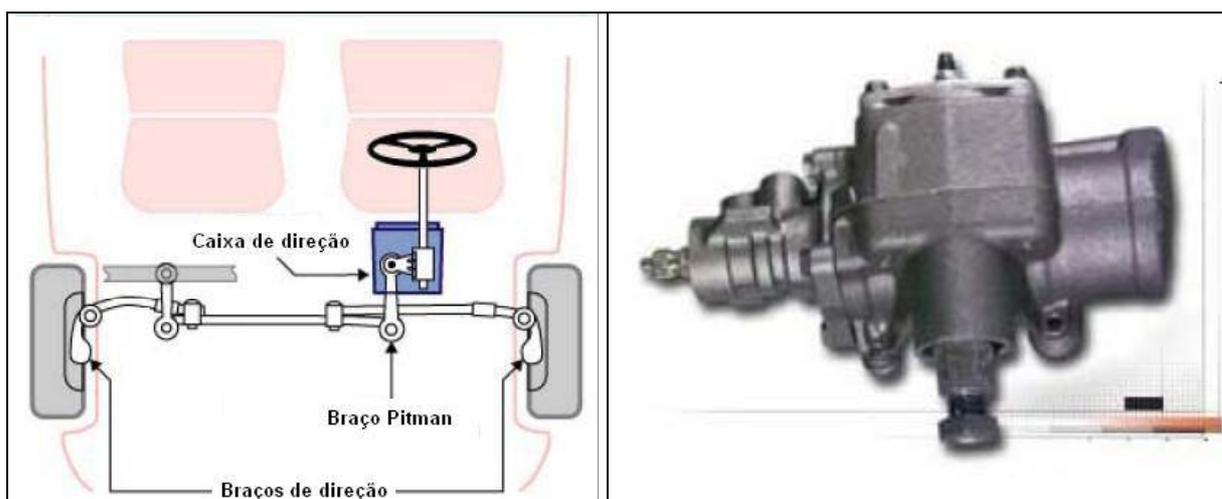


Figura 52 – Posição da caixa de direção no veículo (Sistema de direção por esferas recirculantes) e uma foto do produto final. A carcaça refere-se à parte externa da caixa de direção. Cortesia Visteon.

### 5.1.3 Proposta de solução

Depois de obtidas, revisadas e analisadas as informações obtidas do cliente do serviço de calibração, foi proposta uma solução específica, focada no uso de peças padrão calibradas para fornecer rastreabilidade às medições por coordenadas realizadas no chão de fábrica. Especificamente, a metodologia de calibração proposta é a calibração Tipo 2 (Calibração por Características), focada na medição e avaliação de incertezas funcionalmente objetiva de características geométricas e dimensionais.



recuperação de procedimentos de calibração que possam ser facilmente adaptados a problemas futuros.

Foi desenvolvida uma fixação especial utilizando o sistema modular Witte<sup>1</sup> do CMI (Figura 54). A fixação montada imita o sistema utilizado pelo cliente na medição da peça, permitindo o acesso a todos os elementos geométricos necessários. A montagem da fixação Witte foi simulada por computador, utilizando os mesmos recursos de software para modelos 3D mencionados previamente.



Figura 54 – A carcaça de medição montada no sistema de fixação modular Witte.

Sob o ponto de vista do laboratório de calibração, e devido às características próprias apresentadas previamente do Método Híbrido, a implementação só poderia ser realizada através do uso de uma solução informatizada. O aplicativo permitiria administrar o desenvolvimento geral da calibração de peças padrão em MMC, facilitando e agilizando a implantação dos métodos contidos na sistemática, motivando os funcionários a otimizar as atividades cotidianas do laboratório. Esse aplicativo foi desenvolvido na plataforma Microsoft Excel<sup>®</sup>, o qual já vem sendo utilizado no laboratório, facilitando sua introdução no sistema e diminuindo o tempo de aprendizado por parte dos operadores.

---

<sup>1</sup> Witte é uma empresa alemã dedicada à fabricação de sistemas de fixação modular. As partes originais em formato eletrônico que compõem o sistema podem ser obtidas gratuitamente na Internet: [www.witte.de](http://www.witte.de)

O desenvolvimento de softwares especializados para a criação de procedimentos de medição por coordenadas não é novo, embora seja recente. Na Alemanha, a necessidade por assistir ao operador da MMC na criação de procedimentos de medição adequados já foi observada. Eles desenvolveram um sistema multimídia baseado em documentos *web*, que permite sistematizar a criação e documentação de procedimentos de medição. Informação visual, como fotos e arquivos de vídeo, é utilizada para facilitar a compreensão do processo de medição. O sistema permite a criação de uma base de dados, porém não utiliza IA para a recuperação rápida de informações. No entanto, segundo os autores, o sistema protótipo foi bem recebido pelos usuários, e será desenvolvido proximoamente um software disponível para a indústria e os laboratórios <sup>[104]</sup>.

## 5.2 ESTRUTURA DO APLICATIVO PARA GESTÃO DA CALIBRAÇÃO DE PEÇAS PADRÃO EM MMC (MASTERPART)

O aplicativo MasterPart apresenta um menu principal composto de ícones que referenciam para um conjunto de documentos necessários para a calibração da peça padrão. Estes ícones estão dispostos na forma de fluxograma, conforme ilustrado na Figura 55, determinando a seqüência correta para a criação do Procedimento de Calibração. O documento final criado pelo usuário estará composto por uma capa, tantas características como seja necessário segundo o requerimento do cliente e um certificado de calibração.

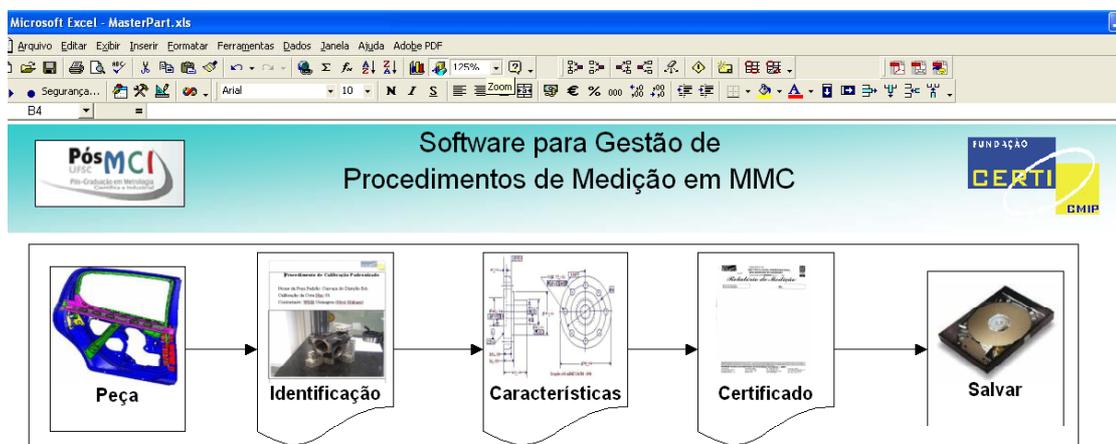


Figura 55 – Menu principal do aplicativo para gestão de procedimentos de calibração em MMC (MasterPart).

Assim, foi estabelecida uma divisão em três partes principais onde os documentos são criados e contidos:

1. **Identificação** – contém informação geral relativa à peça, ao cliente e ao laboratório de calibração. Dentre essas informações, podemos mencionar: nome da peça padrão número de identificação da peça, laboratório de calibração, análise da tarefa de medição, data de solicitação, contratante, incerteza requerida pelo cliente, nome do laboratório, número de ordem interna, MMC usada na calibração, data de medição, outros padrões usados na calibração: operador, entre outras.
2. **Características** – contém todas as características as serem medidas correspondentes à peça calibrada. Esse conjunto de documentos resume toda a informação necessária para a medição, incluindo a estratégia de apalpação, resultados e avaliação de incertezas. O detalhe dessas informações foi apresentado previamente na Tabela 9. Cada cota pode ser criada a partir da adaptação de uma cota já medida nessa ou em outra peça, a partir do uso dos algoritmos de RBCa inseridos no software. O usuário poderá modificar procedimentos similares recuperados da BC, economizando tempo de planejamento e avaliação de resultados. No entanto, terá a opção de desenvolver procedimentos totalmente novos, baseados simplesmente num modelo de documento previamente armazenado. Essa opção é usada na fase inicial, durante o “treinamento” do sistema de IA.
3. **Certificado** – aqui é criado o certificado de calibração da peça padrão, utilizando todas as informações inseridas nos documentos anteriores, incluindo o resumo das cotas medidas, o resultado da calibração e avaliação de incertezas. O documento é criado automaticamente e pode ser impresso quando for necessário. Essa característica é compartilhada por todos os documentos criados.

O aplicativo salva um único arquivo para cada peça calibrada utilizando a metodologia. Além disso, quando um novo procedimento for criado, baseado num procedimento anterior ou no procedimento padrão, o administrador do sistema

poderá armazenar automaticamente as informações necessárias para a recuperação do documento utilizando RBCa.

Desta forma, com a utilização do aplicativo pretende-se atingir os objetivos propostos no capítulo anterior, ou seja, sistematizar a criação de procedimentos de calibração consistentes; padronizar a metodologia de avaliação de incertezas de acordo com o tipo de calibração e o mensurando específico e finalmente, criar uma base de dados reutilizável, permitindo estabelecer uma memória corporativa no laboratório de calibração. É importante ressaltar que a efetividade do sistema dependerá fortemente dos operadores, principalmente na fase inicial, quando o sistema contém poucas informações de calibrações anteriores. Essa característica dos sistemas do tipo especialista, embora apareça como uma desvantagem, permite uma adaptação progressiva dos usuários. Assim, o sucesso final da aplicação dependerá da boa predisposição do pessoal envolvido e da rapidez com que os procedimentos e informações forem criados.

É importante lembrar que o aplicativo proposto está em fase de testes, e deve ser considerado como um protótipo. Mesmo assim, é totalmente funcional, e tornou-se uma forma válida de solução para os fins desta dissertação.

### **5.3 CALIBRAÇÃO POR CARACTERÍSTICAS DA CARÇAÇA DE DIREÇÃO UTILIZANDO O APLICATIVO MASTERPART**

Para verificar a viabilidade e a eficiência do software, a carcaça de direção da empresa WHB foi calibrada utilizando todos os recursos disponíveis e as equações para avaliação de incertezas segundo o Método Híbrido.

Como já foi mencionado na seção 4.2.2, os índices utilizados no algoritmo NNA apresentam níveis discretos que são susceptíveis a uma quantificação linear. Como os diferentes níveis para cada índice dependem da situação particular do laboratório de calibração, foi realizada a seleção dos níveis específicos para o Laboratório de Medição Geométrica do CMI (Tabela 21). Além disso, o aplicativo foi programado de modo a adaptar-se facilmente a diferentes situações, incluindo a inserção de novos índices e adição de maior quantidade de níveis, para melhor representar cada caso em particular. O algoritmo de NNA foi programado no software, dividindo cada índice pelo número de níveis, e escalando cada valor linearmente. Esse sistema pode ser

otimizado no futuro, a partir da utilização de pesos para cada nível e cada índice. O resultado dessa modificação é um tipo diferente de NNA, chamado de *Weighted Nearest Neighbor Algorithm* (WNNA) <sup>[92]</sup>. Assim, por exemplo, será possível introduzir o desdobramento dos seis grandes grupos de características GPS como se apresenta no Apêndice 1.

Tabela 21 – Os níveis do sistema RBCa selecionados para as condições particulares do laboratório de calibração.

<b>Índices de Seleção</b>	<b>Níveis</b>						
Máquina a ser usada na calibração	Zeiss ZMC 550		MMC Mitutoyo		Mahr MMQ-40		
Tipo de fixação	Witte		Fixação simples		Fixação do cliente		
Número de posições da peça	Posição única	Duas posições (rebatimento)		Quatro posições (ISO 15530-2)		“N” posições	
Tipo de apalpador	Simples - Indexável		Múltiplo - Indexável		Simples – <i>Scanning</i>		Múltiplo – <i>Scanning</i>
Tipo de calibração	Tipo 1: Por Pontos		Tipo 2: Por Características		Tipo 3: Por Condição		
Padrões adicionais a serem utilizados	<i>Step-gage</i> ou bloco padrão		Anéis padrão	Esfera Padrão	Laser Interferométrico	Nenhum padrão	
Tipo de características GPS	Tamanho	Forma	Orientação	Localização	Batimento	Perfis	
Número de ciclos (repetições) da medição.	2		3		“N” ciclos		

O resultado da programação é um diagrama de fluxo que permite ao usuário selecionar os níveis graficamente, dependendo de cada caso em particular. Os mesmos níveis são utilizados pelo administrador do sistema (o especialista em metrologia por coordenadas) para salvar os dados na BC do sistema de RBCa (Figura 56). Neste estudo de caso, os funcionários do laboratório não tiveram contato com o software, devido a que o estado atual de desenvolvimento é de protótipo. Assim, enquanto mais peças sejam calibradas, o aplicativo será introduzido progressivamente no ambiente laboratorial, permitindo uma adaptação natural ao sistema e adicionando mais casos na BC.

Os procedimentos de calibração para cada uma das onze características selecionadas na peça foi desenvolvido de acordo as recomendações, metodologias e boas práticas mencionadas nos capítulos iniciais, fundamentadas nas principais bibliografias sobre o tema. O número de pontos e distribuição nos elementos geométricos permite uma adequada avaliação Por Características (Tipo 2), sem

prejudicar o tempo total de medição. No entanto, foi decidido utilizar uma única posição da peça (ao invés de múltiplas localizações) devido à falta de tempo necessário para a programação e execução da medição.



Figura 56 – Os parâmetros de pesquisa e recuperação de procedimentos de medição, baseados em RBCa.

A carcaça de direção é a primeira peça a ser calibrada utilizando o aplicativo MasterPart e, portanto, foi necessário desenvolver os procedimentos de calibração e avaliação de incertezas utilizando como modelo o procedimento padrão simples. Devido ao grande detalhe de informações contidas em cada um dos procedimentos de calibração desenvolvidos para cada cota medida, não é possível apresentá-las em toda sua extensão neste trabalho. Porém, os principais parâmetros, condições, estratégias e resultados da medição podem ser descritos na forma de uma tabela (Tabela 22).

Tabela 22 – Resumo da principais informações relacionadas à calibração da carcaça de direção.

Características	Detalhes
Fixação da peça	Fixação modular Witte montada e modelada em arquivo eletrônico 3D.
Posição da peça	Posição única. Não foi realizada medição por rebatimento.
Métodos de substituição	Método de substituição usado unicamente nas medições de tamanho. Foram empregados anéis padrão calibrados.
Apalpador	Apalpador múltiplo em formato estrela com quatro extensões. Qualificação padrão e avaliação de erros pela norma ISO 10360-5.
Condições ambientais e outros parâmetros	Condições de acordo à norma VDI/VDE Classe II: (20,0 ± 0,3) °C. Velocidade de apalpação de 1 mm/s e força de medição de 0,2 N.
Número e distribuição dos pontos	50 pontos por elemento medido. Cilindros com 5 seções de 10 pontos cada uma, uniformemente distribuídos. Planos: distribuição aleatória.
Tipo de ajuste	Mínimos quadrados e mínima zona no caso de elementos de forma.
Ciclos e tempo de medição	Foi realizado um programa CNC que avalia todos os elementos físicos da peça, permitindo que o software de medição realize as associações necessárias para a avaliação das características geométricas e dimensionais. O programa foi repetido três vezes. Cada ciclo de medição demorou 35 minutos para ser executado.

A avaliação de incertezas para as onze características foi realizada utilizando os procedimentos descritos na metodologia geral do Método Híbrido. Para cada cota em particular, foi utilizado o modelo correspondente, e as componentes de incertezas avaliadas segundo as informações contidas no Procedimento de Calibração. Esse procedimento contém as tabelas para avaliação de incertezas como apresentado previamente na seção 4.3 . Os resultados são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Resultados da calibração da carcaça de direção pelo Método Híbrido.

PARÂMETROS	VALOR [mm]	$\pm U_{95,45\%}$ [mm]	$K_{95,45\%}$	$V_{eff}$
Paralelismo 0,1 com A	0,0262	0,0198	2,65	5
Perpendicularidade 0,05 com A	0,0169	0,0035	2,17	16
Cilindricidade 0,02	0,0104	0,0021	3,31	3
Posição 0,5 CBE	0,2893	0,0125	2,87	4
Posição 0,13 CBA	0,0365	0,0120	3,31	3
Posição 0,12 ABC	0,1041	0,0128	3,31	3
Posição 0,025 D	0,0066	0,0055	2,43	7
Batimento 0,2 D	0,0449	0,0028	2,00	Infinito
Diâmetro de 41,262 ~ 41,293	41,2760	0,0021	2,00	Infinito
Diâmetro de 66,67 ~ 66,73	66,7175	0,0021	2,00	Infinito
Diâmetro de 80,924 ~ 80,975	80,9363	0,0021	2,00	Infinito

Como é possível observar na tabela anterior, os valores de incertezas achados variam entre aproximadamente 2  $\mu\text{m}$  e 20  $\mu\text{m}$ , dependendo da característica calibrada. Essa faixa de valores, embora possa ser considerada

relativamente grande considerando a incerteza global de calibração da MMC (estimada em 1,5  $\mu\text{m}$  para comprimentos de até 200 mm), é explicada pela combinação do erro de forma próprio da peça com a estratégia de medição. Além disso, o baixo número de repetições utilizado (três ciclos), influencia grandemente os balanços finais de incertezas, diminuindo o número de graus de liberdade final e, como consequência, aumentando o valor do fator de abrangência. Assim, a primeira recomendação para futuras calibrações é o aumento do número de repetições, fundamentalmente para características de localização e orientação.

Um problema encontrado durante a execução da medição foi a limitação do software de medição da MMC<sup>1</sup>, para se adaptar a estratégias de medição e avaliação de características não padronizadas. Além disso, o software não permite a avaliação dos erros de apalpação exatamente como a norma ISO 10360-5 solicita<sup>2</sup>, pelo que foi necessário re-processar os dados brutos do teste num software externo. Devido a sua interface de usuário pouco flexível, o tempo de programação foi ainda maior que o tempo total de medição (três ciclos). Do mesmo modo, a utilização do modelo CAD 3D é outra funcionalidade faltante, a qual teria ajudado grandemente no desenvolvimento do programa de medição. Em relação ao apalpador múltiplo tipo estrela, os comprimentos de haste e tamanhos de esferas ideais para a medição não puderam ser utilizados, devido a não estarem disponíveis para essa MMC em particular.

## 5.4 PROCEDIMENTO DA FUNDAÇÃO CERTI

Para poder avaliar a consistência dos resultados achados na calibração da carcaça de direção pelo Método Híbrido, foi realizada uma medição utilizando os procedimentos e equações de avaliação de incertezas atualmente utilizados no Laboratório de Metrologia por Coordenadas. Os procedimentos foram acreditados pela RBC, e permitem avaliar todo tipo de medições dimensionais. Como são

---

<sup>1</sup> A MMC Zeiss ZMC-550 instalada no CMI utiliza o software Umess-UX, que funciona sobre o sistema Unix. Atualmente considerado um sistema arcaico, o software Umess UX substituiu o Umess 300 ao redor de 1995/96, da mesma forma que o Calypso tem substituído recentemente o Umess UX.

<sup>2</sup> Especificamente, a norma solicita a avaliação do erro de forma por mínimos quadrados, utilizando os pontos medidos com todos os apalpadores.

procedimentos internos do laboratório, o seu conteúdo não pode ser divulgado no presente trabalho. Porém, é possível mencionar que foram utilizados seis ciclos de medição e um anel padrão calibrado foi empregado para avaliar o erro de apalpação.

A medição RBC foi executada de forma totalmente independente com o procedimento proposto nesta dissertação. Assim, as conclusões de ambas as calibrações podem ser comparadas e realizada uma análise objetiva dos resultados. Porém, como a mesma MMC foi utilizada para as duas medições, existirão correlações não discerníveis. Mesmo assim, os procedimentos de medição e avaliação de incertezas são totalmente diferentes, e para minimizar as correlações já referidas, as medições foram realizadas por diferentes operadores. Os resultados são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 - Resultados da calibração da carcaça de direção pelo procedimento certificado RBC.

PARÂMETROS	VALOR [mm]	$\pm U_{95,45\%}$ [mm]	$K_{95,45\%}$	$V_{eff}$
Paralelismo 0,1 com A	0,0049	0,0021	2,05	60
Perpendicularidade 0,05 com A	0,0142	0,0021	2,05	60
Cilindricidade 0,02	0,0062	0,0016	2,05	68
Posição 0,5 CBE	0,2639	0,0020	2,05	61
Posição 0,13 CBA	0,0413	0,0018	2,05	63
Posição 0,12 ABC	0,1124	0,0018	2,05	63
Posição 0,025 D	0,0219	0,0019	2,05	70
Batimento 0,2 D	0,0353	0,0016	2,05	69
Diâmetro de 41,262 ~ 41,293	41,2755	0,0017	2,05	66
Diâmetro de 66,67 ~ 66,73	66,7182	0,0018	2,05	66
Diâmetro de 80,924 ~ 80,975	80,9450	0,0019	2,05	65

Analisando os resultados da tabela anterior, é possível observar que uma faixa menor de incertezas foi achada em comparação com o Método Híbrido (1  $\mu\text{m}$  ~ 2  $\mu\text{m}$ ). Além disso, valores relativamente elevados do número de graus de liberdade foram achados para todas as características medidas. Assim, é possível concluir que o procedimento de avaliação de incertezas deve ser baseado num único modelo de medição. Além disso, os valores relativamente grandes do número de graus de liberdade, quando comparados com o número de repetições executados, implicam numa forte presença de fontes de incertezas do tipo B, baseada em informações prévias ou julgamento científico (e.g.: dados da calibração da MMC). Como consequência, informações empíricas obtidas da própria medição não tiveram influência significativa nos resultados da avaliação de incertezas. Não

obstante esses valores de incertezas pareçam vantajosos, pode-se alegar que não sejam totalmente representativos do mensurando em questão, que apresenta erros de forma e superficiais da mesma ordem de grandeza.

Atualmente, a política do laboratório é fornecer um certificado de calibração que apresenta unicamente os resultados das cotas medidas e os valores de incertezas achados, além de algumas outras informações gerais como os dados do cliente e o laboratório de calibração, a MMC utilizada, condições ambientais, padrões adicionais e número de ciclos de medição. No entanto, no caso específico de calibração de peças padrão, o procedimento, estratégia de apalpação e avaliação de incertezas deve ser conhecido em detalhe pelo cliente, para ele poder tirar conclusões ao respeito dos resultados, e saber em que situação poder usá-los.

## **5.5 AVALIAÇÃO POR SIMULAÇÃO**

Neste caso, foi realizada a avaliação de incertezas para as onze características da carcaça de direção, por meio de simulação computacional. O software utilizado, como já foi mencionado, é o PUNDIT/CMM. Os resultados foram obtidos através de uma parceria com a empresa MetroSage, a qual realizou as simulações no seu software a partir de um pacote completo de informações previamente estabelecidas do processo de medição real. As informações enviadas à empresa MetroSage estão resumidas na Tabela 25.

Os erros de forma apresentados na tabela anterior foram obtidos a partir da análise dos relatórios de medição da peça pelo Método Híbrido, e são considerados valores estimados razoáveis aos fins da simulação. Assim mesmo, os valores informados do teste de performance segundo a Norma B89.4.1 foram obtidos após uma readaptação dos resultados apresentados no último certificado de calibração da MMC. Essa readaptação ou recuperação dos resultados foi realizada considerando todos os aspectos de avaliação especificados na norma e sua correlação com o procedimento de calibração. Por fim, para que seja possível estabelecer um cenário adequado para a intercomparação de resultados, todas as condições do processo de medição do Método Híbrido foram mantidas na simulação.

Tabela 25 – Resumo das informações enviadas à empresa MetroSage para simulação de incertezas.

<b>Definição da peça</b>	Modelo eletrônico da peça em 3D em formato ACIS: "Steering Case.SAT" Especificação técnica da peça (desenho técnico): "Steering Case.pdf"	
<b>Parâmetros de especificação</b>	Elemento	Erro de Forma [mm]
	Datum plano B	0.0117
	Datum plano C	0.02
	Datum furo A	0.015
	Datum furo E	0.022
	Furo C2 (ver desenhos)	0.017
	Cilindro 41.262-41.293	0.008
	Cilindro 66.67-66.73	0.004
	Cilindro (com run-out)	0.008
<b>Definição da MMC</b>	MMC tipo ponte Zeiss ZMC 550 Volume de medição. X (+A) = 550 mm Y (+B) = 500 mm Z (+C) = 450 mm	Resultados do teste segundo a Norma B89.4.1 Linear Accuracy in X, Y and Z = 1 um Volumetric Performance = 3.1 um Offset Volumetric Performance = N.A. Repeatability = 0.2 um
<b>Definição do apalpador</b>	Configuração: Tipo estrela fixo, ativo. Cinco elementos de apalpação com ponta de esfera.	Resultados do teste segundo a Norma ISO 10360-5: Comprimento da haste [mm] = 80 MPE_L [um] = 1.7 MPE_S [um] = 0.1 MPE_F [um] = 0.5
<b>Meio ambiente</b>	Temperatura da peça: estática. Software não realiza compensação <i>on-line</i>	
	Escalas da MMC: Coeficiente de expansão: 3 ppm/°C Incerteza do coeficiente: 1 ppm/°C Temperatura: 20 °C Incerteza da temperatura: 0.3 °C	Peça: Coeficiente de expansão: 11.5 ppm/°C Incerteza do coeficiente: 1 ppm/°C Temperatura: 20 °C Incerteza da temperatura: 0.3 °C
<b>Estratégia de medição</b>	Os cilindros são medidos com 50 pontos, 5 seções circulares (10 pontos por seção) distribuídos uniformemente. Os planos são medidos 50 pontos igualmente espaçados sobre a superfície.	
<b>Posição e orientação da peça</b>	A peça foi localizada em aproximadamente: 290 mm no eixo +X (eixo X é paralelo à ponte) 300 mm no eixo -Y 200 mm no eixo -Z (eixo Z é perpendicular ao desempenho da MMC)	
	A peça foi orientada com o datum cilindro A no sentido -Y. Datum plano C aponta no sentido do eixo +Z.	

Uma característica interessante do PUNDIT é a possibilidade de checar que todas as cotas sejam consistentes do ponto de vista da especificação geométrica e dimensional, e que não existam incongruências que impeçam a sua correta interpretação (Figura 57). No entanto, não se deve esquecer que a simulação não fornece valores médios para as características avaliadas, mas somente estimativas de incerteza. Assim, a simulação por Monte Carlo foi realizada utilizando 500 ciclos virtuais de medição, permitindo que os resultados sejam avaliados numericamente e graficamente (Figura 58).

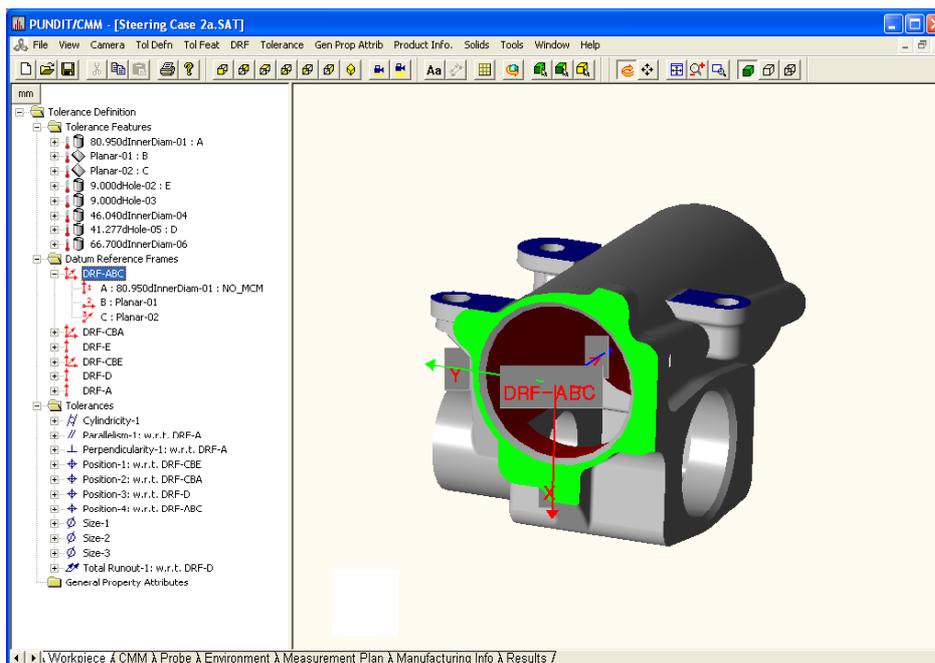


Figura 57 – Janela do PUNDIT correspondente à carcaça de direção importada do modelo CAD 3D.

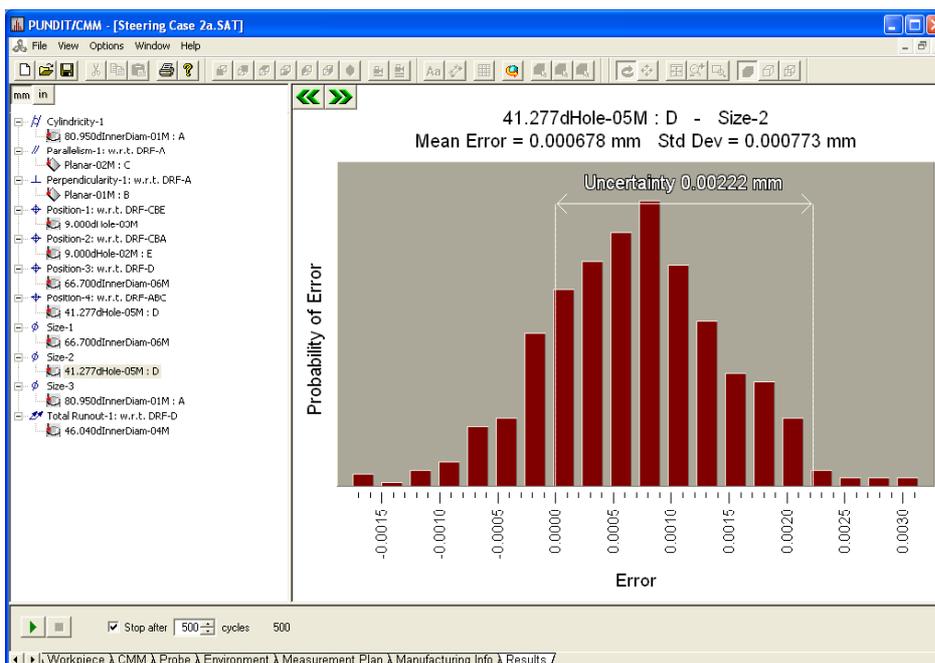


Figura 58 – Janela de resultados do PUNDIT, apresentando o histograma simulado por Monte Carlo e o valor de incerteza achado para o diâmetro do furo de 41,277 mm.

Os resultados de avaliação de incertezas são apresentados na Tabela 26. Observe-se que o valor dos graus de liberdade efetivos apresentados para todas as cotas é infinito. O motivo disso é que em simulações por Monte Carlo as informações do processo de medição estão baseadas em modelos de incerteza do Tipo B.

Tabela 26 - Resultados da simulação de incertezas utilizando o software PUNDIT.

PARÂMETROS	$\pm U_{95,45\%}$ [mm]	$K_{95,45\%}$	$V_{eff}$
Paralelismo 0,1 com A	0,0020	2,00	Infinito
Perpendicularidade 0,05 com A	0,0011	2,00	Infinito
Cilindricidade 0,02	0,0026	2,00	Infinito
Posição 0,5 CBE	0,0186	2,00	Infinito
Posição 0,13 CBA	0,0143	2,00	Infinito
Posição 0,12 ABC	0,0075	2,00	Infinito
Posição 0,025 D	0,0061	2,00	Infinito
Batimento 0,2 D	0,0043	2,00	Infinito
Diâmetro de 41,262 ~ 41,293	0,0022	2,00	Infinito
Diâmetro de 66,67 ~ 66,73	0,0019	2,00	Infinito
Diâmetro de 80,924 ~ 80,975	0,0030	2,00	Infinito

Além da simulação por Monte Carlo básica, a qual considera todas as principais fontes de incerteza, mais quatro cenários foram avaliados. Nesses quatro cenários, cada uma das principais fontes de incerteza (MMC, Apalpador, Forma, Temperatura) foi avaliada de forma independente para todas as cotas da peça. De tal modo, é possível realizar uma análise que permita avaliar a contribuição relativa de cada fonte no balanço de incertezas final. A melhor forma de comparar essas contribuições é através de um gráfico de colunas empilhadas, como apresentado na Figura 59.

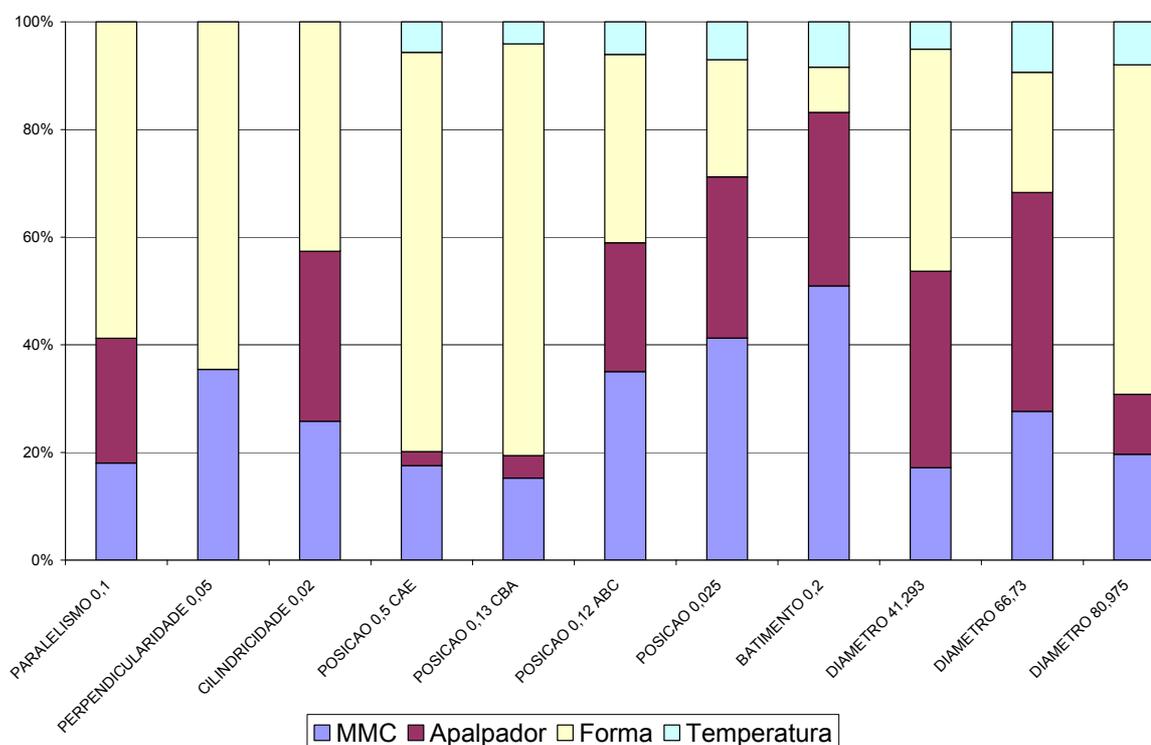


Figura 59 – Gráfico de colunas empilhadas das quatro principais fontes de incerteza consideradas pelo software PUNDIT.

Uma das possíveis conclusões da análise gráfica é a pequena contribuição dos efeitos térmicos na medição, devido ao bom controle de temperatura e estabilização do laboratório. Além disso, é notória a contribuição do erro de forma da peça combinado com a estratégia de medição, a qual é comparável ao próprio erro de medição da MMC. Essa contribuição é notável nas cotas de localização, as quais são grandemente afetadas por desvios de forma nos elementos de referência ou *datums*, produzindo como consequência um sistema coordenado peça inconstante entre medição e medição. Finalmente, observe-se que a contribuição do erro de apalpação não é desprezível, e só pode ser considerado nulo no caso da medição de perpendicularidade.

## 5.6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir da análise dos resultados obtidos com as três metodologias, é possível realizar uma comparação com o objetivo de estabelecer a consistência do procedimento proposto. O procedimento de comparação é similar ao utilizado na intercomparação de medições entre laboratórios. Porém, devido a que não é possível estabelecer valores de referência comuns, a avaliação do Erro Normalizado não será realizada. No entanto, uma comparação gráfica dos resultados permite estabelecer aquelas situações em que as regiões de incerteza para os três procedimentos intersectam-se entre si. Esse gráfico é apresentado na Figura 60.

Para permitir uma correta interpretação dos valores achados para cada cota utilizando apenas um único gráfico, os valores médios encontrados por cada metodologia foram diminuídos por seus correspondentes valores nominais. Ao mesmo tempo, a avaliação por simulação (PUNDIT) é apresentada com um valor médio igual ao valor achado pelo Método Híbrido, permitindo uma comparação direta entre incertezas. O motivo disso é que a simulação só utiliza informação prévia do processo (não valores empíricos) e, portanto, só permite estimar valores de incertezas para as características de interesse.

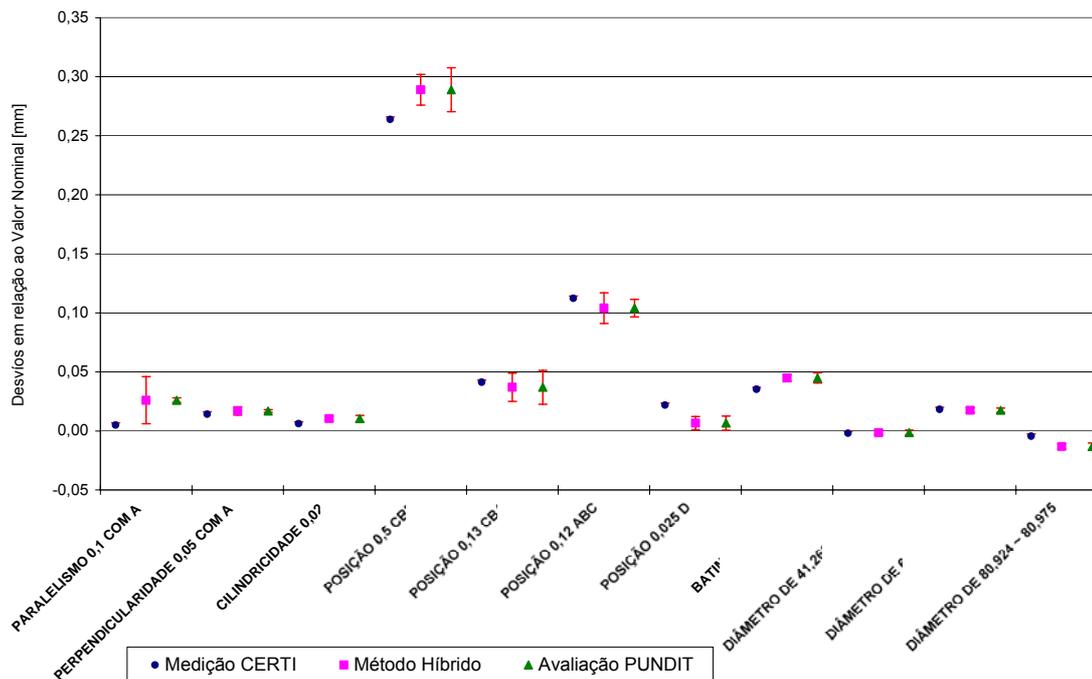


Figura 60 - Resultado da comparação realizada na calibração da carcaça.

A partir da análise do gráfico anterior e das tolerâncias para cada cota, é possível afirmar que a essa peça em particular pode ser aceita sob o ponto de vista de conformidade de produto. Embora não seja o objetivo da calibração estabelecer que os desvios máximos permitidos não foram ultrapassados permite confirmar um dos requisitos de adequabilidade da peça como padrão. Observe-se também que as cotas com maior desvio em relação ao valor nominal são as cotas de localização, fundamentalmente a cota de posição em relação a CAE cuja tolerância é de 0,5 mm. Essas mesmas cotas são também as que apresentam os maiores valores de incerteza achados, tanto para o Método Híbrido como para a simulação PUNDIT. Além disso, os níveis de incerteza achados para as duas avaliações são totalmente comparáveis. No caso da medição acreditada pela RBC, não é possível estabelecer diferenças significativas entre as múltiplas cotas, especificamente no que se diz à avaliação de incertezas. No caso da avaliação de paralelismo, o Método Híbrido informou um valor de incerteza muito maior que as duas outras metodologias, devido fundamentalmente ao valor relativamente elevado da repetitividade achada durante as medições. A explicação mais plausível encontra-se em que o elemento de referência (cilindro A) não foi medido em toda sua extensão, já que não estava disponível uma haste de apalpador do comprimento necessário. Assim, pequenas mudanças na localização do eixo de referência implicam numa extrapolação em

relação ao elemento especificado, neste caso, o plano composto pelas três “orelhas” (ver Apêndice 3). Essa extrapolação deve-se a que o plano apresenta um tamanho maior que o eixo do cilindro efetivamente medido. Nesse caso em particular, mais repetições deverão ser realizadas, ou uma haste de comprimento maior deverá ser utilizada. A perpendicularidade de 0.05 mm, também em relação ao *datum* A, não foi afetada da mesma maneira, já que não existiu extrapolação em relação ao elemento especificado (o plano B), o qual apresenta um tamanho comparável com o eixo finalmente medido.

Uma análise de correlação entre as diferentes metodologias de avaliação de incertezas pode ser realizada comparando-se os resultados da avaliação entre pares de métodos. Na Figura 61 pode-se observar a correlação entre os valores de incerteza expandida encontrados para o Método Híbrido e para a simulação PUNDIT, considerando as onze características. O valor de  $R^2$  encontrado, o qual se apresenta propriamente no gráfico, sugere uma boa correlação entre as diferentes metodologias. Porém, esse valor de correlação linear corresponde à avaliação de dez das onze características. Isto é devido a que a avaliação de paralelismo foi considerada como valor atípico pelo problema de repetitividade mencionado previamente. Nos casos das posições em relação a CBE e ABC, não existe informação suficiente par considerar os resultados achados pelo Método Híbrido como valores atípicos.

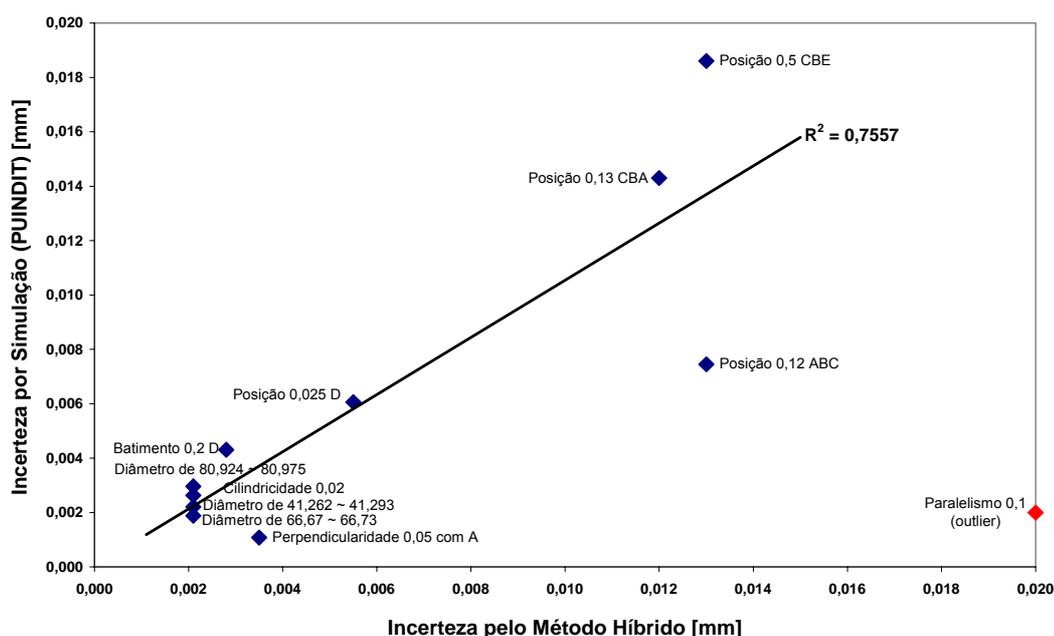


Figura 61 – Análise de correlação entre incertezas fornecidas pelo Método Híbrido e por simulação (PUNDIT).

A peça selecionada para o estudo de caso mostrou-se adequada aos fins do estudo de caso, atingindo os objetivos propostos. Porém, como toda peça de produção, apresenta alguns problemas típicos, como tendência a enferrujar quando mantida em condições inapropriadas e a necessidade de uma fixação particular para sua correta medição. No entanto, quando consideramos a necessidade do cliente por conferir rastreabilidade e estabilidade na sua MMC no chão de fábrica, a peça pode ser considerada adequada sob qualquer ponto de vista.

A utilização do aplicativo MasterPart facilitou o desenvolvimento do planejamento da calibração, permitindo a sistematização e implementação da metodologia proposta. No entanto, para uma total validação do aplicativo é necessário utilizá-lo em peças e situações diversas, após a solicitação do serviço por clientes do laboratório. Além disso, será preciso analisar a factibilidade do seu uso cotidiano no ambiente laboratorial, avaliando suas vantagens e desvantagens por parte do pessoal envolvido.

O programa apresentado é uma ferramenta que pode ser aperfeiçoada à medida que o laboratório vai progredindo no uso da tecnologia. Novas facilidades e funcionalidades podem ser incorporadas, como por exemplo: introdução de novos índices e novos níveis no sistema de seleção do sistema RBCa, leitura automática dos protocolos de resultados fornecidos pelo software de medição, inserção dentro do sistema de gestão informatizado usado atualmente no laboratório<sup>1</sup>, compartilhamento de informações com outros laboratórios ou instituições via Internet. Desta forma, o aplicativo e a sistemática proposta podem integrar uma solução adequada para laboratórios de medição por coordenadas, cuja evolução progressiva permitirá o aumento da qualidade e produtividade dos seus serviços.

---

<sup>1</sup> Atualmente, o CMI utiliza o Cali LAB, um software desenvolvido no Brasil, que permite o controle e gestão das atividades dos laboratórios prestadores de serviços de calibração, manutenção e gerenciamento metrológico.

## **6 CONCLUSÕES E OPORTUNIDADES FUTURAS**

Na presente dissertação foram discutidos assuntos julgados relevantes para o desenvolvimento e implantação de uma metodologia de calibração de peças padrão com MMC. O foco foi dado ao conhecimento aprofundado da tecnologia de medição por coordenadas, a definição do mensurando e sua relação com a estratégia de medição. A seguir apresentam-se as principais conclusões obtidas com a realização deste trabalho e as recomendações para estudos futuros.

### **6.1 CONCLUSÕES**

Foi apresentada uma metodologia para calibração de peças padrão em máquinas de medir por coordenadas, incluindo planejamento avançado, execução e avaliação de incertezas da medição. A metodologia proposta é baseada em três pilares fundamentais: interpretação correta do mensurando, estratégia de medição orientada à aplicação e avaliação de incertezas para tarefas específicas. Diversas práticas conhecidas atualmente na medição por coordenadas, combinadas com recursos de Inteligência Artificial, permitiram desenvolver uma sistemática para a criação de procedimentos de calibração em harmonia com o modelo de medição, a peça a ser medida e os recursos de medição disponíveis no laboratório de calibração. O conteúdo desta dissertação de mestrado poderá servir de aporte para laboratórios de calibração, tanto acreditados como particulares, já que sua estruturação propõe procedimentos e diretrizes que permitem sua implementação em diversos ambientes metrológicos.

Descreveu-se também uma aplicação prática, na qual foi iniciada a implantação da sistemática no Laboratório de Medição por Coordenadas da

Fundação CERTI. Neste estudo de caso criou-se uma solução informatizada através de um software de gestão do processo de calibração, a qual utiliza os recursos de IA já mencionados para a recuperação e aproveitamento de soluções passadas, otimizando o planejamento e avaliação dos resultados da medição. Para validar a aplicação, foi calibrada uma peça real obtida por meio de um projeto conjunto com uma empresa fornecedora de partes para a indústria automobilística. Após a calibração, uma comparação foi realizada utilizando outras duas metodologias, validando de forma satisfatória os resultados obtidos.

Atualmente, a implantação do Método Híbrido está na sua fase inicial e, portanto, sua completa validação será atingida só após uma análise cuidadosa de todos os estágios futuros: inserção de um maior número de casos na base de casos do sistema (mínimo cinco); implementação formal do sistema informático dentro do ambiente laboratorial e treinamento progressivo dos funcionários; avaliação técnico-econômica do sistema considerando tempos de calibração e recursos físicos e humanos necessários; análise das informações retornadas pelos clientes da calibração; re-adaptação do sistema inserindo as melhorias encontradas nos estágios anteriores; formalização da metodologia de avaliação de incertezas frente ao órgão de credenciamento (RBC).

Assim, pode-se considerar como uma das maiores dificuldades encontradas na implantação da metodologia proposta (como em qualquer outro tipo de nova metodologia), o comprometimento e entusiasmo de todos os funcionários e clientes na execução das atividades propostas pela sistemática. Porém, quando as barreiras humanas forem quebradas, os resultados esperados deverão acontecer sem maiores inconvenientes.

No decorrer deste trabalho foi dada uma ênfase importante ao fato de que o sucesso da calibração depende fortemente do entendimento do mensurando e sua correlação com a estratégia de medição. Na área dimensional, é comum interpretar o mensurando de forma simplificada, para assim otimizar o tempo de planejamento, execução e avaliação de incertezas. Como consequência, os balanços de incerteza encontrados não refletem adequadamente a tarefa de medição em questão, sendo que esta apresenta uma complexidade tão importante que seu estudo só começou a se aprofundar recentemente.

Durante a execução do estudo de caso percebeu-se que nas empresas prestadoras de serviços de calibração, o conhecimento dos processos de produção, medição e garantia de qualidade dos clientes é muito limitado, tornado os desafios da calibração de peças padrão em MMC ainda maiores. O motivo geral dessa limitação de conhecimento é a quantidade de tempo total investido pelo laboratório no planejamento da medição, o qual não pode ultrapassar os limites estabelecidos pelos orçamentos de calibração. Do mesmo modo, em muitas situações os clientes são relutantes a fornecer informações internas, embora a falta delas implique em resultados menos confiáveis ou pouco úteis para seus propósitos.

Durante o desenvolvimento da calibração da carcaça de direção, foi observada a dificuldade de gerar procedimentos de medição desde sua fase inicial ou fase zero, sem ajuda de procedimentos antigos. É nessa fase que o desenvolvimento do processo deve ser realizado pelos engenheiros especialistas em medição por coordenadas, contando com a ajuda dos operadores que estão (e estarão) a cargo das operações rotineiras de calibração.

Como resultado da pesquisa bibliográfica, verificou-se que o problema da medição por coordenadas de peças complexas, como as que são diariamente produzidas nas indústrias, não é trivial, e seu estudo aprofundado pode decorrer num novo tipo de abordagem, focado em ferramentas informatizadas mais poderosas (incluindo softwares de medição), compartilhamento de informações via Internet, reaproveitamento de soluções passadas, sistematização de conhecimento e treinamento especializado. Essa tendência já pode ser observada em grandes empreendimentos europeus, como os projetos EUKOM e TRACES.

Por fim, na opinião do autor deste trabalho, maiores esforços são necessários para disseminar o conhecimento da tecnologia de medição por coordenadas (e as ciências relacionadas), àqueles que diariamente estão em contato com elas. A sistematização de conhecimento via software é, na atualidade, um dos métodos mais adequados para atingir esse objetivo, resultando no aumento progressivo da qualidade laboratorial e industrial.

## 6.2 OPORTUNIDADES FUTURAS

Em função de particularidades e limitações próprias, este trabalho deixa em aberto várias questões que podem ser desenvolvidas em outros estudos. Muitas dessas questões poderão ser resolvidas durante a implantação definitiva da sistemática, já que sua validação deve ser realizada de forma progressiva. No entanto, o ponto principal é avaliar a efetividade técnico-econômica do ponto de vista de um laboratório de calibração prestador de serviços acreditados. Além disso, são sugeridas as seguintes recomendações para trabalhos futuros:

- melhorar o algoritmo de pesquisa de procedimentos de calibração (NNA) para o algoritmo do tipo ponderado ou por pesos (WNNA), considerando a introdução, eliminação ou modificação dos índices e níveis já implementados;
- aplicar a metodologia em outros laboratórios de medição por coordenadas, seja no ambiente industrial ou no ambiente laboratorial prestador de serviços a terceiros;
- desenvolver um aplicativo baseado em tecnologia *web* e base de dados *on-line*, que possa ser usado através da Internet e aplicado numa rede inter-laboratorial ou inter-empresarial;
- analisar a factibilidade de criar um sistema de compartilhamento de informações entre laboratórios, para acelerar o desenvolvimento da BC e partilhar informações;
- estudar o efeito no ambiente humano do laboratório durante a implantação definitiva do software, identificando pontos fortes e pontos fracos e tomando ações adequadas;
- otimizar os parâmetros de medição para economizar tempo, diminuir os custos da calibração e reduzir incertezas, a partir da análise das informações inseridas nos procedimentos de calibração armazenados na BC;
- comparar a metodologia de avaliação de incertezas do Método Híbrido com a Norma ISO/TS 15530-2, quando for publicada na sua versão final.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] WECKENMANN, A.; GEWANDE, B. **Koordinatenmeßtechnik – Flexible Meßstrategien für Maß, Form und Lage**. Carl Hanser Verlag, 1999.
- [2] DONATELLI, G.D.; ALBERTAZZI, A.; SCHNEIDER, C.A.; PFEIFFER, G. **Metrologia Geométrica na Indústria - Tendências e Desafios. O futuro da indústria: a importância da metrologia para o desenvolvimento industrial: coletânea de artigos**. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, Departamento Nacional, Brasília, p. 1-28, 2005.
- [3] DUSHARME, D. **2004 Metrology Market Survey**. Quality Digest. Disponível em: <<http://www.qualitydigest.com/pdfs/metsurvey.pdf>> Acesso em: 03 nov. 2005.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 9000: Sistemas de gestão da qualidade – Fundamentos e vocabulários**, 2000.
- [5] WILHELM, R.G.; HOCKEN, R.; SCHWENKE, H. **Task Specific Uncertainty in Coordinate Measurement**, Annals of CIRP, p.553, Keynote Papers Volume 2, 2001.
- [6] PHILLIPS, S.D. **Traceability, Calibration, and Measurement Uncertainty Issues Regarding Coordinate Measuring Machines and Other Complex Instruments**. Proc. Assoc. for Coordinate Metrology Canada (ACMC), Ontario, Canada, June 2000.
- [7] HOCKEN, R.J.; RAJA, J.; UPPLIAPPAN, B. **Sampling Issues in Coordinate Metrology**. Manufacturing Review 6(4), pp.282-294, 1993.
- [8] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/TS 15530-3: Geometrical Product Specifications (GPS) — Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement — Part 3: Use of calibrated workpieces or standards**, 2004.

- [9] SALSBURY, J.G. **A Simplified Methodology for the Uncertainty Analysis of CMM Measurements**, Precision Metrology/Applying Imaging & Sensing, SME Technical Paper, 1995.
- [10] TRAPET E, FRANKE M, HAERTIG F, SCHWENKE H, WAELDELE F, COX M, et. Al. **Traceability of Coordinate Measurements According to the Method of the Virtual Measuring Machine: Final Project Report MAT1-CT94-0076**. PTB-Report F-35, Parts 1 and 2; 1999.
- [11] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Guia Para Expressão da Incerteza de Medição**. Terceira Edição Brasileira, Rio de Janeiro, Agosto de 2003.
- [12] VAN DORP, B.W.J.J.A.; DELBRESSINE, F.L.M.; Haitjema, H.; Schellekens, P.H.J. **Traceability of CMM Measurements**, ASPE 1999 Annual Meeting, Monterey, 1999.
- [13] BENNICH, P. **Geometrical Measurements**. MetroTrade Workshop. Disponível em: < [http://www.gpsmatrix.dk/includes/pdf\\_artikler/mu07.pdf](http://www.gpsmatrix.dk/includes/pdf_artikler/mu07.pdf)>. Acesso em: 03 nov. 2005.
- [14] BOSCH, J.A. **Coordinate Measuring Machines and Systems**. Marcel Dekker, Inc., 1995.
- [15] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10360-1: Geometrical Product Specifications (GPS) - Acceptance and reverification test for coordinate measuring machines (CMM) - Part 1: Vocabulary**, 2000.
- [16] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **VIM: Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia**. Brasília, 2000.
- [17] MARTINEZ ORREGO, R. M.; DI GIACOMO B.; ABACKERLI, A. J. **Fontes de Erros em Metrologia a Três Coordenadas: considerações gerais**. Revista de Ciência & Tecnologia, V. 8, Nº 16, pp. 43-56, 2000.
- [18] WECKENMANN, A.; KNAUER, M.; KILLMAIER, T. **Uncertainty of coordinate measurements on sheet-metal parts in the automotive industry**. Journal of Materials Processing Technology 115, p. 9-13, 2001.

- [19] L. DE OLIVEIRA, A.; DE SOUSA, A.R. **Validação de processos de medição por coordenadas em operações de controle da qualidade**. Anais do Metrologia 2003, Recife, Brasil, 2003.
- [20] SARTORI, S.; ZHANG, G. **Geometric error measurement and compensation of machines**, Annals of CIRP, p. 599, Keynote Papers Vol. 44/2, 1995.
- [21] WECKENMANN, A.; ESTLER, T.; PEGGS, G.; MCMURTRY, D. **Probing systems in dimensional metrology**. Annals of CIRP, p.197, Keynote Papers Volume 2, 2004.
- [22] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. **VDI/VDE 2617 Blatt 2.2: Accuracy of coordinate measuring machines - Parameters and their reverification - Form measurement**, 2000.
- [23] EVANS, C.J.; HOCKEN, R.J.; ESTLER, W.T. **Self-calibration: reversal, redundancy, error separation and 'absolute testing'**, CIRP Annals, 46, (2), pp. 617-634, 1996.
- [24] TRAPET, E. **Importância relativa dos erros geométricos nas MMC**. Comunicação Pessoal, 24 de Novembro de 2003.
- [25] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 1. Geometrical Product Specifications (GPS) - Standard reference temperature for geometrical product specification and verification**, 2002.
- [26] WECKENMANN, A. **Research project "European Training for Coordinate Metrology"**. Chair Quality Management and Manufacturing Metrology, University Erlangen-Nuremberg, Disponível em: <[http://131.188.196.25:8080/eukom/project /description/eukom\\_english.pdf](http://131.188.196.25:8080/eukom/project /description/eukom_english.pdf)> Acesso em: 24 nov. 2005.
- [27] FLACK, D. **CMM Measurement Strategies**. National Physical Laboratory, NPL, UK, 2001.
- [28] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 17025: General requirements for the competence of testing and calibration laboratories**, 1999.
- [29] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME Y14.5M, Dimensioning and Tolerancing**, 1994.

- [30] HUANG, W.; KONG, Z.; CEGLAREK, D.; BRAHMST, E. **The Analysis of Feature-based Measurement Error in Coordinate Metrology**. IIE Transactions on Design and Manufacturing, Vol. 36, No. 3, pp. 237-251, 2004.
- [31] TAKAMASU K.; FURUTANI R.; OZONO S. **Basic concept of feature-based Metrology, Measurement**, 1999, pp.151-156.
- [32] WECKENMANN, A.; WEBER, H. ; EITZERT, H. ; GARMER, M. **Functionality-oriented Evaluation and Sampling Strategy in Coordinate Metrology**. Precision Engineering 17, Nr. 4, pp. 244-252, 1995.
- [33] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 8015: Technical drawings - Fundamental tolerancing principle**, 1985.
- [34] HUMIENNY, Z.; ET. AL. **Geometrical Product Specifications, A Course for Technical Universities**, Warsaw University of Technology Printing House, Poland, 2001.
- [35] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 1101: Geometrical Product Specifications (GPS) — Geometrical tolerancing — Tolerances of form, orientation, location and run-out**, 2004.
- [36] EDGEWORH, R.; WILHELM, R. **Adaptive sampling for coordinate metrology**. Precision Engineering, Vol. 23, 144-154, 1999.
- [37] MOORE, W.R. **Foundations of Mechanical Accuracy**, Moore Special Tool Company, 1970.
- [38] ABACKERLI, A. **Perfil do Uso das Máquinas de Medir por Coordenadas no Brasil**. Máquinas & Metais, Novembro 2000, 112-127.
- [39] PASIN, A.; DA SILVA, D.; CRNKOVIC, S. **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**. Anais do Metrologia 2003, Recife, Brasil, 2003.
- [40] NIELSEN, H.S. **Communicating Functional Requirements with GD&T**. International Dimensional Workshop, Nashville, EUA, 2004.
- [41] MCCALED, M.R. **A Conceptual Data Model of Datum Systems**, J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 104, 349, 1999.

- [42] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 286-1: ISO system of limits and fits -- Part 1: Bases of tolerances, deviations and fits**, 1988.
- [43] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/CD 14405: Geometrical Product Specifications (GPS) -- Geometrical tolerancing -- Linear size**, 2001.
- [44] CHAN, F.M.M.; KING, T.G.; STOUT, K.J. **The Influence of Sampling Strategy on a Circular Feature in Coordinate Measurements**. Measurement, Vol. 19, No. 2, pp 73-81, 1996.
- [45] NIELSEN, H.S. **An overview of Geometrical Product Specifications**. Disponível em: <<http://www.ifgps.com/An%20Overview%20of%20GPS.pdf>>. Acesso em: 28 nov. 2005.
- [46] NIELSEN, H.S. **Specifications, operators and uncertainties**. 8th CIRP International Seminar on Computer Aided Tolerancing, Charlotte, EUA, 2003.
- [47] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/TR 14638: Geometrical Product Specifications (GPS) – Masterplan**, 1995.
- [48] DURAKBASA, M.N.; AFJEHI-SADAT, A.; NOMAK, A. **Dimensional and Geometrical Measurements and Interperation of Measuring results on the Basis of the Skin Model**. Measurement Science Review, Volume 1, Number 1, 2001.
- [49] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14660-1: Geometrical Product Specifications (GPS) - Geometrical features - Part 1: General terms and definitions**, 1999.
- [50] SCHMIDT, A. **Aspectos da filtragem na medição de circularidade em máquinas de medir por coordenadas utilizando *scanning***. Florianópolis, 2005. Dissertação de Mestrado em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [51] GRIFFITH, G.K. **Measuring and Gaging Geometric Tolerances**. Prentice Hall, 1994.

- [52] DOWLING, M. M.; GRIFFIN, P. M.; TSUI, K.-L.; AND ZHOU, C. **Statistical issues in geometric feature inspection using coordinate measuring machines**. Technometrics. 39, 3-24, 1997.
- [53] ROMANO, D. **Baseline Uncertainty in Geometric Tolerance Inspection by Coordinate Measuring Machines: The Case of Position Tolerance with Maximum Material Condition**. Second Annual Conference on Business and Industrial Statistics. Disponível em: <<http://www2.nr.no/enbis/papers/rimini-romano.pdf>>. Acesso em: 03 nov. 2005.
- [54] SMITH, G.T. **Industrial Metrology: Surfaces and Roundness**. National Physical Laboratory, NPL, UK, 2002.
- [55] YAU, H.T. **Evaluation and Uncertainty Analysis of Vectorial Tolerances**. Precision Engineering, Vol. 20, No. 2, pp. 123-137, 1997.
- [56] GRZELKA, M.; RUCKI, M. **Analysis of the Accuracy Of The Gears' Measurement With The CMM**. Measurement Science Review, Volume 3, Number 3, 2003.
- [57] CRISTOFOLINI I.; CONCHERI G.; MENEGHELLO R.; WOLF G. **Geometric Dimensioning and Tolerancing (GD&T) versus Geometrical Product Specification (GPS)**. XII ADM International Conference, Vol. D1, p. 38-51, Rimini, 5-7 September, 2001.
- [58] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/TS 14253-1: Geometrical Product Specifications (GPS) - Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment - Part 1: Decision rules for proving conformance or non-conformance with specification**, 1998.
- [59] TRAPET, E. **Métodos prácticos para estimar la incertidumbre en mediciones y calibraciones con medidoras de coordenadas**. 3er. Congreso Español de Metrología, Ponencia 011, 2005.
- [60] QING LIU, C.; CHUCK, Z.H.; BEN WANG, P. **On the effects of CMM measurement error on form tolerance estimation**. Measurement, Vol. 30, No. 1, pp 33-47, 2001.
- [61] MORSE, E. **Artifact selection and its role in CMM evaluation**. International Display Workshops, Hiroshima, 2002. Disponível em: <

<http://www.coe.uncc.edu/~emorse/research/papers/IDW%202002.pdf>>. Acesso em: 03 nov. 2005.

- [62] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/TS 17450-2: Geometrical product specifications (GPS) - General concepts - Part 2: Basic tenets, specifications, operators and uncertainties**, 2002.
- [63] WECKENMANN, A.; LORZ, J. **Monitoring coordinate measuring machines by calibrated parts**. Journal of Physics: Conference Series, Volume: 13, 190-193, 2005.
- [64] FRANCESCHINI, F.; GALETTO, M.; SETTINERI, L. **On-Line Diagnostic Tools for CMM Performance**. Int J Adv Manuf Technol, Vol 19, 125–130, 2002.
- [65] AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP. **Análise de Sistemas de Medição**: Terceira Edição Brasileira, 2004.
- [66] NIELSEN, H.S. **CMMs and Proficiency Testing**. International Dimensional Workshop, Bonn, Germany, 2002.
- [67] NORONHA, J.; SCHNEIDER, C.A. **Calibração De Medidas Materializadas Em Máquinas de Medir por Coordenadas**. Anais do Metrologia 2003, Recife, Brasil, 2003.
- [68] PHILIPS, S. D.; BORCHARDT, W. T.; ESTLER, W. T.; BUTTRESS, J. **The estimation of measurement uncertainty of small circular features measured by coordinate measuring machines**, Precision Engineering, Vol. 22, 87-97, 1998.
- [69] LEVENSON, M.S.; EBERHARDT, K.R.; PHILLIPS, S.D.; ESTLER, W.T. **Calculation of Measurement Uncertainty Using Prior Information**. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Vol. 103, No. 6., 1998.
- [70] HÄRTIG, F.; TRAPET, E; WÄLDELE, F.; WIEGAND, U. **Traceability of Coordinate Measurements according to the Virtual CMM Concept**. Proceedings of the 5th IMEKO TC-14 Symposium on Dimensional Metrology in Production and Quality Control, Universidad de Zaragoza, Espanha, pp. 245-254, 1995.

- [71] TRENK, M.; FRANKE, M.; SCHWENKE; H. **The "Virtual CMM", a Software Tool for Uncertainty Evaluation - Practical Application in an Calibration Lab**, Proceedings of: Uncertainty Analysis in Measurement and Design, Summer Topical Meeting, Pennsylvania State University, 30.6.-1.7., 2004.
- [72] SUMMERHAYS, K.D.; BALDWIN, J.M.; CAMPBELL, D.A. HENKE, R.P. **Estimating Task-Specific Measurement Uncertainty in Three Dimensional Metrology**, Disponível em: <<http://www.metrosage.com/pundit.htm>> Acesso em: 15 dez. 2005.
- [73] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10360-5: Geometrical Product Specifications (GPS) - Acceptance and reverification test for coordinate measuring machines (CMM) - Part 5: CMMs using multiple-stylus probing systems**, 2000.
- [74] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **B89.4.1: Methods for Performance Evaluation of Coordinate Measuring Machines**, 1997.
- [75] ABBE, M.; TAKAMASU, K. **Modelling of Spatial Constraint in CMM Error for Uncertainty Estimation**, Euspen2002, p.637-640, Eindhoven, May 2002.
- [76] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/DGuide 99998: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) -- Supplement 1: Numerical methods for the propagation of 2004**.
- [77] YAN, Z.; MENQ, C.H. **Uncertainty Analysis and Variation Reduction of Three Dimensional Coordinate Metrology, Part 2: Uncertainty Analysis**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 39, No. 8, pp. 1219-1238, 1999.
- [78] YAN, Z.; YANG, B.D.; MENQ, C.H. **Uncertainty Analysis and Variation Reduction of Three Dimensional Coordinate Metrology, Part 1: Geometric Error Decomposition**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 39, No. 8, pp. 1199-1217, 1999.
- [79] YAN, Z.; MENQ; C.H. **Uncertainty Analysis and Variation Reduction of Three Dimensional Coordinate Metrology, Part 3: Variation Reduction**, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 39, No. 8, pp. 1239-1261, 1999.

- [80] CHOI, W.; KURFESS, T.R. **Uncertainty of extreme fit evaluation for three-dimensional measurement data analysis**. Computer-Aided Design, Vol. 30, No. 7, p. 549 -557, 1998.
- [81] TRAPET E.; SAVIO E.; DE CHIFFRE L. **New Advances In Traceability Of Cmms For Almost The Entire Range Of Industrial Dimensional Metrology Needs**. Annals of CIRP, 53/1, p. 433-438, 2004.
- [82] OSAWA, S.; BUSCH, K.; FRANKE, M.; SCHWENKE, H. **Multiple orientation technique for the calibration of cylindrical workpieces**. Precision Engineering 29, pp. 56–64, 2005.
- [83] SAVIO E.; DE CHIFFRE L.; **An artefact for traceable freeform measurements on coordinate measuring machines**, Precision Engineering, 17 Nr 1, pp. 58-60, 2002.
- [84] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/DTS 15530-2 Geometrical Product Specifications (GPS) Coordinate measuring machines. (CMMs): Techniques for evaluation of the uncertainty of measurement. Part 2: Use of multiple measurements strategies in calibration of artifacts**, 2005.
- [85] JIANG, B.C.; CHIU, S.-D. **Form tolerance-based measurement points determination with CMM**. Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 13, Núm. 2, 2002.
- [86] STARCZAK M.; JAKUBIEC W. **Optimisation of Measuring Strategies in Coordinate Measuring Technique**. Measurement Science Review, Volume 1, Number 1, 2001.
- [87] OLIVEIRA, A. **Validação de processos de medição por coordenadas em operações de controle da qualidade**. Florianópolis, 2003. Dissertação de Mestrado em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [88] LEAKE, D. B. **Case-Based Reasoning: Experiences, Lessons & Future Directions**, AAAI Press/ MIT Press, 1995.

- [89] HOLUB, J.; SMID, R.; VEDRAL, J. **A rule-based expert system guide on uncertainty for metrologists**. Disponível em: <<http://imeko.mit.tut.fi/VW2001/Papers%5CGiardini%5CGiardini.pdf>>. Acesso em: 03 nov. 2005.
- [90] HENKLEIN, P.; ROLIM, J.G. **Raciocínio Baseado em Casos Aplicado ao Diagnóstico de Transformadores de Potência**, XVII CBA - Congresso Brasileiro de Automática, Gramado - RS, 2004.
- [91] HECKMANN, J.R. **Identificação de Potenciais Aplicações da Inteligência Artificial na Metrologia**. Florianópolis, 1999. Dissertação de Mestrado em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [92] COST, S.; SALZBERG, S. **A weighted nearest neighbor algorithm for learning with symbolic features**, Machine Learning 10, 57-78, 1993.
- [93] SAVIO E.; HANSEN H.N.; DE CHIFFRE L.; **Approaches to the Calibration of Freeform Artefacts on Coordinate Measuring Machines**, CIRP (P session) 2002.
- [94] FLACK, D. **CMM Verification**. National Physical Laboratory, NPL, UK, 2001.
- [95] FLACK, D. **CMM Probing**. National Physical Laboratory, NPL, UK, 2001.
- [96] CROSS, N. **Measurement Strategies for CMMs**. DMAC Seminars at Inspex 2004. Disponível em: <[http://www.npl.co.uk/dmac/meetings/inspex\\_sep\\_04/presentations/measurement\\_strategies\\_for\\_cmms.pdf](http://www.npl.co.uk/dmac/meetings/inspex_sep_04/presentations/measurement_strategies_for_cmms.pdf)>. Acesso em: 03 nov. 2005.
- [97] CROSS, N. **A Beginner's Guide to CMMs**. DMAC Seminars at Inspex 2003. Disponível em: <[http://www.npl.co.uk/dmac/meetings/11\\_nov\\_2003/presentations/beginners\\_guide\\_cmms\\_cross.pdf](http://www.npl.co.uk/dmac/meetings/11_nov_2003/presentations/beginners_guide_cmms_cross.pdf)>. Acesso em: 03 nov. 2005.
- [98] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/TS 14253-2: 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**, 1999.
- [99] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10360-2: Geometrical Product Specifications (GPS) - Acceptance and reverification**

**test for coordinate measuring machines (CMM) - Part 2: CMMs used for measuring size, 2001.**

[100] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10360-3: Geometrical Product Specifications (GPS) - Acceptance and reverification test for coordinate measuring machines (CMM) - Part 3: CMMs with the axis of a rotary table as the fourth axis, 2000.**

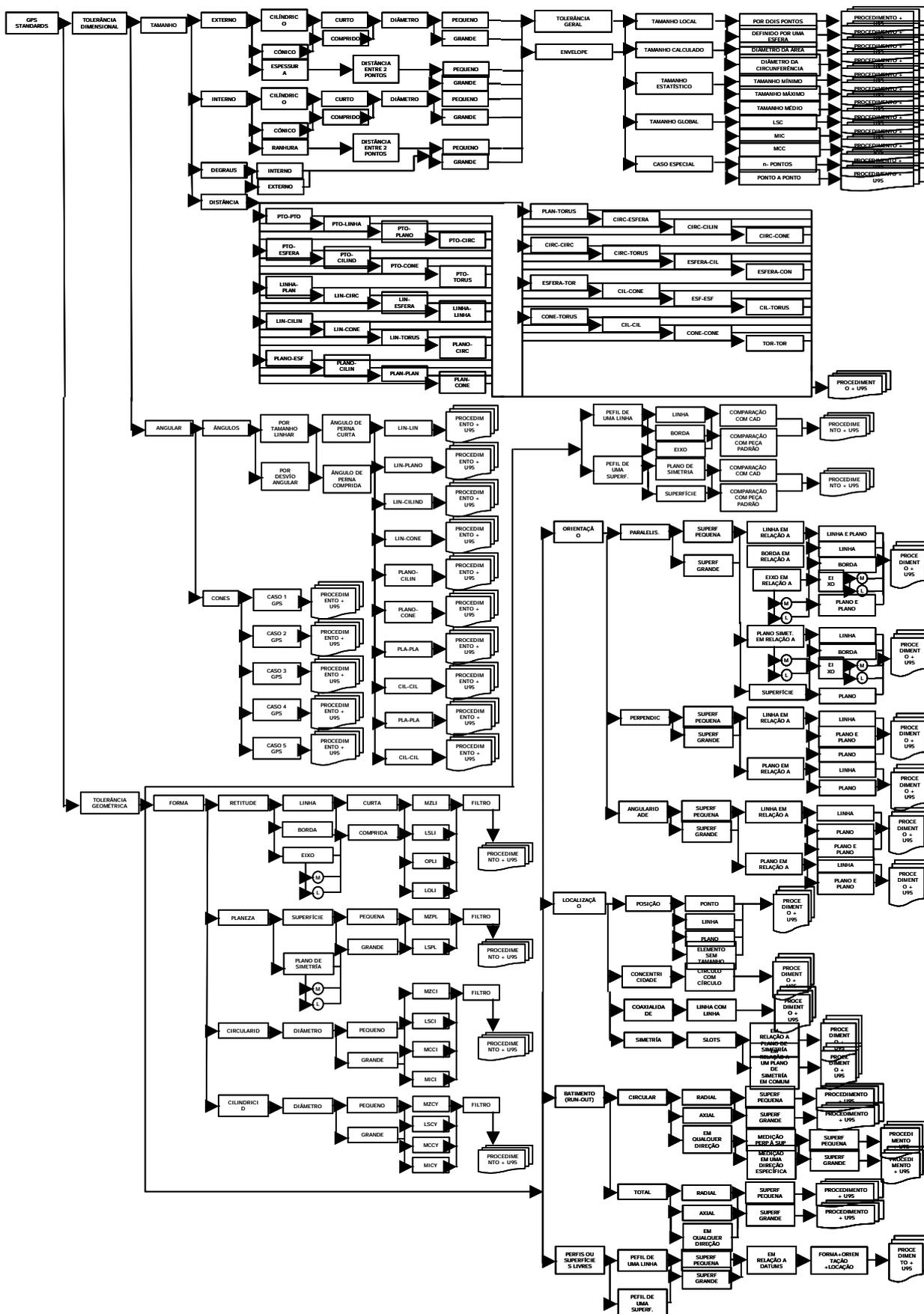
[101] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10360-4: Geometrical Product Specifications (GPS) - Acceptance and reverification test for coordinate measuring machines (CMM) - Part 4: CMMs used in scanning measuring mode, 2000.**

[102] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10360-6: Geometrical Product Specifications (GPS) - Acceptance and reverification test for coordinate measuring machines (CMM) - Part 6: Estimation of errors in computing Gaussian associated features, 2001.**

[103] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. **VDI/VDE 2631 Blatt 9: Form measurement - Examples for measurement and analysis conditions, 2003.**

[104] GOLDHAHN, L.; KRETZSCHMAR, H.; KAISER, M. **Development and application of multimedia quality inspection plans at Coordinate Measuring Machines.** VIth International Scientific Conference Coordinate Measuring Technique Bielsko-Biala Number 10, 49 – 54, 2004.

# APÊNDICE 1: AS CARACTERÍSTICAS GPS



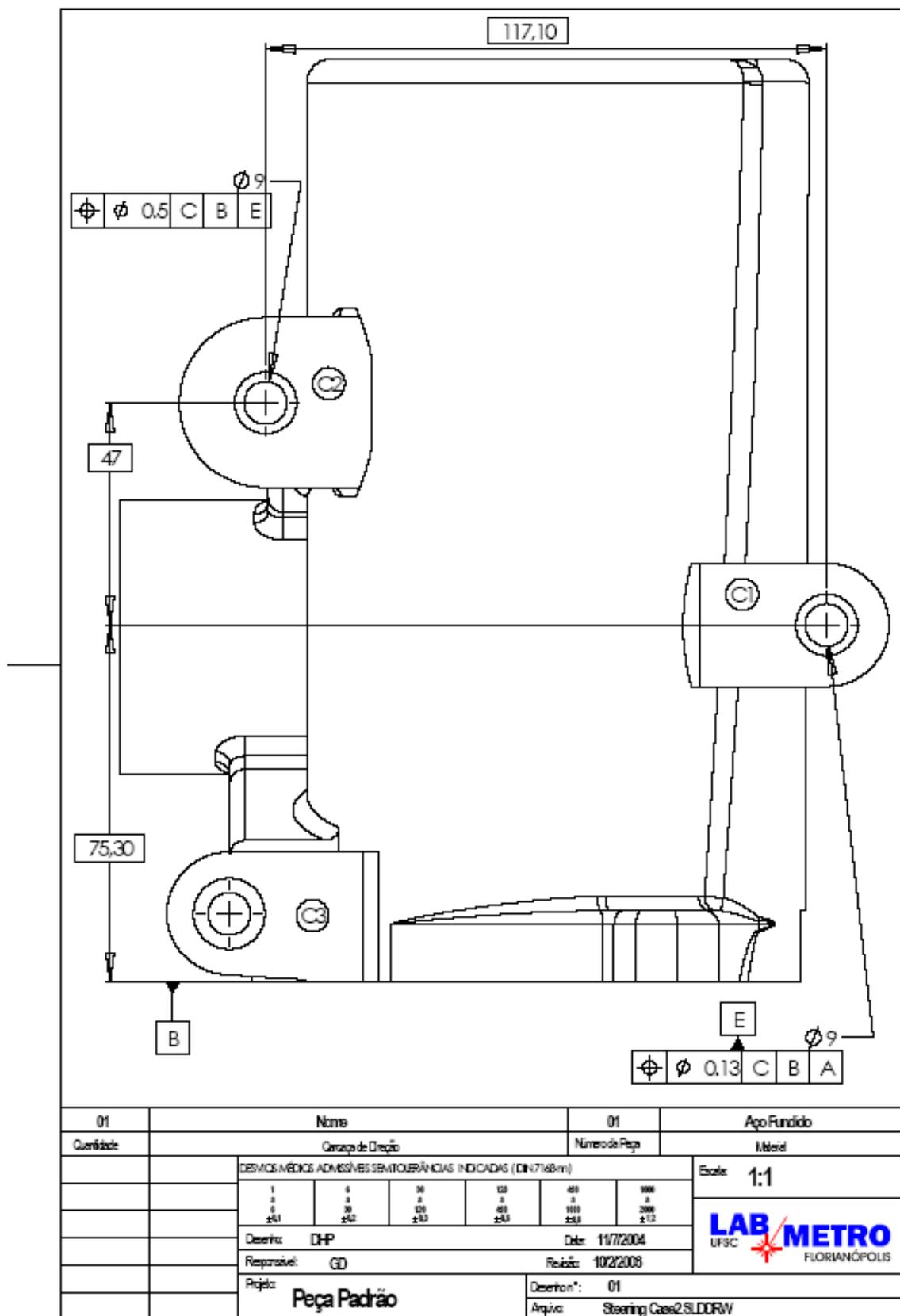
# APÊNDICE 2: A MATRIZ DE NORMAS GPS

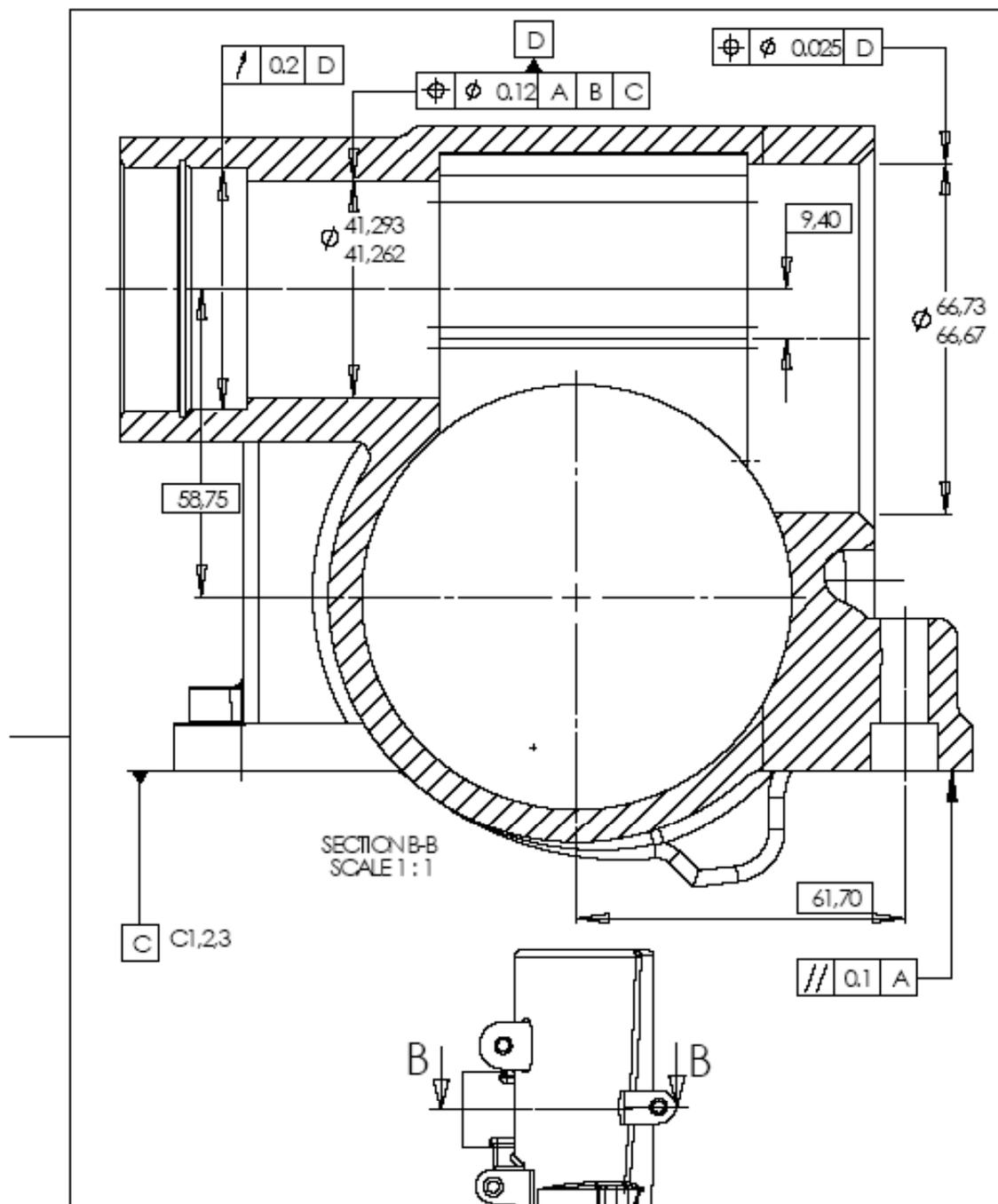
Normas ISO-GPS Globais								
1, 14995-1a, 14995-2a, 16610-01a, 16610-20a, 16610-22a, 16610-29a, 16610-31a, 16610-32a, 16610-40a, 16610-41a, 16610-49a, 16610-60a, 17450-1a, 17450-2								
Normas Gerais								
Característica	Sub-característica	10579		14660-1, 14660-2	14253-1	14253-2, 14253-3, 14660-1, 14660-2, 16015a,	10360-1, 10360-2, 10360-3, 10360-4, 10360-5, 10360-6, 14253-2, 14253-3, 14978a, 16015a,	10360-1, 10360-2, 10360-3, 10360-4, 10360-5, 10360-6, 14253-2, 14253-3, 14978a, 16015a,
		1 Código	2 Definição Nominal	3 Definição Real	4 Comparação	5 Procedimento de Medição	6 Dispositivo de Medição	7 Calibração
Tamanho	Baseado em códigos de tolerâncias	129, 129-1a, 129-2a, 14405a, 286-1, 406, 8015	129-2a, 14405a, 1938, 286-1, 286-2, 406, 8015	14405a, 1938		14405a, 1938	1938, 3650, 7863	1938, 3650, 7863
	Baseado em tolerâncias ± e tolerâncias (E)	129, 129-1a, 129-2a, 14405a, 406, 8015	129-2a, 14405a, 406, 8015	14405a, 8015		14405a, 8015	3650, 7863	3650, 7863
Distância	Distância linear	129, 129-1a, 129-2a, 406	129, 129-1a, 129-2a, 406			(16570)		
	Distância coordenada	129, 129-1a, 129-2a	129, 129-1a, 129-2a	129, 129-1a				
	Comprimento de arco	129, 129-1a						
Raio	129, 129-1a, 129-2a	129, 129-1a, 129-2a			(16570)			
Ângulo	Tamanho Angular	129, 129-1a, 129-2a, 406	129, 129-1a, 129-2a, 406			(8015)		
	Distância Angular							
Forma de uma linha independente de Elementos de Referência	Elemento Integral	Linha	1101, 1660, 7083	1101, 1660	(1101), (1660)		(1101), (1660)	
		Retitude	1101, 1101 AMDa, 7083	1101, 12780-1a, 12780-2a	(1101), 12780-1a, 12780-2a		(1101), 12780-1a, 12780-2a	
		Circularidade	1101, 1101 AMDa, 7083	1101, 12181-1a, 12181-2a, 6318	(1101), 12181-1a, 12181-2a		(1101), 12181-1a, 12181-2a	[4292], 4291
	Elemento Derivado	Linha	1101, 1660, 7083	1101, 1660	(1101), (1660)		(1101), (1660)	
		Retitude	1101, 2692, 2692 AMD, 7083	1101, 2692, 2692 AMD	(1101), (2692 AMD), (2692)		(1101), (2692 AMD), (2692)	
		Circularidade	1101, 7083	1101	(1101)		(1101)	
Forma de uma linha dependente de Elementos de Referência	Elemento Integral	1101, 1660, 7083	1101, 1660	(1101), (1660)		(1101), (1660)		
	Elemento Derivado	1101, 1660, 708	1101	(1101)		(1101)		
Forma de uma superfície independente de Elementos de Referência	Elemento Integral	Forma de uma superfície	1101, 1660, 708	1101, 1660	(1101)		(1101)	
		Planeza	1101, 1101 AMDa, 7083	1101, 12781-1a, 12781-2a	(1101), 12781-1a, 12781-2a		(1101), 12781-1a, 12781-2a	
		Cilindricidade	1101, 1101 AMDa, 7083	1101, 12780-1a, 12780-2a	(1101), 12780-1a, 12780-2a		(1101), 12780-1a, 12780-2a	
	Elemento Derivado	Cones	1101, 3040, 7083	1101, 3040	(1101), (3040)		(1101), (3040)	
		Forma de uma superfície	1101, 7083	1101	(1101)		(1101)	
		Planeza	1101, 2692, 2692 AMD, 7083	1101, 2692, 2692 AMD	(1101), (2692 AMD), (2692)		(1101), (2692 AMD), (2692)	
Forma de uma superfície dependente de Elementos de Referência	Elemento Integral	1101, 1660, 7083	1101, 1660	(1101)		(1101)		
	Elemento Derivado	Cones	1101, 3040, 7083	1101, 3040	(1101)		(1101)	
Orientação	Elemento Integral (linha ou superfície)	Angularidade	1101, 7083	1101	1101		(1101)	
		Perpendicularidade	1101, 7083	1101	1101		(1101)	
		Paralelismo	1101, 7083	1101	1101		(1101)	
	Elemento Derivado (linha ou superfície)	Angularidade	10578, 1101, 2692, 2692 AMD, 7083	10578, 1101, 2692, 2692 AMD	1101		(1101)	
		Perpendicularidade	10578, 1101, 2692, 2692 AMD, 7083	10578, 1101, 2692, 2692 AMD	1101		(1101)	
		Paralelismo	10578, 1101, 2692, 2692 AMD, 7083	10578, 1101, 2692, 2692 AMD	1101		(1101)	
Localização	Elemento Integral	Posição	1101, 7083	1101, 5458	(1101), (5458)		(1101), (5458)	
	Elemento Derivado	Posição	10578, 2692, 2692 AMD, 7083	10578, 1101, 2692, 2692 AMD, 5458	(10578), (1101), (2692 AMD), (2692), (5458)		(10578), (1101), (2692 AMD), (2692), (5458)	
		Coaxialidade	10578, 1101, 2692, 2692 AMD, 2692 AMD	10578, 1101, 2692, 2692 AMD	(10578), (1101), (2692 AMD), (2692)		(10578), (1101), (2692 AMD), (2692)	
		Concentricidade	10578, 1101, 2692, 2692 AMD, 7083	10578, 1101, 2692, 2692 AMD	(10578), (1101), (2692 AMD), (2692)		(10578), (1101), (2692 AMD), (2692)	
		Simetria	10578, 1101, 2692, 2692 AMD, 7083	10578, 1101, 2692, 2692 AMD	(1101), (2692 AMD), (2692)		(10578), (1101), (2692 AMD), (2692)	
Batimento Radial		1101, 7083	1101	(1101)		(1101)		
Batimento Total		1101, 7083	1101	(1101)		(1101)		
Elementos de Referência	Elemento de Referência Simples	1101, 2692, 2692 AMD, 5459, 5459-1a, 5459-2a, 7083	1101, 2692, 2692 AMD, 5459, 5459-1a, 5459-2a	(5459), 5459-3a		(5459), 5459-3a		
	Elemento de Referência Comum	1101, 5459, 5459-1a, 5459-2a, 7083	1101, 5459, 5459-1a, 5459-2a	(5459), 5459-3a		(5459), 5459-3a		
	Elemento de Referência Alvo	1101, 5459, 5459-1a, 5459-2a, 7083	1101, 5459, 5459-1a, 5459-2a	(5459), 5459-3a		(5459), 5459-3a		
	Sistema de Elemento de Referência	1101, 5459, 5459-1a, 5459-2a, 7083	1101, 5459, 5459-1a, 5459-2a	(5459), 5459-3a		(5459), 5459-3a		
Textura Superficial	Perfil de Rugosidade	1302a, DS 58	11562, 4287, 12085, 13565-1, 13565-2, 13565-3	11562, 4287, 4288, 12085, 13565-1, 13565-2, 13565-3		11562, 4287, 4288, 12085, 13565-1, 13565-2, 13565-3	3274	12179, 5436-1, 5436-2
	Perfil Ondulado	1302a, DS 58	11562, 12085, 4287	11562, 4287, 4288, 12085		11562, 4287, 4288, 12085	3274	12179, 5436-1, 5436-2
	Perfil Primário	1302a, DS 58	11562, 4287, 13565-3	11562, 4287, 4288, 13565-3		11562, 4287, 4288, 13565-3	3274	12179, 5436-1, 5436-2
Imperfeições Superfíc. Cantos		8785	8785					
		13715	13715					

α = Norma em fase de DRAFT    ( ) = Especificação do operador incompleta    [ ] = Inconsistente com a especificação do operado

NORMAS ISO-GPS FUNDAMENTAIS

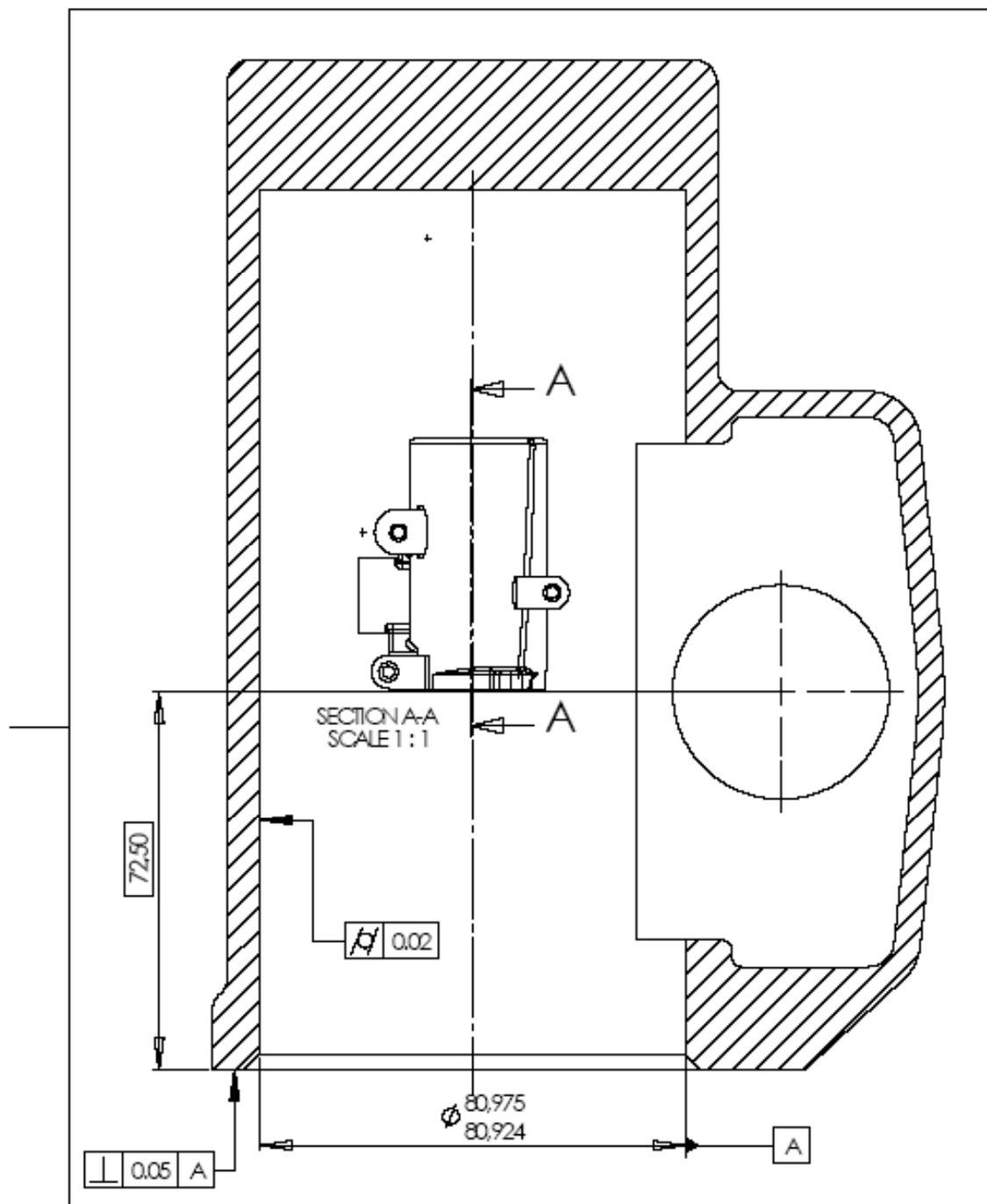
## APÊNDICE 3: VISTAS DA CARÇAÇA HSG-P/S





01	Nome	01	Aço Fundido
Quantidade	Concepção de Desenho	Número de Peça	Metal
DESAIOS MÉDICOS ADMISSÍVEIS SEM TOLERÂNCIAS INDICADAS (DIN 7168m)			Escale: 1:1
	1 ±0.1	30 ±0.2	100 ±0.3
	20 ±0.1	100 ±0.2	300 ±0.3
Desenho:	DHP	Data:	11/7/2004
Responsável:	GD	Revisão:	10/2/2008
Projeto:	Peça Padrão	Desenho:	01
		Arquivo:	Steering Cass2.SLDRW





01	Nome	01	Aço Fundido
Quantidade	Grupo de Desenho	Numero de Peça	Mensl
	DESMOS A BÓDICO ADMISSÍVEIS SEM TOLERÂNCIAS INDICADAS (DIN 7168-m)		Escala: 1:1
	1 ±0.1	6 ±0.2	30 ±0.3
	10 ±0.4	40 ±0.5	100 ±0.6
	200 ±1.0	500 ±1.2	1000 ±1.5
	Descrição: DHP	Data: 11/7/2004	
	Responsável: GD	Revisão: 10/2/2008	
	Projeto: Peça Padrão	Desenho*: 01	
		Arquivo: Steering Case2.SLDDRW	