

Francisco Augusto Arenhart

**Desempenho Metrológico de Máquinas de
Medição por Coordenadas no Âmbito
Industrial Brasileiro**

Florianópolis, maio de 2007.

Desempenho Metrológico de Máquinas de Medição por Coordenadas no Âmbito Industrial Brasileiro

Trabalho submetido à ABCM para participação do Prêmio ABCM-Yehan Numata, na categoria de graduação.

Autor: Francisco Augusto Arenhart, graduando do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientadores:

Prof. Gustavo Daniel Donatelli, Dr. Eng.
Christian Raffaello Baldo, M.Sc.

Florianópolis, maio de 2007.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Prof. Gustavo Donatelli, por ter me aberto as portas ao universo da metrologia e pela confiança depositada ao longo dos anos.

Ao orientador Crhistian R. Baldo, pela oportunidade de participação no trabalho e pelas discussões desenvolvidas, o que proporcionou um grande meio de aprendizado.

À Fundação CERTI (em especial ao Eng. Mateus Dieckmann de Oliveira e ao Eng. Alexandre Lucas), por todo a suporte fornecido para as realizações dos experimentos.

Às empresas participantes, pelo acolhimento da idéia e pelas horas cedidas aos experimentos.

RESUMO

Os processos de produção estão sujeitos a fatores que de forma mais ou menos significativa afetam a qualidade do produto final. Os processos de medição, da mesma forma, apresentam susceptibilidade a fatores como condições ambientais, exatidão dos equipamentos de medição, capacitação dos operadores e planejadores da medição, etc., os quais podem influenciar, também de forma mais ou menos significativa, a qualidade do produto final deste tipo de processo: o resultado de medição.

O presente trabalho é resultado final do estágio de conclusão de curso em Engenharia Mecânica na Universidade Federal de Santa Catarina, realizado no período de 1º de maio a 21 de agosto de 2006, com dois objetivos: gerar um banco de dados de medições reais que servirá a um projeto de doutorado, e realizar um estudo sobre alguns dos fatores de influência mais relevantes em medição por coordenadas, sendo este último o objeto específico desta monografia.

Para investigar o grau de influência de cada uma das principais fontes de erro em medição por coordenadas, foi planejado e desenvolvido um estudo comparativo experimental com algumas empresas brasileiras. Como meio de comparação, foi conduzida uma intercomparação a partir de uma peça padrão com especificações geométricas de produto (GPS) calibradas. Para complementar os experimentos, foram efetuadas medições em artefatos de referências e em peças das próprias empresas, as quais foram posteriormente calibradas. O estudo contou com a participação de três empresas de produção metal-mecânica automotiva, uma montadora de sistemas de direção, e um laboratório de calibração.

Os resultados que serão aqui apresentados podem ser vistos como uma pequena amostra, mas consideravelmente representativa, da situação global da medição por coordenadas industrial brasileira.

SUMÁRIO

1. DESEMPENHO METROLÓGICO NA MEDIÇÃO POR COORDENADAS.....	6
1.1. FONTES DE ERRO EM MEDIÇÃO POR COORDENADAS	6
1.1.1. Erros relativos à estrutura da máquina de medição	7
1.1.2. Erros relativos ao sistema de apalpação.....	11
1.1.3. Erros relativos ao ambiente de medição	17
1.1.4. Erros relativos ao software de medição	19
1.1.5. Erros relativos à peça, estratégia e operador.....	21
1.2. ESTRATÉGIAS DE MEDIÇÃO E AVALIAÇÃO: ESPECIFICAÇÕES GEOMÉTRICAS EM MEDIÇÃO POR COORDENADAS.....	24
1.2.1. A estratégia de medição.....	25
1.2.2. A estratégia de avaliação	27
1.3. RASTREABILIDADE E INCERTEZA EM MEDIÇÃO POR COORDENADAS.....	32
2. ESTUDO COMPARATIVO DE MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS	36
2.1. DEFINIÇÃO DA PEÇA PADRÃO CALIBRADA	37
2.1.1. Estratégias de medição e avaliação.....	38
2.1.2. Calibração da peça	39
2.2. REALIZAÇÃO DA COMPARAÇÃO UTILIZANDO A PEÇA PADRÃO ...	40
2.2.1. Procedimento de medição.....	40
2.2.2. Análise de variâncias	41
2.2.3. Análise pelas cartas de tendência e amplitude	46
2.3. ENSAIOS DE VERIFICAÇÃO DOS APALPADORES	48
2.4. ESTUDO UTILIZANDO PEÇAS DAS EMPRESAS	50
3. CONCLUSÕES	54
4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
ANEXO I – Desenho Simplificado da Peça Padrão.....	58
ANEXO II – Estratégia de Medição e Valores Calibrados da Peça Padrão	61

1. DESEMPENHO METROLÓGICO NA MEDIÇÃO POR COORDENADAS

O conhecimento das potencialidades de um sistema de medição é de extrema importância para a definição da metrologia que será responsável pelo controle das especificações de projeto de um produto. Mais importante do que conhecer as potencialidades, entretanto, é conhecer as limitações que apresentam os sistemas de medição. Neste capítulo serão abordados alguns aspectos relevantes da tecnologia de medição por coordenadas, com ênfase àqueles relacionados ao trabalho desenvolvido.

1.1. FONTES DE ERRO EM MEDIÇÃO POR COORDENADAS

A tecnologia de medição por coordenadas trouxe para o campo da metrologia dimensional significativa flexibilidade e versatilidade, principalmente a partir da década de 80, quando foram introduzidas as primeiras máquinas utilizando sistemas de controle automatizados (CNCs). Entretanto, a complexidade desta tecnologia, em termos construtivos, operacionais e de processamento de dados, acarreta uma vasta gama de fatores que podem ter influência, positiva ou negativa, sobre o resultado de uma medição, exigindo o gerenciamento adequado para que se possa tirar o maior proveito da tecnologia.

No que diz respeito às fontes de erro de medição, a literatura de medição por coordenadas usualmente as subdivide em grupos de influência. Uma das formas de classificação mais difundidas considera quatro grandes grupos: equipamento, ambiente, peça e operador. A figura 1.1 apresenta um extrato das fontes de erros normalmente mais relevantes na medições com uma máquina de medição por coordenadas convencional, sendo importante observar que as fontes indicadas não são necessariamente independentes.

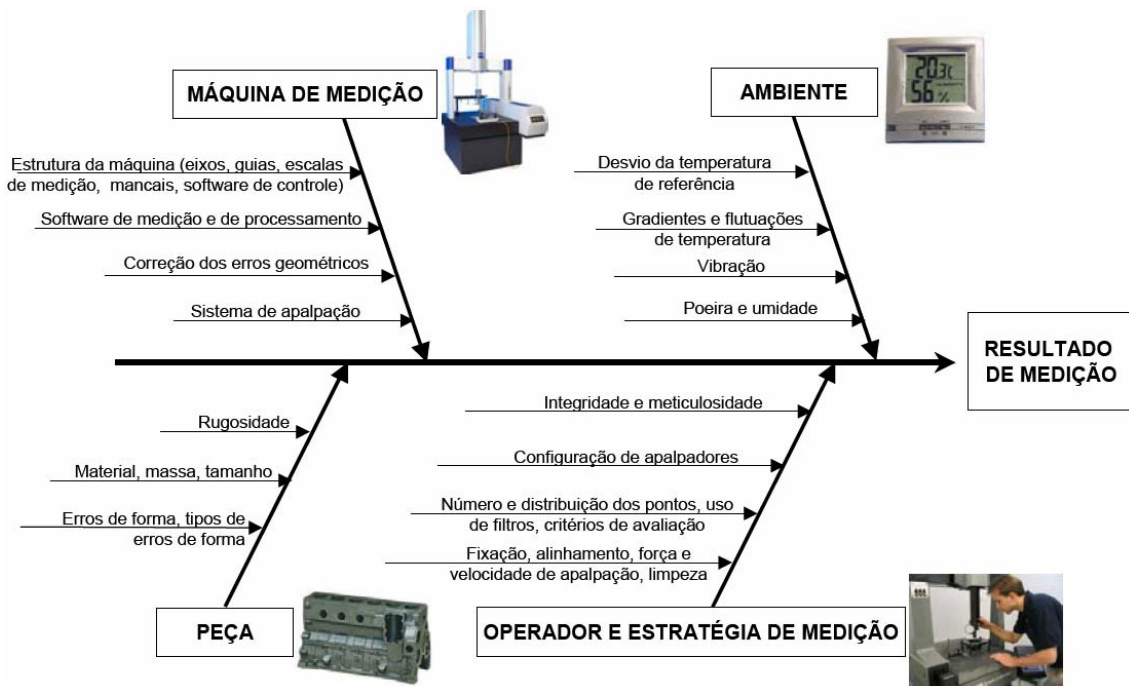


Figura 1.1 – Diagrama de Ishikawa das principais fontes de erro em medição por coordenadas (cedido por [1])

1.1.1. Erros relativos à estrutura da máquina de medição

As fontes de erro em uma máquina de medição por coordenadas são geralmente constituídas por aspectos estruturais mecânicos, construtivos e de montagem, envolvendo os elementos da máquina (guias, mancais, escalas). O modelo mais amplamente utilizado para descrever os erros geométricos resultantes da parte estrutural é o de corpo rígido [2].

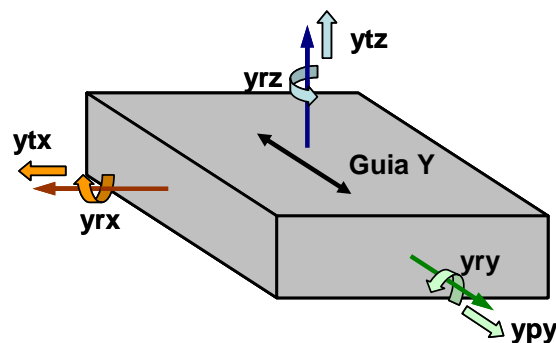


Figura 1.2 – Modelo de erros paramétricos de uma guia rígida

Considerando o modelo de corpo rígido para uma guia apenas (a guia Y, no exemplo), existem seis graus de liberdade (três de rotação e três de translação) que podem gerar erros de deslocamentos do sistema de apalpação em relação às escalas. Erros de rotação desta podem se dar em torno do eixo

Z (yrz), movimento denominado “guinada” (*yaw*), em torno do eixo X (yrx), denominado este de “arfagem” (*pitch*), ou em torno do próprio eixo Y (yry), chamado este de “rolagem” (*roll*). Erros de translação podem ser de retitude das guias (ytz e ytx) ou advindos das escalas (ypy).

Cada guia em uma MMC apresenta estes seis erros, constituindo, em uma máquina tipo portal, por exemplo, 18 erros paramétricos. Além destes, existem ainda três erros de esquadro (perpendicularidade) entre as guias/escalas (xwy, ywz e zwx), como ilustrado na figura 1.3 (a), totalizando os 21 erros geométricos encontrados nas máquinas de medição por coordenadas com três eixos. Tais desvios geométricos podem ser advindos da fabricação (erros de planeza e retitude), montagem (e ajustes mecânicos) ou desgaste dos elementos.

Em uma MMC tipo portal, os erros que trazem influência mais acentuada sobre os resultados, devido a sua magnitude, costumam ser os erros de perpendicularidade e de escala [3]. A ortogonalidade entre as guias é ajustada mecanicamente na montagem (ou manutenção), pelos parafusos que fixam os mancais aos elementos estruturais, donde podem surgir estes erros. Outro ajuste feito durante a montagem é o de alinhamento das escalas com as guias (figura 1.3 [b]). Estes, quando presentes, provocam erros de 2ª ordem, proporcionais ao afastamento do ponto de referência.

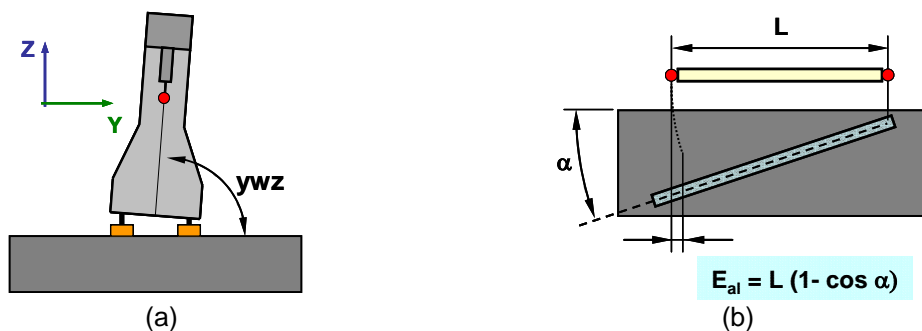


Figura 1.3 – Erros advindos da não-ortogonalidade entre as guias (a) e do não-alinhamento entre escala e guia (b)

Além dos desvios de origem construtiva, há outros fatores que provocam alterações estruturais, como flexão mecânica (estática e dinâmica) e distorções causadas por gradientes térmicos. A flexão mecânica pode ser provocada pelo peso próprio das guias, ou pelo carregamento excessivo sobre o desempenho. Os efeitos dinâmicos incluem as distorções estruturais causadas pela variação

do vetor velocidade quando, por exemplo, quando o portal de uma máquina desacelera para entrar em velocidade de apalpação, ou durante um *scanning* (varredura com aquisição contínua de pontos sobre uma superfície), onde a direção do vetor velocidade está continuamente variando. Também, pela variação da carga sobre as guias na medida em que as partes móveis se deslocam sobre as mesmas.

Assim, o que ocorre na prática é uma combinação destes efeitos, o que torna extremamente complexa (senão impraticável) a tarefa de tratar matematicamente todas essas fontes de erro. Na figura 1.4 é representado um esquema mostrando uma forma de manifestação de um erro de rotação (yrx), devido ao empenamento de uma das guias, abordado matematicamente de maneira simplista:

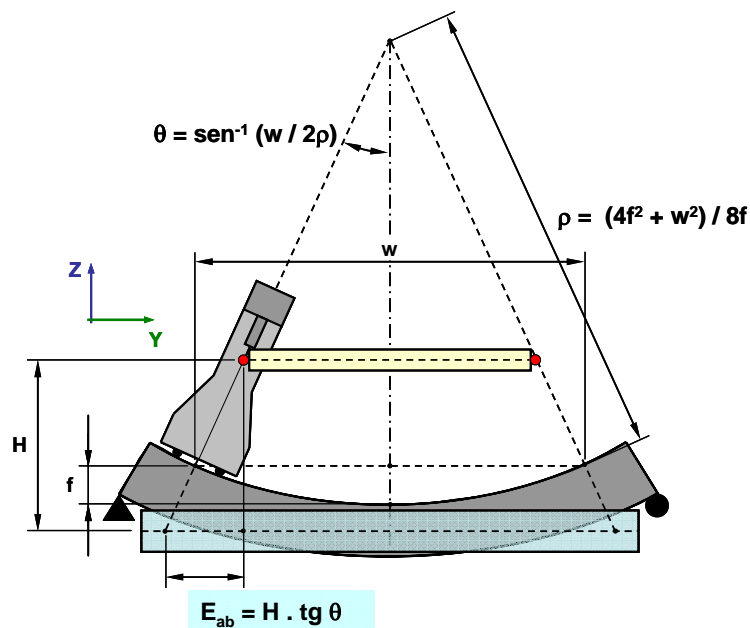


Figura 1.4 – Erro de posicionamento do sistema de apalpação em relação à escala derivado de um erro de arfagem (yrx)

onde H é a distância entre o padrão e a escala, ρ , w e f são, respectiva e aproximadamente, raio de curvatura, corda e flecha definidos na circunferência formada pelo empenamento da guia. O empenamento mostrado pode ser de origem geométrica (desvio de retitude de baixa frequência advindo da fabricação da guia), de origem térmica (calor gerado e não retirado de sob o desempenho), de origem mecânica estática (peça com excessivo peso sobre o desempenho), de origem mecânica dinâmica (durante o deslocamento do portal)

ou ainda, o que mais freqüentemente estará ocorrendo, uma combinação de todos estes fatores.

Existem alguns métodos empíricos, como as técnicas de rebatimento (onde a peça é medida em distintas orientações) e da substituição (onde artefatos de referência com características geométricas similares são medidos para compensação dos erros), as quais permitem minimizar a influência de alguns dos erros geométricos como erros de ortogonalidade e de escala.

A maioria das máquinas atualmente apresentam, em algum nível, compensação numérica via software [4]. Uma forma de compensação via software é pelo monitoramento das temperaturas da estrutura, que normalmente (mas não somente) utilizam modelos de compensação lineares, atuando em tempo real nas medições.

Outro recurso, conhecido como CAA (*computer aided accuracy*), procura atuar sobre os erros remanescentes da fabricação e da montagem, sendo, em princípio, a última etapa dos esforços feitos para minimizar os erros de origem estrutural. O princípio do recurso de CAA baseia-se no mapeamento dos erros geométricos de um determinado volume de medição, utilizando medições feitas em artefatos de referência (por exemplo, padrões escalonados, placas de esferas, etc.) com o intuito de compensá-los, minimizando assim sua influência sobre as medições.

Uma limitação à funcionalidade do uso de CAA para correção dos erros geométricos, entretanto, é o fato de ele exigir que o ambiente esteja (e permaneça) em condições estáveis. Do contrário, a matriz de correção ficará contaminada por erros não sistemáticos induzidos por variações térmicas volumétricas e temporais. Cabe ressaltar que, devido à instabilidade da máquina/ambiente ao longo do tempo, a matriz de correção deve ser periodicamente reajustada.

Para garantir que os erros da máquina continuem dentro dos parâmetros especificados a partir de um ajuste, e também definir de maneira confiável qual o intervalo adequado para execução de novos ajustes (ou verificações completas), recomenda-se a implementação de ensaios de verificação rápida (*interim checks*) [3], [5], [6]. Os ensaios podem ser feitos utilizando-se peças padrão ou artefatos de referência (como bloco, anéis, esferas, padrões

escalonados, barra de esferas, tetraedros, etc.), podendo a avaliação dos dados beneficiar-se de ferramentas estatísticas, como as cartas de controle.

1.1.2. Erros relativos ao sistema de apalpação

A parcela de erro introduzida pelo sistema de apalpação no resultado de medição engloba tanto efeitos sistemáticos como aleatórios, sendo os primeiros relativamente nulificados caso boas práticas sejam observadas. Existem, desde a década de 70, duas tecnologias dominantes de sistemas de apalpação por contato: os compostos por apalpadores comutadores (“*touch trigger probes*”) e os compostos por apalpadores medidores (“*measuring probes*”).

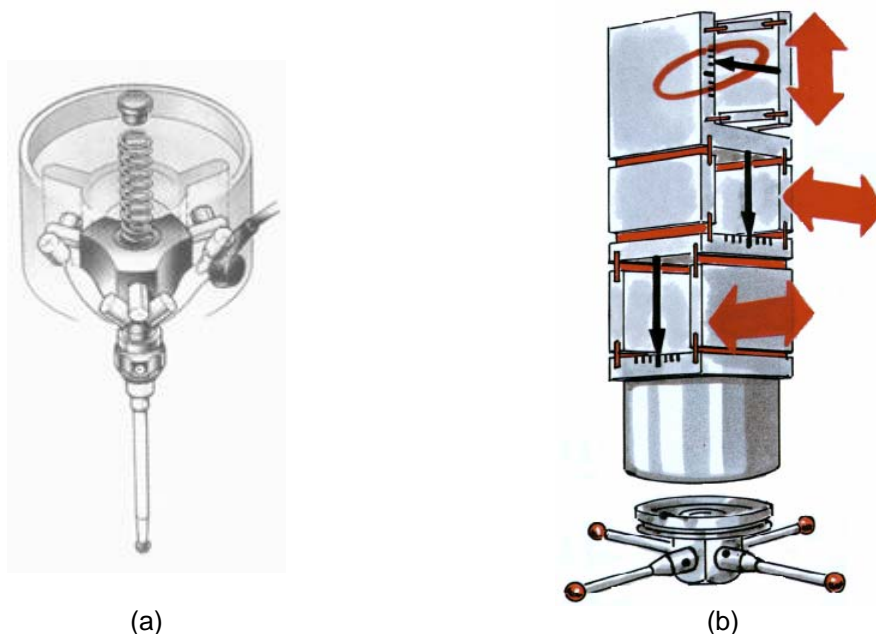


Figura 1.5 – Princípios construtivos dos sistemas de apalpação comutador (a) e apalpador (b) (fontes: Renishaw, Zeiss)

O primeiro tipo funciona basicamente utilizando chaves de contato ou cristais piezelétricos, que são acionadas no momento em que o sensor de contato (*stylus*) toca a peça, sendo então adquiridas as coordenadas X, Y e Z do ponto. Normalmente, são acoplados a um cabeçote indexador (*indexable probe head*), que possui dois eixos de rotação, conferindo grande flexibilidade de orientação dos sensores de contato.

Por haver uma força mínima necessária para acionamento da chave, a haste do sensor sofre uma significativa flexão (figura 1.7), e no momento em que a chave é acionada (e o ponto então lido nas escalas da MMC), o sistema

de apalpação já se deslocou além do ponto de contato, efeito conhecido como pré-deslocamento (*pre-travel*). Para compensar o efeito desta flexão dinâmica da haste, é feita uma qualificação medindo-se uma esfera padrão com diâmetro conhecido, e calculando-se o diâmetro efetivo médio do sensor (o qual resulta sempre menor que o diâmetro físico). Com os mesmos valores, é determinada também a posição do centro do sensor em relação às escalas. Normalmente, a orientação horizontal do cabeçote indexador é utilizada como posição de referência, sendo as coordenadas das demais orientações do sensor (indexações) relacionadas àquela.

Quando o sensor toca a peça, as coordenadas registradas pelas escalas são a posição do centro da esfera do sensor. Para adquirir a coordenada do ponto de contato, é feita uma compensação de uma vez o raio de sensor, na direção em que foi efetuada a medição. Desta forma, é requerido que a medição de pontos individuais seja feita o mais normal possível à superfície sendo avaliada. Quando uma apalpação é feita em uma direção distinta da normal, dá-se então origem a um erro de 2ª ordem, diretamente proporcional ao diâmetro do sensor (figura 1.6). Este erro é particularmente significativo e importante quando são medidas superfícies/formas livres.

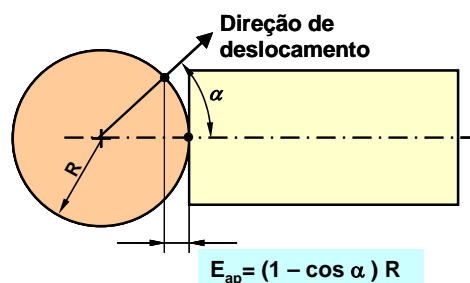


Figura 1.6 – Erro na compensação do raio do apalpador

Um erro bem conhecido inerente à tecnologia *touch trigger* é o erro de lóbulos, que ocorre quando as apalpações são realizadas no plano de medição perpendicular ao sensor. Este erro, característico de apalpadores comutadores que utilizam chaves de contato, é facilmente verificado ao se medir um anel padrão com erro de forma baixo (ver figura 2.11). Como existem distintos braços de alavanca formados pelas chaves (figura 1.7), a força necessária para acionar o gatilho varia angularmente, provocando distintos valores de pré-deslocamento. Este efeito é potencializado pela redução da rigidez da haste

do sensor. O modelo de deslocamento de uma viga engastada com carregamento estático concentrado na extremidade livre pode ser utilizado para verificar a influência dos parâmetros envolvendo a flexão do sensor. Atualmente, com a utilização de chaves compostas de cristais piezelétricos ou extensômetros, o efeito dos lóbulos torna-se normalmente desprezível frente à repetitividade de apalpação.

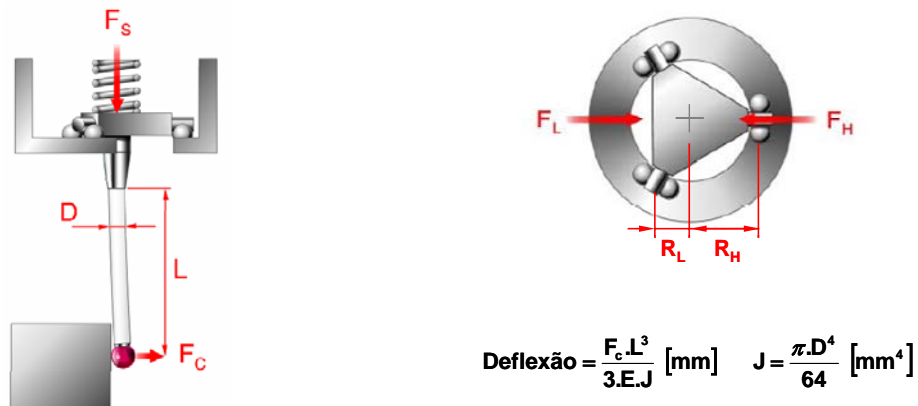


Figura 1.7 – Princípios de funcionamento de um apalpador comutador e que modela a flexão do apalpador (fonte: Renishaw)

A variação do pré-deslocamento ocorre também quando o sentido de apalpação passa da direção perpendicular à direção paralela ao sensor. O efeito desta se mostra ainda mais acentuado, pois a força de contato passa de aproximadamente 0,02 N (apalpação perpendicular ao sensor) para 0,7 N (paralela ao mesmo), produzindo uma variação no pré-deslocamento ainda mais intensa que no erro de lóbulos.

O efeito da variação do pré-deslocamento (para ambos os casos supracitados) passa a ser mais pronunciado quando uma quantidade reduzida de pontos é utilizada para a qualificação do sensor, o que vem a ser, no entanto, prática comum entre usuários desta tecnologia (quatro pontos no equador e um no pólo da esfera é o mais usual). Portanto, para medições mais críticas, sugere-se [7] um maior número de pontos, tomados em todas as direções, (por exemplo, conforme definido pelo ensaio de aceitação da ISO 10360-2 [5]) obtendo-se assim uma média menos tendenciosa. Ou ainda utilizar, para medições de diâmetros ou distâncias, o método por substituição, medindo-se um anel padrão com o valor do diâmetro conhecido

(preferencialmente com erro de forma baixo) ou blocos padrão para compensar os erros residuais da qualificação.

Os parâmetros velocidade de apalpação e distância de posicionamento (distância do sensor em relação à peça antes da máquina entrar em velocidade de apalpação), devido à aquisição dos pontos se dar de forma dinâmica, são críticos neste tipo de apalpador. A distância de posicionamento proporciona tempo para que a estrutura se estabilize antes que o contato com a peça seja efetuado. Quanto maior esta distância, menor serão os erros aleatórios introduzidos pelas distorções estruturais de caráter dinâmico. Altas velocidades fazem com que o apalpador sofra uma menor flexão antes de ser acionado o gatilho, diminuindo a parcela sistemática do pré-deslocamento.

Por outro lado, a parcela aleatória (repetitividade do sistema de apalpação) aumenta consideravelmente com a velocidade [8]. Para que o valor médio do pré-deslocamento seja então minimizado, os mesmo parâmetros utilizados na qualificação dos sensores devem ser utilizados para as medições subseqüentes. Existem valores ótimos para estes parâmetros, normalmente recomendados pelos fabricantes. Podem-se utilizar valores distintos, objetivando-se a redução do tempo de medição (desde que a conseqüente perda da exatidão seja conhecida e considerada aceitável), ou o aumento da exatidão. Qualquer que seja o intuito, a alteração destes parâmetros deve ser efetuada somente se embasada em estudos realizados com critério, e, novamente, jamais utilizar valores distintos entre qualificação e medições.

O cabeçote indexador é outra fonte de erros de natureza aleatória, podendo ainda inserir erros sistemáticos nas medições. É prática comum utilizar apenas uma medição para qualificar cada orientação do sensor (indexação). Um problema resultante desta prática é que, nesta primeira medição, a posição da esfera padrão não é perfeitamente conhecida (geralmente definida por um ponto medido no pólo da mesma). Desta forma, a esfera padrão é apalpada em direções não-ortogonais à superfície, levando a erros na compensação do raio do sensor, o que por sua vez afeta o diâmetro efetivo e as coordenadas do sensor obtidas na qualificação. Uma maneira de lidar com esta questão é fazer uma medição (preferencialmente CNC) na esfera, e, ao invés de localizar a esfera com um ponto no topo da mesma, informar ao software as coordenadas de sua posição, cada vez que as escalas

forem reinicializadas. Se isso não for possível, serão necessárias no mínimo duas iterações (uma para localizar e outra para de fato qualificar) para cada indexação a ser qualificada. Este último procedimento deve também ser executado quando uma configuração nova (onde somente suas dimensões nominais são determinadas) for inserida.

Além disso, deve ainda ser considerada a repetitividade de posicionamento do cabeçote. O fato de se utilizar um único ciclo para cada indexação (não confundir com as iterações discutidas acima) pode levar a inserção de erros sistemáticos proporcionais ao comprimento de giro nas medições. Para medições críticas, portanto, é recomendável que sejam feitos vários ciclos de qualificação que incluam as indexações, a seguir utilizando os valores médios obtidos das coordenadas do centro do sensor, evitando assim que o erro de repetitividade do procedimento de qualificação entre como parcela sistemática para as medições seguintes [7].

Os apalpadores medidores (também conhecidos como apalpadores analógicos) são sistemas construtivamente mais complexos. São providos de três transdutores indutivos, utilizados para medir deslocamentos nas três direções ortogonais, sendo mantidos na posição zero (quando não há força de contato atuando) por molas planas (com suas constantes bem definidas) também orientadas nas direções das escalas da máquina. Quando o sensor entra em contato com a peça, há uma deformação da mola orientada na direção de aproximação. O transdutor indutivo passa então a medir a deformação da mola, e a aquisição das coordenadas nas escalas (e nos transdutores) se dá no momento que uma deformação predeterminada (normalmente correspondente a uma força de contato configurada pelo operador) é atingida, ocorrendo de forma praticamente estática.

Outra característica importante deste sistema é que a compensação do raio do apalpador é feita de maneira ativa, ou seja, se o apalpador está se deslocando em direção a peça de forma oblíqua (inclinado em relação à normal), no momento que ocorre o contato com a peça, o próprio cabeçote começa a atuar de modo a corrigir o sentido de aplicação da força. Assim, os erros de 2ª ordem na compensação do raio do apalpador, ilustrados na figura 1.6, são praticamente eliminados. Este sistema construtivo confere uma

exatidão superior frente aos apalpadores comutadores, porém demanda consideravelmente mais tempo para a aquisição de pontos individuais.

A compensação da flexão da haste do sensor para a força de medição utilizada é determinada através de uma qualificação medindo-se uma esfera padrão com diâmetro conhecido. Da mesma forma que para os apalpadores comutadores, há uma variação da força para diferentes direções de apalpação, mas de magnitude absolutamente inferior. O referenciamento entre os sensores é feito da mesma forma que para os apalpadores comutadores.



Figura 1.8 – Princípio de funcionamento dos apalpadores medidores no modo de medição ponto a ponto (a) e modo *scanning* (b) (adaptado de [9])

Estes cabeçotes também podem adquirir pontos de forma dinâmica, o que normalmente é feito quando utilizado no modo de *scanning*). Neste modo, para cada ponto adquirido, são feitas leituras das coordenadas X, Y e Z nas escalas da máquina e nos transdutores indutivos do cabeçote. Conforme ocorrem mudanças na trajetória de varredura, a força de contato também varia. Apesar de haver um controle dinâmico da trajetória (objetivando-manter o mais constante possível a força de contato), este se torna cada vez menos efetivo com o aumento da velocidade de varredura, induzindo a erros devidos a flexão variante da haste do sensor. Uma técnica muito usual [10] para lidar com este efeito em medições de elementos com seção circular é medir um anel padrão com dimensões similares às de peça a ser medida, utilizando primeiramente o método ponto a ponto (ou o valor calibrado), e em seguida o método por *scanning*, e compensando o diâmetro do sensor pela comparação entre os dois métodos. Este método serve também para compensar efeitos dinâmicos na estrutura da máquina, desde que realizado o mais próximo possível do volume onde será medida a característica da peça.

Um ponto a ser observado no uso de *scanning* é o efeito do material da peça contra o material do sensor de contato. O material mais comumente utilizado nos sensores é o rubi (óxido de alumínio), o qual apresenta uma forte afinidade química com o alumínio, danificando visivelmente o sensor após o *scanning* de algumas poucas peças. Para o alumínio, são recomendados sensores de nitreto de silício ou carboneto de tungstênio. No caso de peças de ferro fundido, pode ocorrer desgaste excessivo por abrasão dos sensores de rubi, sendo aconselhável o óxido de zircônio como material para o sensor.

1.1.3. Erros relativos ao ambiente de medição

Os principais fatores de influência advindos do ambiente são temperatura, vibrações e partículas sólidas em suspensão. Em geral, ambientes de medição muito próximos à produção apresentam altos níveis de vibração, os quais induzem um aumento drástico da parcela aleatória dos erros de medição, podendo inclusive provocar picos espúrios nas medições e usualmente levar à necessidade de ajustes mais freqüentes e ocasionar a degradação precoce do equipamento. Níveis aceitáveis são normalmente definidos pelos fabricantes, devendo ser minimizados caso assumam valores superiores aos mesmos. Normalmente são utilizados sistemas passivos (como molas helicoidais e bases inerciais, sendo estas imprescindíveis em ambientes de produção) e/ou sistemas ativos (por exemplo, amortecedores pneumáticos) sob as máquinas para minimizar os efeitos de vibrações.

A quantidade de partículas sólidas em suspensão (poeira) em um ambiente, além de poder influenciar diretamente os resultados de medição, também contribui à degradação prematura do equipamento. Uma maneira de minimizar a quantidade de partículas em um ambiente é mantendo a pressão da sala de medição levemente superior ao ambiente externo (fluxo do sistema de insuflamento maior que o fluxo do sistema de exaustão).

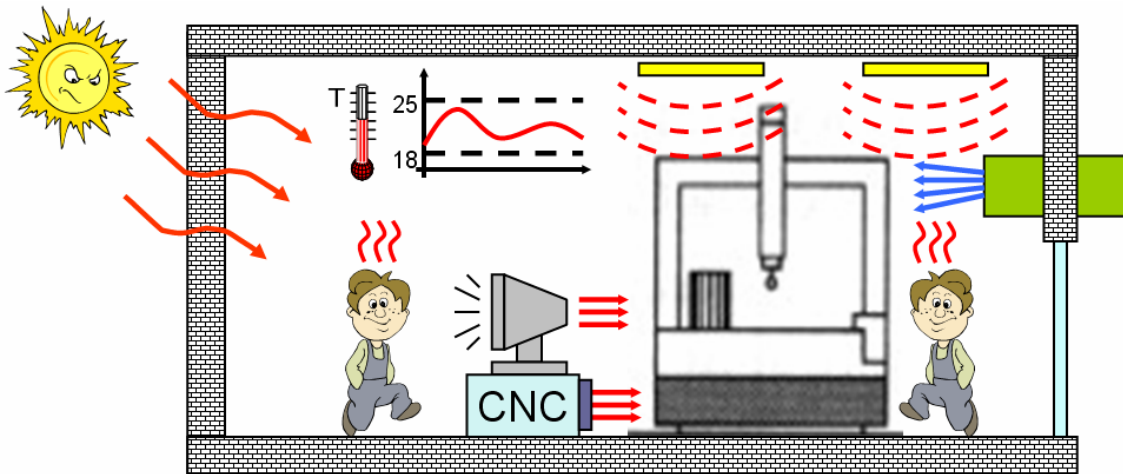


Figura 1.9 – Algumas deficiências relativas à temperatura em ambientes de medição (adaptado de [11])

Em relação à temperatura, há três formas desta influenciar os resultados de medição: pela diferença em média do valor de referência (20°C), pelas flutuações ao longo do tempo, e pelos gradientes térmicos. Estas fontes de erro atuam tanto na estrutura e escalas da máquina quanto na peça. As máquinas normalmente apresentam uma faixa de temperaturas dentro da qual as especificações do fabricante são válidas. A incapacidade de manter o ambiente de medição nesta faixa compromete o desempenho da máquina frente àquele declarado pelo fabricante.

Algumas máquinas mais modernas dispõem de recursos para compensar variações térmicas detectadas na estrutura. Erros devidos a gradientes térmicos, entretanto, são mais complexos de serem tratados por este tipo de compensação, pois geralmente provocam distorções não-lineares na estrutura. Quando há variação dos gradientes ao longo do tempo, isto se torna crítico, pois estes erros (outrora considerados sistemáticos) passam a atuar de maneira aleatória as medições. Assim, medições em artefatos de referência para compensação de erros sistemáticos via software, realizadas em um momento, deixam de ser válidas no momento seguinte, reduzindo consideravelmente a eficácia dos ajustes efetuados. Para minimizar estes erros, é desejável que os elementos estruturais da máquina apresentem baixo coeficiente de expansão e alta condutibilidade térmica.

Deficiências em um ambiente de medição relativas à temperatura incluem excesso de pessoas, proximidade de computadores e do controlador à máquina, iluminação, presença de janelas, ausência de uma ante-sala,

insufladores muito próximos e/ou direcionados à estrutura, salas com volume muito pequeno (dificuldade de circulação do ar), isolamento deficiente de paredes voltadas a ambientes com temperatura elevada (produção, exposição direta ao sol), sistema de condicionamento mal dimensionado, excesso de peças advindas da produção a altas temperaturas, etc.

Se boas práticas fossem observadas durante a instalação e uso de uma MMC, algumas delas descritas nos parágrafos anteriores, a influência do fator ambiente sobre as medições assumiria, para a vasta maioria das medições industriais, níveis irrelevantes. Infelizmente, escassas são as situações em que se observam tais práticas, sendo normalmente o ambiente um fator preponderante na exatidão das medições.

1.1.4. Erros relativos ao software de medição

Os programas de medição por coordenadas constroem as características associadas, ou elementos geométricos (reta, plano, círculo, cilindro, cone, esfera, toro) através de ajustes matemáticos. Para definir estes elementos, existem algumas formas de ajuste (mínimos quadrados, mínima zona, mínimo elemento circunscrito, máximo elemento inscrito, elemento tangente externo, elemento tangente interno), cada qual tendo sua aplicação específica. A implementação dos algoritmos de ajuste normalmente é feita utilizando-se técnicas iterativas, devido à não-linearidade da maioria destes problemas.

Entretanto, devido à alta demanda computacional para a resolução de rotinas iterativas, alguns programadores acabam por lançar mão de aproximações lineares, o que pode levar a resultados incorretos [12]. Em 1986, foi realizado por Porta & Wäldele, do *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* (PTB), um estudo envolvendo 12 softwares comerciais de MMC, onde conjuntos de pontos simulados para cada uma das geometrias reta, plano, círculo, cilindro e cone foram inseridos nos softwares, e os resultados dos elementos calculados comparados ao cálculo efetuado pelos algoritmos de referência do PTB. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 1.1.

Elemento Geométrico	Desvio Máximo				Sem Informação
	< 0,1 μm	0,1 - 0,5 μm	0,5 - 2,0 μm	> 2,0 μm	
Reta	60%	13%	5%	5%	17%
Plano	73%	12%	6%	9%	0%
Círculo	76%	7%	9%	0%	8%
Cilindro	52%	1%	5%	9%	33%
Cone	27%	5%	10%	25%	33%

Tabela 1.1 – Erros resultantes de algoritmos de ajuste (fonte [13])

Atualmente, o *National Institute of Standards and Technology* (NIST) e o próprio PTB fornecem certificados de validação dos algoritmos, informando os máximos erros obtidos em relação aos seus algoritmos de referência.

Outra fonte de erro proveniente dos softwares de medição por coordenadas diz respeito aos algoritmos de avaliação das especificações geométricas de produto (GPS). É comum softwares de medição com algoritmos que utilizam características associadas (matematicamente ajustadas) para a avaliação de especificações geométricas de localização e orientação. A última versão da ISO 1101 [14], de 2004, utiliza os conceitos de *skin model* (ver seção 1.2), orientando ao uso das características extraídas como características a serem avaliadas.

Por exemplo, para a perpendicularidade de um eixo de cilindro em relação a um plano de referência, é comum encontrar algoritmos que utilizam o eixo derivado associado do cilindro medido (eixo médio), sem considerar (ou considerando de forma equivocada) o desvio de retitude do eixo, o qual deveria estar sendo controlado pela especificação em questão. Alguns softwares têm ainda a dificuldade de lidar com especificações que não restringem todos os graus de liberdade, obrigando o usuário utilizar referências não especificadas, que tendem a aumentar o valor dos desvios avaliados.

Outros erros que podem ser provenientes de softwares dizem respeito aos algoritmos utilizados para as compensações via software (CAA). Os fabricantes desenvolvem e utilizam diferentes métodos, não havendo atualmente, como para o caso dos algoritmos de ajuste, procedimentos definidos para a validação destes algoritmos.

1.1.5. Erros relativos à peça, estratégia e operador

No que diz respeito à peça a ser medida, são normalmente considerados fatores de influência o acabamento superficial, as propriedades termomecânicas do material (coeficiente de expansão térmica e módulo de elasticidade) e erros de forma dos elementos de interesse da mesma.

Os efeitos térmicos podem ser derivados das variações térmicas no ambiente em conjunto com as propriedades do material (como visto anteriormente), ou devido ao tempo de estabilização térmica insuficiente. Este último, um ponto relevante a ser mencionado, deve ser definido ou pela medição direta de temperatura, ou por estudos que definam o tempo adequado à estabilização de cada peça.

Peças com baixa rigidez podem ser deformadas no momento da fixação, por peso próprio ou por achatamento no momento da apalpação. Mesmo peças com elevada rigidez podem sofrer deformações elásticas se submetidas à força excessiva na fixação. O uso de grampos de pressão é prática comum, embora possa provocar grandes deformações caso não seja utilizado de forma criteriosa.

É interessante perceber que os fatores de influência normalmente atribuídos à peça estão sempre associados a outras condições, de origem externa. Grande parte dessas condições está presente ou por necessidades de projeto (propriedades de material, massa elevada) ou por serem propriedades inerentes ao processo de produção (rugosidade, erros de forma), não podendo ser minimizados diretamente no nível da metrologia. Por exemplo, o coeficiente de expansão é característico do material, e só será realmente influente sobre os resultados se o ambiente estiver precariamente climatizado, ou não for dado à peça tempo suficiente para estabilização térmica. Em contrapartida, para minimizar a influência do mesmo, pode-se atuar no ambiente (primeiro caso) ou no procedimento (segundo caso), mas não atuar diretamente sobre a peça (material).

Outro exemplo são os erros de forma, normalmente atribuídos como fontes de erro relativas à peça. Os desvios de forma por si só não representam fonte de erro para a medição. Contudo, quando apresentam magnitude comparável à repetitividade do processo de medição, diferentes estratégias de

medição conduzirão a resultados de medição substancialmente distintos. O desconhecimento dos desvios gerados por um processo de produção, portanto, e/ou a falta de capacitação da equipe de metrologia, fatalmente conduzem ao emprego de estratégias de medição equivocadas. Este sim, o fator composto por operador + estratégia de medição + desvios da peça, representa um fator de influência, sendo considerado atualmente uma das mais influentes fontes de erro em medição por coordenadas [9].

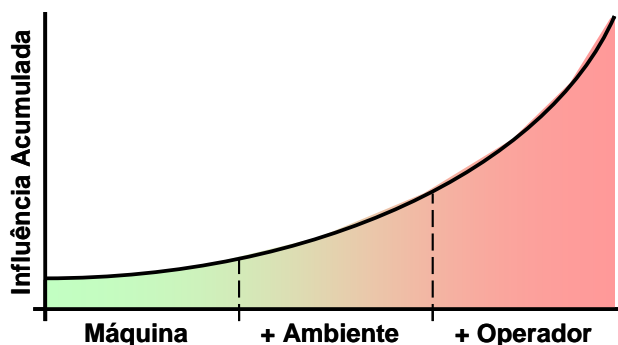


Figura 1.10 – Influência relativa da MMC, do ambiente e do operador sobre o resultado da medição (adaptado de [15])

Devido à complexidade inerente à tecnologia de medição por coordenadas, são muitos (como pôde ser visto até momento) os fatores que podem levar a erros de medição. O conhecimento destes fatores, do quanto eles estarão influenciando o resultado caso sejam aceitos na medição, e das práticas metrológicas que levam a minimização dos mesmos, é crucial para a confiabilidade dos resultados de medição. Assim, a definição das estratégias de medição não é tarefa trivial, exigindo uma formação muito sólida das pessoas envolvidas neste processo.

Na metrologia (assim como na manufatura), é comum o uso do termo “operador” para designar o recurso humano responsável pela operação do equipamento. Esta terminologia, embora historicamente adotada pela metrologia por coordenadas, acabou se tornando um tanto limitada, no sentido de que o nível de capacitação exigido atualmente transcende a mera operação de um equipamento. Cabe ser feita neste momento uma distinção, entre um recurso humano que seria responsável apenas pela execução dos procedimentos e de um recurso humano responsável pelo planejamento, desenvolvimento, análise e melhorias do processo de medição. A capacitação requerida para o primeiro é básica, e este, quando operando um equipamento

CNC, terá pouca ou nenhuma influência sobre os resultados de medição. O segundo, por outro lado, é quem definirá de forma ativa a qualidade dos resultados de medição que serão gerados. Este, mais do que um simples operador, deve estar capacitado para desempenhar uma série de tarefas, tais como:

- Definição dos procedimentos de preparação da medição (tempo de estabilização térmica das peças, periodicidade de qualificação dos sensores, meios de fixação, etc.);
- Interpretação dos desenhos técnicos (especificações geométricas do produto);
- Análise das características de acabamento e forma das peças (interação com o pessoal da produção, medições de forma);
- Definição das estratégias de medição (sensores utilizados, parâmetros do equipamento, métodos de apalpação, número e distribuição dos pontos, etc.), utilizando práticas que minimizem a influência das fontes de erro;
- Definição das estratégias de avaliação (eliminação de *outliers*, filtros, tipos de ajustes matemáticos, referenciamento, método de avaliação das especificações, etc.), utilizando os métodos que forneçam uma avaliação o mais coerente possível com a funcionalidade da peça, de acordo com as especificações do desenho;
- Validação do processo de medição (análise estatística do processo, estimação da incerteza de medição, verificação da adequabilidade frente às tolerâncias e/ou variação do processo de produção);
- Execução de alterações necessárias quando for verificada necessidade.

Certamente, uma vasta gama de conhecimentos é requerida para que todos estes requerimentos sejam cumpridos, o que torna consideravelmente alto o nível de capacitação atualmente exigido de um operador de medição por coordenadas:

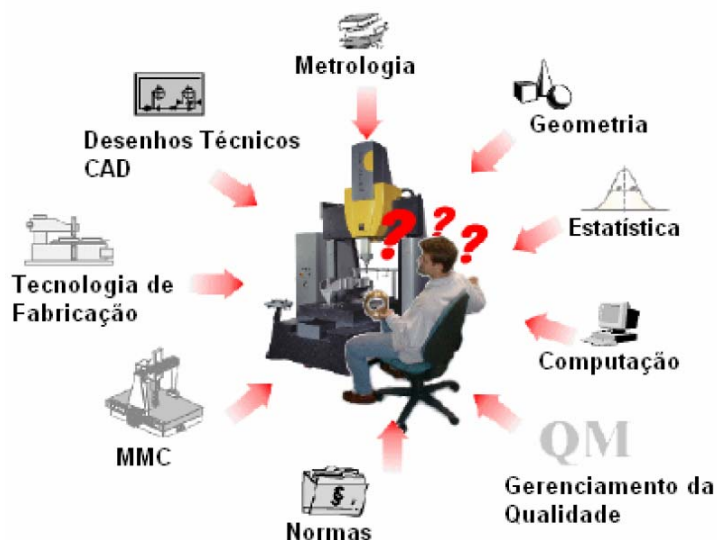


Figura 1.11 – Requisitos para um operador de medição por coordenadas (cedido por [1])

Na prática, em uma equipe de metrologia, encontram-se operadores com vários níveis de capacitação, que em raros casos apresentam formação necessária para planejar e analisar um processo de medição. Portanto, é imprescindível que haja ao menos uma pessoa capacitada que possa fazer uma análise do processo de medição, identificar as causas mais influentes sobre os resultados, e decidir sobre quais delas se deve atuar para obter as melhorias necessárias.

1.2. ESTRATÉGIAS DE MEDIÇÃO E AVALIAÇÃO: ESPECIFICAÇÕES GEOMÉTRICAS EM MEDIÇÃO POR COORDENADAS

As especificações geométricas de produtos, conforme definidas pela ISO 14660-1 [16], utilizam o modelo de casca (*skin model*) como “um modelo geométrico da interface física entre uma peça e o ambiente que a cerca” [9]. Este modelo permite, em contrapartida aos modelos teoricamente perfeitos encontrados nos desenhos técnicos, trabalhar com características reais, levando em consideração os desvios de forma provenientes do processo de produção. O *skin model* permite, em última análise, criar definições mais consistentes dos mensurandos a serem avaliados.

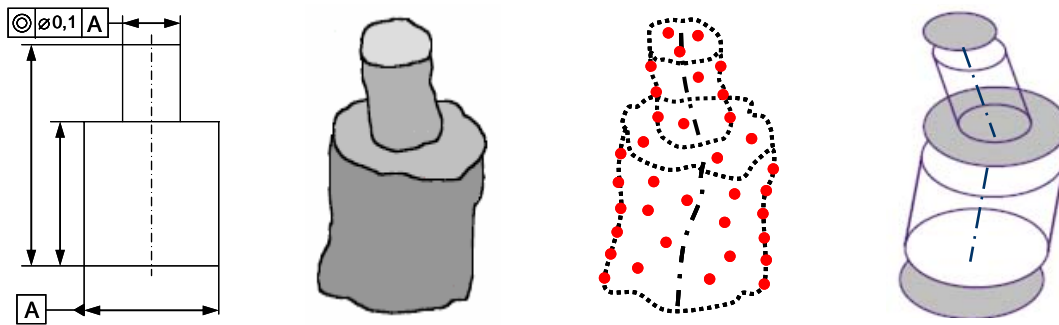


Figura 1.12 – Características nominais (desenho), característica real (infinitos pontos), características extraídas (coleta de um número finito de pontos) e características associadas (ajustes matemáticos a partir dos pontos adquiridos); adaptado de [12]

No *skin model*, são diferenciadas as características integrais (superfícies) das características derivadas (definidas a partir das características integrais, como centros, eixos ou planos de simetria). No desenho técnico, encontram-se as características nominais integrais (por exemplo, a geratriz de um cilindro) e derivadas (o eixo central), as quais correspondem ao ideal imaginado pelo projetista. Devido às imperfeições apresentadas pelos processos de produção, as peças resultantes apresentam desvios dimensionais e geométricos (tamanho, forma, localização e orientação) em suas características reais. Com o intuito de descrever de forma quantitativa os desvios das características reais em relação às nominais, as peças produzidas são submetidas a avaliações.

Neste momento, passaremos à metrologia por coordenadas. Para a realização desta avaliação, uma amostra finita de pontos será coletada sobre as superfícies reais, a qual definirá as características extraídas da peça. Para poder relacionar computacionalmente as características extraídas, a fim de se obter a magnitude dos desvios de peça, serão definidas, a partir de ajustes matemáticos, as características associadas. Os métodos utilizados para a definição das características associadas, bem como para relacioná-las umas às outras, serão aqui definidos como estratégia de avaliação das especificações. Aos métodos empregados para a coleta de pontos e definição das características extraídas normalmente refere-se como estratégia de medição.

1.2.1. A estratégia de medição

Os erros provenientes do uso de estratégias de medição deficientes são relacionados diretamente à qualidade e à quantidade dos pontos adquiridos na

extração das características a serem avaliadas. Com relação à qualidade dos pontos adquiridos, o primeiro passo no desenvolvimento de uma boa estratégia de medição é a escolha dos sensores (tipos, dimensões) a serem utilizados nas medições. Conforme visto na seção 2.1.2, o comprimento da haste deve ser mantido o menor possível. A dimensão do diâmetro da esfera (ou disco, ou cilindro, conforme a aplicação) do sensor induz um efeito de filtragem mecânica sobre a superfície extraída. Para medição de forma, normalmente o efeito do filtro mecânico é indesejável. A série de normas VDI/VDE 2631 [17] especifica os parâmetros necessários para a correta seleção do tamanho do sensor a ser utilizado na medição de forma. Para medições de localização e orientação, as altas frequências introduzidas pela rugosidade normalmente introduzem efeitos secundários na definição das características extraídas, podendo ser eliminadas mediante a escolha de um sensor com diâmetro suficientemente grande.

O conhecimento do equipamento é outro fator fundamental para o desenvolvimento de uma estratégia de medição robusta. Saber quantificar o impacto que as alterações dos parâmetros ajustáveis do equipamento (velocidade de medição, distância de posicionamento, força de contato, método de qualificação dos sensores) causarão sobre a qualidade dos pontos adquiridos permite operar o equipamento em condições de melhor exatidão.

O fator mais frequentemente associado à definição da estratégia de medição é a amostragem dos pontos. O grau de concordância entre uma característica extraída e uma característica real é proporcional ao grau de informação obtido desta última, ou seja, ao número de pontos utilizado na extração. A representação perfeita de uma característica real a partir de uma característica extraída é, portanto, virtualmente impossível de ser obtida. Este fato torna igualmente impossível a avaliação do mensurando tal qual definido pelas especificações geométricas, pois estas consideram a totalidade das características envolvidas, existindo assim, por menor que seja, um erro remanescente desta limitação.

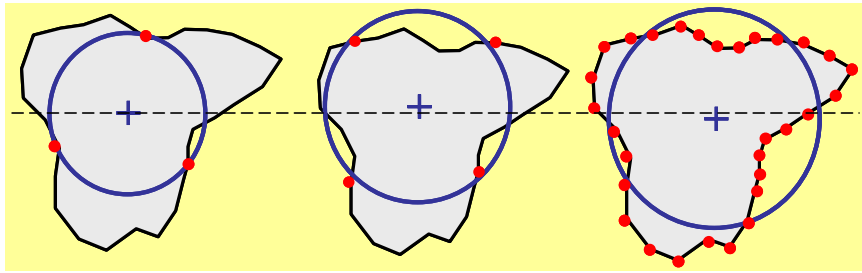


Figura 1.13 – Variações de tamanho e localização de uma característica associada (círculo por mínimos quadrados) induzida pelo desvio de circularidade da peça (adaptado de [18])

Para superfícies onde os erros de forma não exercem influência direta sobre os resultados de medição, o número mínimo de pontos necessários para definir a característica associada poderá ser suficiente. Quando exercem, o uso de altas densidades de pontos (associada a um algoritmo de avaliação adequado) será suficiente para minimizar esta influência, a ponto de torná-la desprezível. Ambas as situações são, todavia, extremamente raras no contexto industrial, onde os desvios de forma encontrados são relativamente altos, e os tempos de medição extremamente limitados, tornando as estratégias de medição utilizadas (baixa densidade de pontos) altamente sensíveis à presença e variações dos desvios. Neste contexto, o conhecimento dos desvios de forma característicos do processo de produção torna-se imprescindível ao desenvolvimento de uma estratégia de medição robusta, e/ou à quantificação dos erros residuais induzidos pela interação da estratégia com os desvios de forma. Por exemplo, caso o erro de forma proveniente do processo de produção seja constante em fase (posição/ orientação dos erros de forma em relação às referências) e em frequência (número de lóbulos ou ondulações presente na característica), a distribuição dos pontos poderia ser distribuída de maneira objetiva, visando amostrar somente os extremos funcionais da característica.

1.2.2. A estratégia de avaliação

A relevância do tema estratégia de avaliação foi identificada ainda em 1988 [19], onde alertou-se que determinados algoritmos utilizados por softwares de medição por coordenadas para definir erros de forma e posição não calculavam os parâmetros destes erros segundo o estabelecido pela norma ANSI Y14.5 (atual ASME Y14.5M [20]). Os algoritmos de ajuste matemáticos utilizados, os quais definem as características associadas à peça,

devem ser adequados do ponto de vista funcional, para representarem corretamente os mensurandos conforme definidos pelas especificações geométricas avaliadas. Ou seja, é a funcionalidade da característica quem define o tipo de ajuste a ser utilizado. Atualmente, o uso de ajustes por mínimos quadrados é prática comum na grande maioria das medições realizadas no contexto industrial. O emprego tão difundido deste algoritmo pode ser justificado por razões históricas (baixa demanda computacional requerida), mas talvez mais importante, é que os ajustes por mínimos quadrados representam de fato uma média dos pontos avaliados, apresentando baixa sensibilidade à presença de *outliers*.

Para medição de forma, são utilizados ajustes de mínima zona comum, conforme definido pela ISO 1101 [14], orientando a zona de tolerância de maneira que o maior erro encontrado seja mínimo. Para avaliação furos e pinos como referências (*datums*), e/ou com modificadores de material (envelope, máximo e mínimo material), ou ainda para tolerâncias assimétricas (conforme definidas pela ISO 286 [21]), recomenda-se o uso, respectivamente, dos algoritmos máximo cilindro inscrito e mínimo cilindro circunscrito, os quais representarão o diâmetro funcional de montagem da característica. Para planos, da mesma forma, recomenda-se o uso dos ajustes tangentes. A maior limitação atualmente ao uso dos algoritmos de zona é que estes são extremamente sensíveis a *outliers*, e demandam altas densidades de pontos para uma representação consistente da característica. O não uso dos ajustes por zona levam, todavia, a erros de não-conformidade com a especificação geométrica, também podendo ser definidos como erros devido a interação entre desvios de forma da peça e estratégia de avaliação (ver figura 1.14). Caso se opte pelo uso de ajustes por mínimos quadrados ao invés de ajustes por zona, é importante, para que decisões coerentes sejam tomadas, que a divergência entre os métodos seja quantificada.

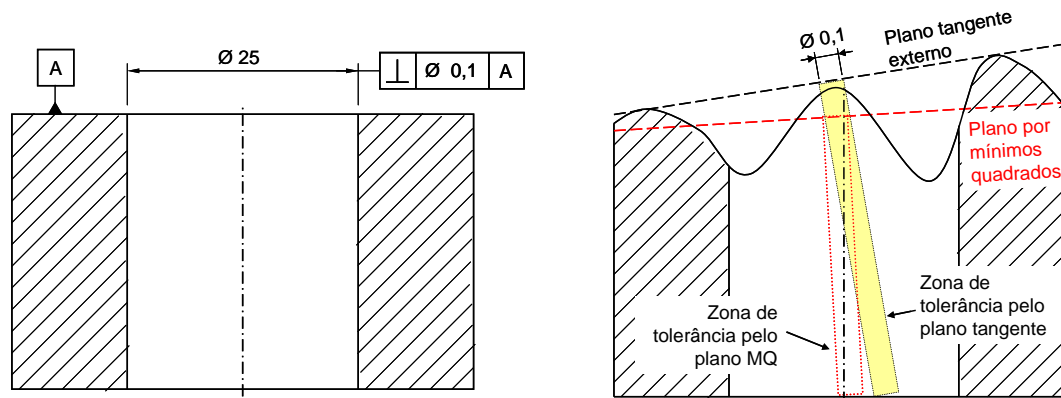


Figura 1.14 – Erro em uma avaliação de perpendicularidade induzido pelo tipo de ajuste utilizado na referência

Outra fonte de erros de não-conformidade com as especificações é proveniente do tipo da característica utilizada avaliação da mesma. A ISO 1101 [14] define que, para que o desvio de uma característica seja considerado aceitável conforme a especificação, toda a extensão da característica real deve estar contida nos limites definidos pela zona de tolerância. Como já discutido, é impossível cumprir com esta exigência, uma vez que as características extraídas são definidas a partir de um número finito de pontos. Entretanto, uma boa aproximação é considerar a extensão de uma característica (integral ou derivada) extraída. A última versão da norma traz o procedimento que deve ser utilizado para obtenção de características médias extraídas (linha média extraída para furos e pinos e superfície média extraída para planos paralelos). De forma resumida, a derivação de uma linha média extraída segue os seguintes passos:

- Obter uma superfície extraída (nuvem de pontos sobre a superfície do cilindro);
- Ajustar o cilindro associado aos pontos pelo método dos mínimos quadrados total;
- Obter seções circulares extraídas orientadas perpendicularmente ao eixo derivado do cilindro associado;
- Ajustar círculos associados à cada seção circular extraída pelo método mais adequado à funcionalidade da característica.

A linha média extraída é a linha que passa pelos centros dos círculos associados, contendo o erro de forma de retitude do eixo. Esta é a característica a ser confrontada com a zona de tolerância, por exemplo, no caso da perpendicularidade de um eixo em relação a um plano de referência (figura 1.15). A maioria dos softwares de medição por coordenadas não apresentam algoritmos que utilizam este método. Normalmente, o procedimento acima descrito termina na construção do eixo derivado associado do cilindro, sendo este então confrontado com a zona de tolerância estabelecida. O problema da avaliação feita desta maneira é que ela considera a orientação do eixo, mas não o seu desvio de forma (ou o considera de maneira inadequada), sendo que este também deve ser controlado pela especificação de perpendicularidade.

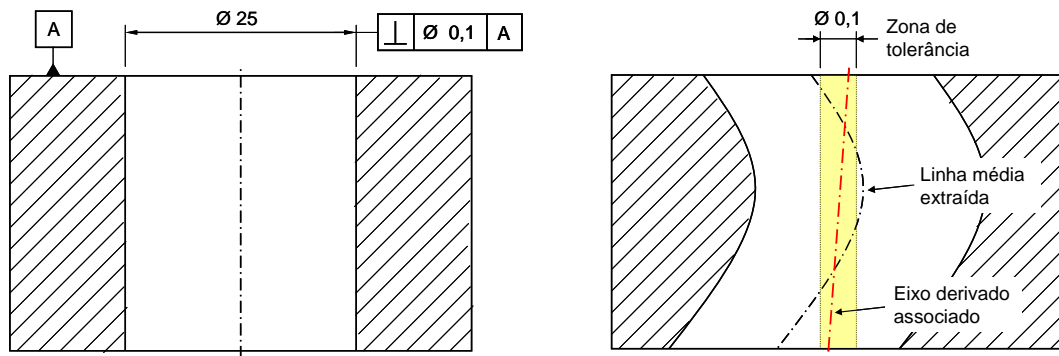


Figura 1.15 – Erro em uma avaliação de perpendicularidade induzido pelo uso do eixo derivado associado do cilindro

Outro exemplo é a perpendicularidade de um plano em relação a um eixo de referência. O procedimento correto é confrontar toda a superfície extraída (ou seja, cada ponto individual) com a zona de tolerância, e não somente o plano associado. Uma desvantagem na avaliação pelas características extraídas é que elas são sensíveis a *outliers* (o que se verifica de forma menos pronunciada no caso de superfícies médias extraídas de planos paralelos, e quase não se verifica no caso das linhas médias extraídas de cilindros). Assim, um operador que conheça as definições descritas pelas normas, pode optar pelo não uso dos algoritmos fornecidos pelo software de medição, de maneira a contornar as limitações impostas pelos mesmos.

Um outro tipo de erro de não-conformidade com as especificações geométricas ocorre na avaliação de alguns tipos de especificações que não

restringem todos os graus de liberdade na definição da zona de tolerância, geralmente para especificações de posição. Por exemplo, a posição de um eixo em relação a um eixo comum de referência perpendicular (figura 1.16) restringe somente dois graus de liberdade da zona de tolerância: a rotação em torno do eixo ortogonal Y e a translação sobre o mesmo.

Para contornar este problema, alguns softwares apresentam a possibilidade de trabalhar com rotinas iterativas, onde os graus de liberdade não restritos podem ser variados de forma tal que o desvio obtido seja mínimo, eliminando desta forma os problemas deste tipo de não-conformidade com as especificações. Sem estes recursos, o próprio operador é quem deve escolher a rotação em torno do eixo X e a origem sobre o mesmo ao definir o sistema de referência, objetivando a minimização do valor do desvio de posição resultante. No caso da rotação, o eixo derivado associado do cilindro a ser tolerado é uma razoável aproximação a este requisito, o qual minimizará a parcela do desvio de posição relativa à distância entre os dois eixos. No caso da translação, uma aproximação é utilizar o baricentro do cilindro associado (ou o centro de uma seção localizado à meia altura do cilindro) como origem na direção X, o qual minimizará de modo razoável a parcela do desvio de posição relativa à perpendicularidade entre os dois eixos. O uso do eixo derivado associado para definir a translação poderá inflar de maneira considerável o erro de posição obtido por meio desta avaliação, uma vez que a origem será definida pela interseção deste eixo com o plano ortogonal XY na altura da origem em Z.

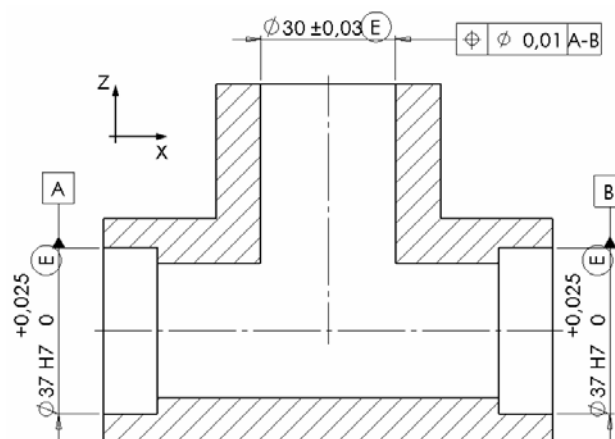


Figura 1.16 – Especificação de posição com restrição parcial da zona de tolerância

Inúmeros outros casos podem ser citados onde erros de não-conformidade com a especificação poderão emergir. Quando negligenciados, causarão impacto tão maior sobre o resultado de medição quanto maiores forem os desvios de forma decorrentes do processo de produção. A percepção da presença destes erros nos resultados de medição não é direta, muito embora estes possam assumir valores superiores aos erros provenientes do ambiente e equipamento. A tarefa de avaliar o impacto causado pelo uso de estratégias de avaliação inadequadas não é tarefa trivial, requerendo uma capacitação muito sólida do pessoal responsável por esta tarefa.

1.3. RASTREABILIDADE E INCERTEZA EM MEDIÇÃO POR COORDENADAS

Atualmente, uma das temáticas mais abordadas em relação à medição por coordenadas é a transferência de rastreabilidade para as medições realizadas em peças de produção.. Rastreabilidade, por sua vez, só é possível de ser obtida quando resultados de medição são informados de forma completa, ou seja, com seus valores de incertezas de medição.

Ao mesmo tempo que a complexidade atingida pela tecnologia de medição por coordenadas proporciona enormes flexibilidade e versatilidade à metrologia dimensional, a enorme quantidade de fatores que podem influenciar os resultados tornam a tarefa de avaliar a incerteza de medição difícil e ainda não resolvida. Mesmo com normas internacionais como a ISO 9001 [22] e a ISO/TS 16949 [23] exigindo a avaliação de incerteza dos processos de medição, a maioria das empresas atualmente não dispõe de metodologia adequada (ou qualquer) para cumprir tais requisitos.

Entretanto, simplesmente renunciar ao conceito de incerteza e operar praticamente às escuras não parece ser uma decisão acertada. Os avanços tecnológicos nas áreas de projeto, desenvolvimento e produção reforçam ainda mais essa constatação. Em virtude da contínua redução dos intervalos de tolerância e de os produtos possuírem um maior valor intrínseco, o efeito de uma medição incorreta pode ser decisivo para a sobrevivência de uma organização.

A lista dos componentes de incerteza que influenciam o resultado de uma medição tridimensional pode se tornar extensa. É importante que se tenha a compreensão de que o resultado de uma dada tarefa de medição apresentará uma incerteza diferente daquela inerente à outra tarefa de medição, uma vez que a contribuição de cada componente de incerteza pode afetar de forma diferenciada distintas tarefas de medição. Em poucas palavras, cada característica avaliada deve ter sua própria incerteza de medição estimada. Uma relação com algumas das principais fontes de erros, e o seu grau de influência sobre a medição dos vários tipos de características GPS, é mostrada na tabela 1.2.

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

Tabela 1.2 – Características GPS e influência de cada componente de incerteza (adaptado de [24])

Assim, o resultado da medição de um furo pode variar significativamente dependendo da máquina utilizada, das estratégias de medição e avaliação, das condições ambientais, etc. Da mesma forma, furos de diâmetros significativamente diferentes apresentarão incertezas diferentes, mesmo que medidos pela mesma máquina, mesmas condições ambientais, mesmas estratégias medição e avaliação, e assim por diante.

O método clássico de avaliação de incertezas, pelo método da sensibilidade conforme ISO GUM [25], é um procedimento ainda muito utilizado para fornecer rastreabilidade às medições por coordenadas. A metodologia descrita no GUM baseia-se no conhecimento do processo de medição e das grandezas que contribuem para a incerteza. Esta análise mostra-se um tanto limitada, principalmente no contexto industrial, uma vez que não consegue contemplar diretamente algumas importantes fontes de erro, como por exemplo, as distorções ocorridas por variações dos gradientes térmicos, ou, ainda mais importante, a interação entre desvios de forma da peça e estratégias de medição/ avaliação. Desta forma, a quantificação de várias das fontes de incerteza fica submetida à avaliações tipo "B", onde a realização de estudos criteriosos e o julgamento de um especialista tornam-se necessários à uma avaliação consistente.

Outro método de avaliação de incerteza, baseado em simulações computacionais, é o método da máquina de medir por coordenadas virtual (ou simplesmente VCMM) [26]. Este método utiliza-se de simulação de Monte Carlo para avaliação de incertezas, e utiliza como parâmetros de entrada medições feitas em um placa de esferas, condições ambientais e as características da peça a serem avaliadas (não incluindo na análise, entretanto, os erros de forma da peça). Uma das limitações do seu uso em larga escala tanto pela indústria quanto por laboratórios de calibração é o alto custo envolvido em sua aquisição e implementação (inclusive com respeito ao elevado tempo de simulação).

Um terceiro método, descrito na ISO/TS 15530-3 [27], orienta a avaliação de incertezas para medições por coordenadas utilizando peças calibradas. O procedimento é fundamentalmente de caráter experimental, considerando quatro componentes na avaliação: uma relativa à calibração da peça (u_{cal}), outra ao procedimento (u_p), a terceira, aos erros provenientes da

variabilidade do processo de fabricação (u_w), e mais a componente sistemática (b), a qual deve ser incluída á incerteza quando não passível de correção. A equação utilizada para o cálculo da incerteza expandida é a que segue:

$$U = k \cdot \sqrt{u_{cal}^2 + u_p^2 + u_w^2} + |b|, \quad k = 2 \text{ (valor recomendado)}$$

São considerados pela especificação os conceitos de similaridade entre características, sendo que a peça calibrada deve ter características similares de material, acabamento e desvios de forma às peças da produção. A estratégia de medição utilizada (incluindo a preparação da medição, a qual inclui limpeza, manuseio e fixação) deve ser idêntica à utilizada no cotidiano. Mais de uma mesma peça proveniente do mesmo processo de produção pode ser utilizada. Uma vantagem deste método é que ele funciona no formato “caixa preta”, onde o maior esforço que deverá ser despendido para obtenção de uma análise consistente da incerteza de medição por parte dos operadores é conduzir a medição das peças padrão conforme as medições cotidianas, normalmente delegando a tarefa mais complexa do procedimento, a calibração da peça, para laboratórios de referência.

2. ESTUDO COMPARATIVO DE MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS

Embora não seja novidade o intrincado sistema de causas do erro em medições por coordenadas, poucos são os trabalhos que exibem de forma quantitativa a questão. Nielsen [28] menciona os aspectos que precisam ser considerados na realização de testes de proficiência em medições por coordenadas; sem reportar, contudo, resultado algum. Entre 1994 e 1996 foi conduzida nos países escandinavos uma intercomparação de máquinas de medição por coordenadas. Para tanto, foram utilizados artefatos simples, como blocos padrão e anéis com erros de forma significativos, e outros geometricamente mais complexos, como um cone porta-ferramenta de máquinas operatrizes. Os resultados foram compilados no trabalho intitulado “*Nordic Audit of Coordinate Measuring Machines – Final Report*” [29], sendo estas as constatações mais importantes:

- Boa correlação entre os resultados das medições de artefatos simples;
- Diferenças significativas entre os resultados das medições de anéis, em função da interação da estratégia de medição com o padrão de desvios de forma;
- Problemas na medição de itens com maior complexidade geométrica;
- Pouca habilidade dos usuários em estimar incertezas.

No entanto, a partir dos resultados apresentados naquele trabalho, não é possível avaliar, ao menos de forma direta, a influência dos erros inerentes à máquina de medição por coordenadas ou induzidos pelo ambiente nas medições.

O estudo que será aqui apresentado foi planejado com o intuito de poder avaliar de forma comparativa os fatores de influência relativos ao equipamento, ambiente, e operador. Para tanto, ele foi dividido em duas etapas: uma comparação utilizando uma peça padrão calibrada e alguns artefatos de referência; e uma avaliação de incertezas a partir de medição de uma peça de cada empresa.

Primeiramente, foi escolhida uma peça real de produção, com características de especificação geométrica de produto (GPS) segundo norma ISO 1101 [14]. Uma estratégia de medição padrão foi desenvolvida para as dez características GPS selecionadas, com a qual a peça foi medida e também calibrada, assegurando uma comparabilidade direta dos resultados obtidos. O experimento com a peça padrão foi concebido com o intuito de avaliar de forma comparativa as fontes de erros de medição introduzidas pela máquina (desvios estruturais e sistema de apalpação), pelo ambiente de medição e pela interação entre ambos, excluindo desta análise fontes de erro normalmente atribuídas ao operador. Além da peça padrão, também circulou entre as empresas um conjunto de padrões dimensionais (anel e blocos padrão) para realização de ensaios normalizados de apalpação.

Para avaliar a influência de erros advindos das estratégias de medição e avaliação das especificações comumente adotadas no âmbito industrial, um segundo estudo foi desenvolvido, o qual consistiu na medição de peças das próprias empresas, com os mesmos programas utilizados nas medições cotidianas. Estas peças foram posteriormente calibradas, e incertezas das medições nas empresas foram estimadas com base na ISO/TS 15530-3 [27].

O estudo tornou-se possível graças à colaboração de algumas empresas brasileiras parceiras, que disponibilizaram seus equipamentos para as medições necessárias, sob a condição de discrição no uso das informações.

2.1. DEFINIÇÃO DA PEÇA PADRÃO CALIBRADA

A peça a ser escolhida para a comparação deveria apresentar um conjunto diversificado de características dimensionais e geométricas, com acessibilidade facilitada a sensores simples, e material comumente encontrado em peças industriais. Com base nestes requisitos, foi escolhida uma carcaça de direção em ferro fundido, a qual é apresentada na figura 2.1.

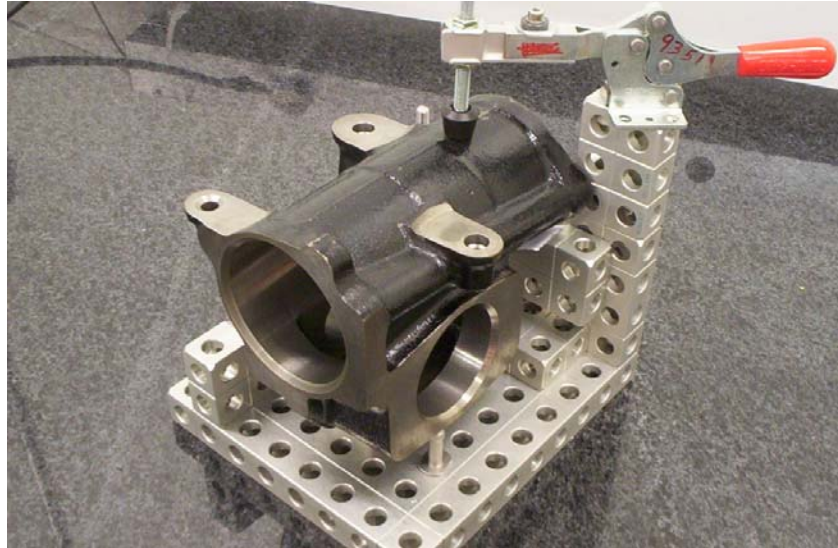


Figura 2.1 – Peça escolhida para a intercomparação

as características encontradas no desenho da peça, foram selecionadas três características dimensionais (diâmetros internos), três características de localização (posições), duas características de orientação (paralelismo e perpendicularidade) e uma característica de movimento (batimento circular). Para melhor visualização das características, um desenho técnico simplificado encontra-se no Anexo I.

2.1.1. Estratégias de medição e avaliação

Para garantir a comparabilidade dos resultados de diferentes máquinas, preferiu-se restringir o estudo a máquinas de um mesmo tipo construtivo (portal móvel) e fabricante, com classe de exatidão semelhantes¹, rodando um mesmo software de medição e avaliação. Por compreender um mesmo software, um programa de medição padrão pôde ser adotado, o qual reduziu os esforços e custos de execução, e assegurou maior consistência dos resultados, garantindo a reprodução das estratégias de medição e avaliação para todas as empresas. Desta forma, outros efeitos que poderiam inserir ruídos indesejáveis, como os associados aos desvios de forma dos elementos geométricos da peça e à divergência entre softwares, puderam ser virtualmente eliminados.

¹ Máximo erro permissível de indicação (MPE_E) em torno de $3,9 + L/250$ (conforme ISO 10360-2 [5]). Valor apenas para efeitos de situação.



Figura 2.2 – Detalhe de uma das características

Um detalhe que vale ser mencionado diz respeito à medição de um dos cilindros (ref.A e gps.001), que tem aproximadamente 60 mm de comprimento, sendo que apenas 16 mm destes podem ser medidos como seções circulares completas (figura 2.2). Para não comprometer a estabilidade da referência, se optou por medir dois círculos completos e um arco com 240°, atingindo uma profundidade de aproximadamente 33 mm.

Todas as características associadas foram ajustadas pelo método dos mínimos quadrados, opção essa que se justifica pela relativa estabilidade apresentada por este método de avaliação frente a pontos atípicos (*outliers*), e por não haver a necessidade de utilizar algoritmos de zona uma vez que os efeitos produzidos pelos desvios de forma estão sendo propositalmente desconsiderados da análise. Uma tabela contendo a descrição das estratégias de medição adotadas para cada característica encontra-se no Anexo II.

2.1.2. Calibração da peça

As características de interesse da peça foram calibradas numa MMC de referência, instalada em um ambiente com temperatura mantida em $20,0^{\circ}\text{C} \pm 0,3^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar em $50\% \pm 10\%$, com base no procedimento apresentado na ISO/TS 15530-2 [30]. Esta especificação técnica descreve como as medições devem ser conduzidas de forma a acessar e compensar da melhor forma os erros sistemáticos, através de substituições e rebatimentos. Os mesmos pontos amostrados na peça foram considerados, conforme o programa de medição padrão desenvolvido, nas medições de referência. Os valores determinados para as características avaliadas são, portanto, diretamente comparáveis, desde que não existam divergências significativas entre os softwares da MMC de referência e os das máquinas avaliadas. Os

valores de referência de cada característica avaliada encontram-se listados no Anexo II.

2.2. REALIZAÇÃO DA COMPARAÇÃO UTILIZANDO A PEÇA PADRÃO

Medições de intercomparação têm uma longa tradição na metrologia, sendo um importante meio para verificação de rastreabilidade. A intercomparação aqui realizada foi planejada com o objetivo de avaliar o comportamento de máquinas de medição por coordenadas de uso industrial na medição de artefatos sob condições distintas.

2.2.1. Procedimento de medição

A fim de solicitar os efeitos mais diversos associados à MMC e a sua interação com o ambiente, a peça é medida em diferentes situações (figura 2.3), sendo duas posições distintas sobre o volume da máquina (próxima e afastada do início da escala mais longa da máquina), com duas orientações em cada posição (por exemplo, alinhada ora com o eixo X, ora com o eixo Y), procedimento este repetido em dois turnos. Dessa forma, o efeito de fatores como a temperatura absoluta das escalas, a variação da temperatura no tempo e no espaço e os erros de escala e geometria da MMC; pode ser estimado com base na avaliação dos resultados das medições. Para cada uma das situações foram realizados quatro ciclos de medição, estando a configuração do estudo resumida na tabela 2.1.

Turno	Posição	Orientação	Ciclos	Tempo
manhã	Y-	Y-	4	0:28:00
		X+	4	0:28:00
	Y+	Y-	4	0:28:00
		X+	4	0:28:00
tarde	Y-	Y-	4	0:28:00
		X+	4	0:28:00
	Y+	Y-	4	0:28:00
		X+	4	0:28:00
Total			32	4:04:00

Tabela 2.1 – Resumo do procedimento de medição

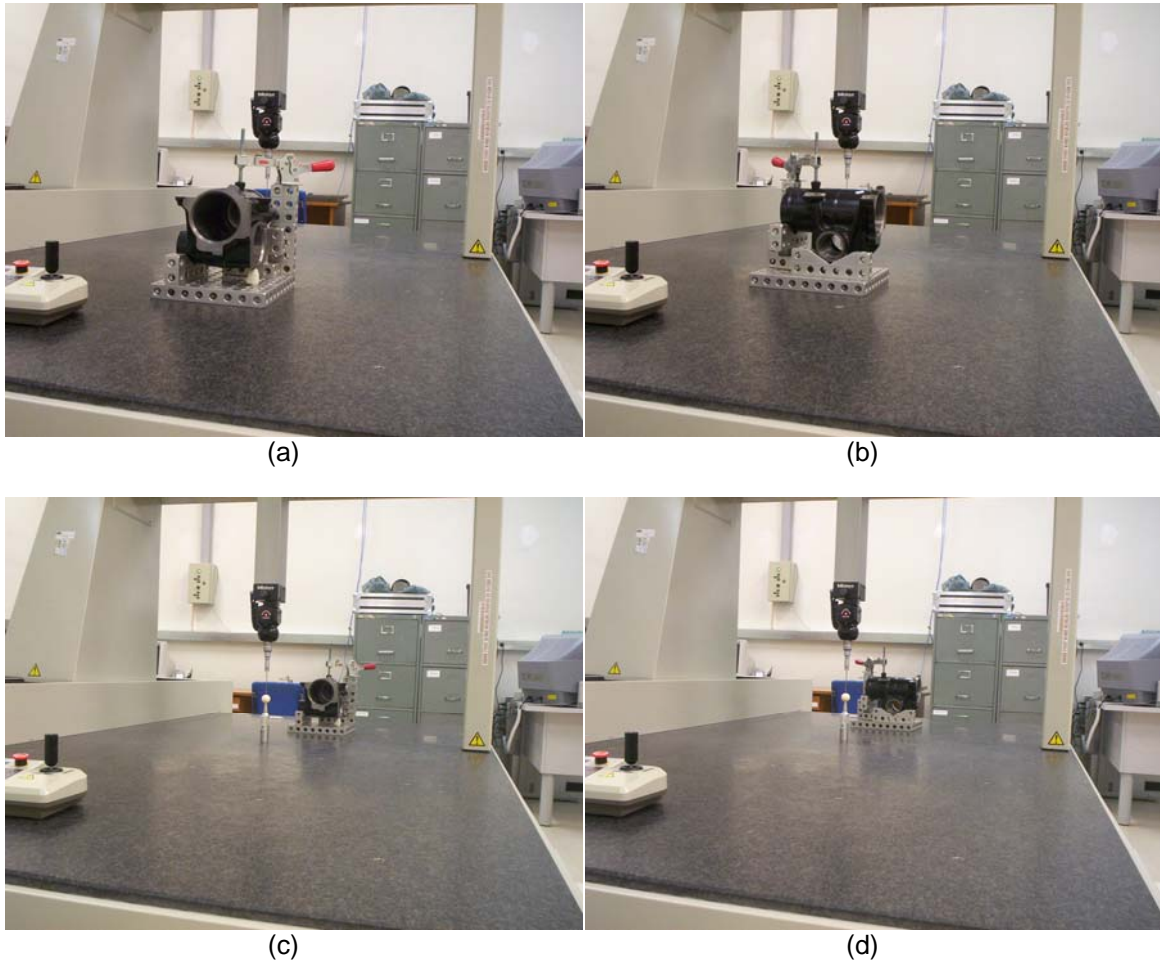


Figura 2.3 – Posições/orientações da peça sobre o desempenho

2.2.2. Análise de variâncias

Em virtude da configuração do estudo, os resultados foram avaliados pelo método de análise de variância (ANOVA), para identificar e quantificar os efeitos aleatórios, e pseudoaleatórios², nelas atuantes. De acordo com a configuração, quatro componentes de variação puderam ser estimados:

- Componente de repetitividade: considera efeitos estocásticos associados, por exemplo, ao apalpador de medição e à indexação dos sensores de medição (se aplicável);

² Efeitos sistemáticos por natureza, porém tratados pelo método de análise de variância como efeitos aleatórios, em função da amostragem limitada.

- Componente de variação entre turnos: considera fatores como as flutuações da temperatura ao longo do dia;
- Componente de variação entre posições/orientações: considera efeitos como os erros de escala e geometria da máquina (ou induzidos pela temperatura);
- Componente relacionado à interação entre as posições/orientações e o período de execução das medições.

Da decomposição dos componentes de variação de cada combinação característica-máquina, resultados de expressiva relevância puderam ser observados, os quais são sintetizados na figura 2.4, e comentados a seguir.

]

Decomposição dos Componentes de Variação

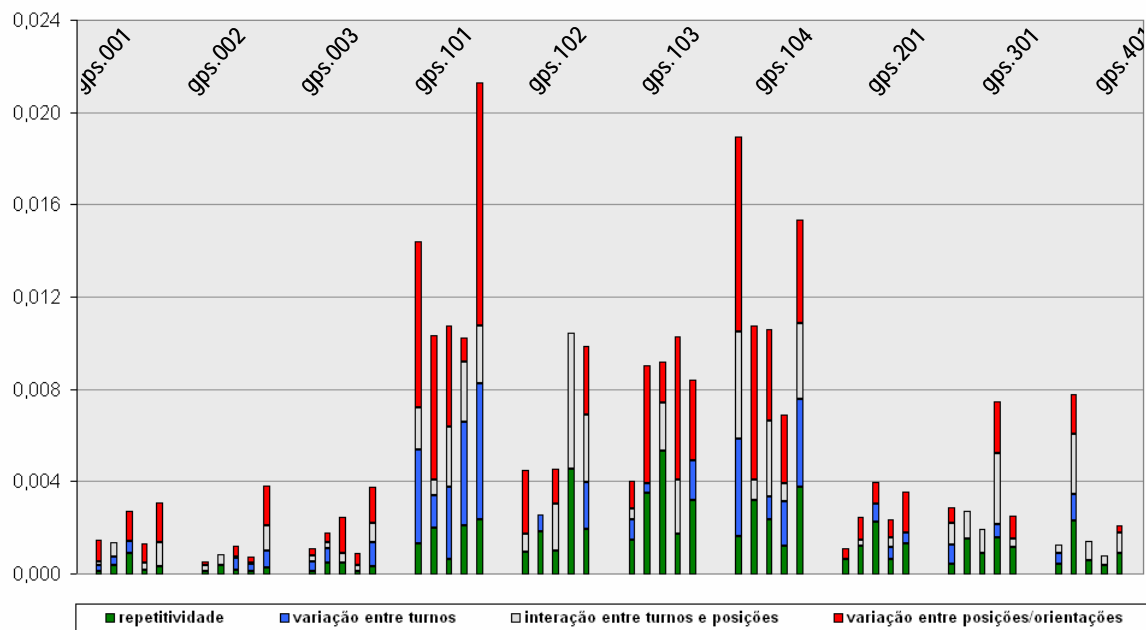


Figura 2.4 – Decomposição dos componentes de variação, cada um deles expressados como unidade de desvio padrão, de todas as combinações característica-máquina possíveis (valores em milímetros)

a. Nas medições dos diâmetros:

- i. por não exigirem indexação da ponta durante a medição dos elementos, e sendo o diâmetro calculado por mínimos quadrados, na verdade, um valor médio, valores submicrométricos podem ser vistos para a repetitividade;

- ii. por sua vez, o componente dominante de variação refere-se às medições em distintas posições e (principalmente) orientações, indicando que erros de escala, sejam eles inerentes à máquina ou induzidos pela temperatura, podem comprometer significativamente a medição;
 - iii. apesar de ser uma medição de relativa simplicidade, os valores estimados para as variações combinadas podem divergir consideravelmente um dos outros.
- b. Nas medições das características tipo posição:
- i. o componente dominante de variação, na maioria dos casos, refere-se às medições em distintas posições e (principalmente) orientações, fruto dos erros de escala e esquadro da máquina (a ela inerentes ou termicamente induzidos);
 - ii. em alguns casos a parcela da variação atribuível às medições em distintos períodos do dia, reflexo das flutuações da temperatura ao longo do tempo, assume magnitudes relevantes;
 - iii. por serem definidas por múltiplos elementos geométricos, por exemplo, planos de referência e eixos tolerados, e exigirem indexações da ponta de medição, o componente de repetitividade pode assumir valores não desprezíveis.
- c. Nas medições das características paralelismo e perpendicularidade:
- i. por serem definidas por diferentes elementos geométricos, por exemplo, referência e elemento tolerado, e exigirem indexações da ponta de medição, a variação atribuída à repetitividade desponta como a maior parcela em vários casos;
 - ii. por não serem afetadas por erros de escala, e dada a reduzida influência dos erros de esquadro (conseqüência das dimensões da peça), a parcela de variação relativa às medições em várias posições/orientações assume valores pouco significativos.

d. Nas medições da característica batimento circular (radial):

- i. como o elemento tolerado e a referência indicada podem ser medidos com a mesma orientação da ponta e dada a importância secundária dos erros de escala e esquadro, o componente de repetitividade domina a variação;
- ii. a excessiva variação de um dos resultados deve-se ao tipo de apalpador, diferente dos demais, o qual possui um padrão trilobulado de resposta.

Uma vez que a decomposição dos componentes de variação nada diz a respeito dos desvios em relação aos valores de referência (erros sistemáticos), análises complementares tornaram-se necessárias. Na segunda análise, foi considerada a média aritmética de todas as medições efetuadas como a melhor estimativa de cada grandeza, e a incerteza como o desvio padrão combinado (dos componentes isolados de variação) multiplicado por um fator de abrangência igual a dois. Uma forma de se representar graficamente essas informações é mostrada na figura 2.5.

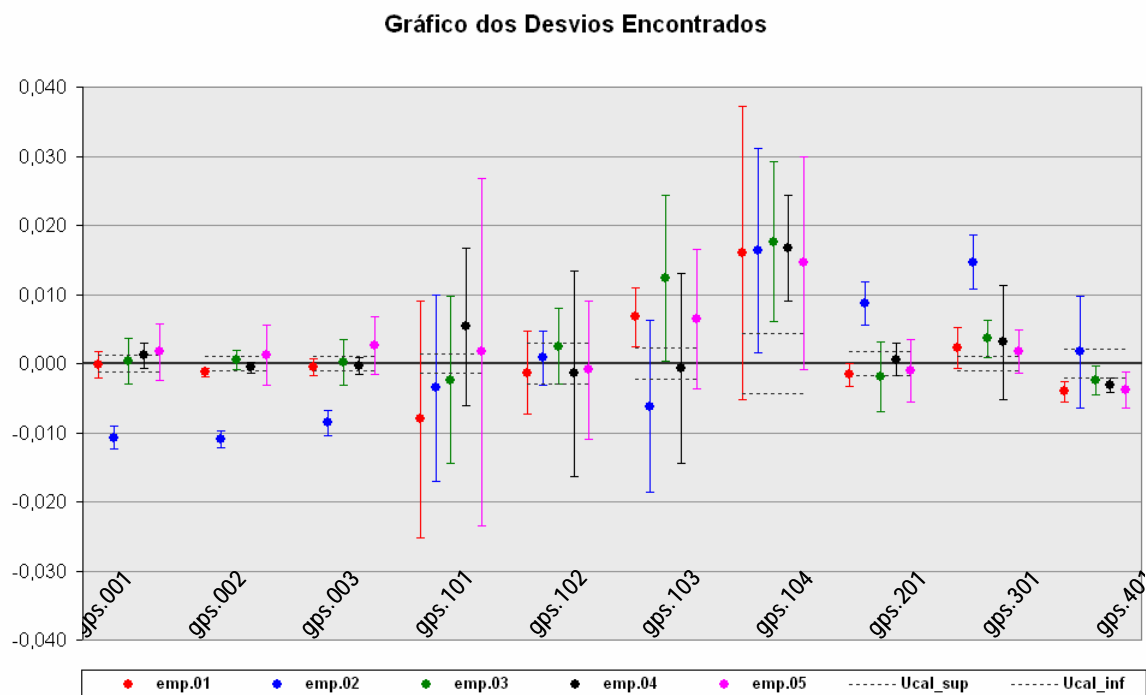


Figura 2.5 – Desvios médios obtidos (em relação aos respectivos valores de referência) para cada combinação máquina-característica, com as respectivas incertezas das medições (bigodes) e dos valores de referência (tracejados horizontais); valores em milímetros

Como as incertezas foram calculadas a partir dos quatro componentes de variação, pode-se considerá-las superestimadas sob determinadas perspectivas, e o gráfico precisa ser interpretado com cautela. Em função da superestimação das incertezas, apenas dos desvios significativamente diferentes de zero se pode tirar alguma conclusão. A maior parte dos desvios significativos refere-se a uma mesma máquina (emp.02), explicados pelo modelo de apalpador de medição, com características funcionais distintas dos demais. Desvios significativos podem ser também observados nas medições do batimento circular (GPS.401), ocasionados por divergências existentes entre o software da MMC de referência e os das demais máquinas. No caso de uma das posições (GPS.104), a diferença encontrada entre os valores da MMC de referência e os das demais máquinas deve-se a uma divergência na definição do sistema de referências, devendo esta ser desconsiderada quanto às tendências encontradas.

Com base nos valores acima obtidos e nos valores de referência, pôde-se calcular o erro normalizado, de acordo com a equação abaixo:

$$E_n = \frac{y_m - y_{cal}}{\sqrt{U_m^2 + U_{cal}^2}}$$

onde y_m é a média de todas as medições em uma tridimensional, y_{cal} é o valor calibrado, U_m é a incerteza expandida determinada pela combinação na forma RSS dos quatro componentes de variação, e U_{cal} é a incerteza expandida do valor calibrado. Um valor de E_n no intervalo $[-1,1]$ indica que há uma boa concordância entre os dois resultados, e um valor de E_n fora daquele intervalo indica que os resultados diferem-se substancialmente. É importante notar que um valor elevado para U_m também pode resultar em um valor pequeno para E_n , logo o parâmetro E_n pode gerar uma imagem distorcida da situação. Valores obtidos de erros normalizados são apresentados na figura 2.6.

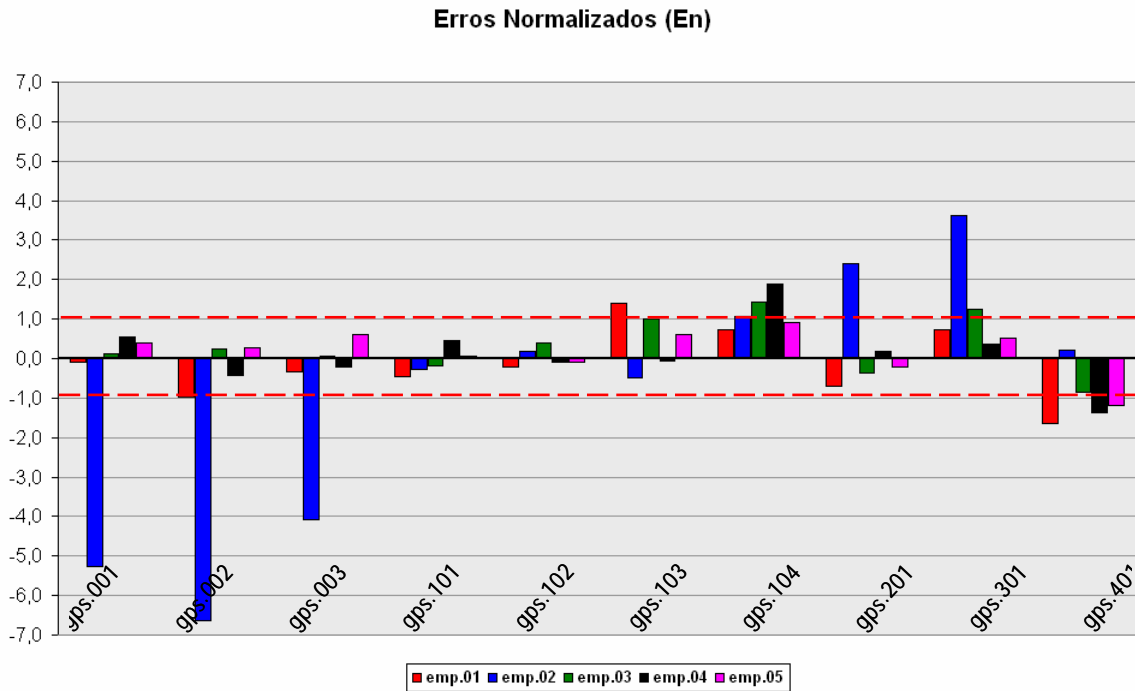


Figura 2.6 – Erros normalizados para cada combinação máquina-característica

2.2.3. Análise pelas cartas de tendência e amplitude

A fim de compensar as limitações das análises anteriores, que randomizaram efeitos sistemáticos (por isso o uso do termo pseudoaleatórios), uma análise das tendências individuais fez-se necessária. O uso de gráficos de controle tradicionais é bastante conveniente para visualizá-las, sendo dois dos casos ilustrados nas figuras 2.7 e 2.8. Em todos os gráficos, as medições em distintas posições/orientações são indicadas por asteriscos (situações conforme figura 2.3), e as medições em diferentes períodos por cores distintas.

Os dois pares de gráficos das tendências e das amplitudes da figura 2.7 mostram as medições de um mesmo elemento da peça padrão (diâmetro GPS.002) em duas máquinas supostamente semelhantes. A partir dos gráficos das amplitudes pode-se observar uma diferença entre as amplitudes médias das medições em distintas máquinas. As maiores particularidades, por sua vez, estão evidenciadas nos gráficos das tendências, onde podem ser observados, em um mesmo equipamento, desvios significativos em medições executadas em diferentes orientações e períodos, e entre máquinas desvios sistemáticos que também não podem ser desprezados; todos eles acima dos limites impostos pela repetitividade.

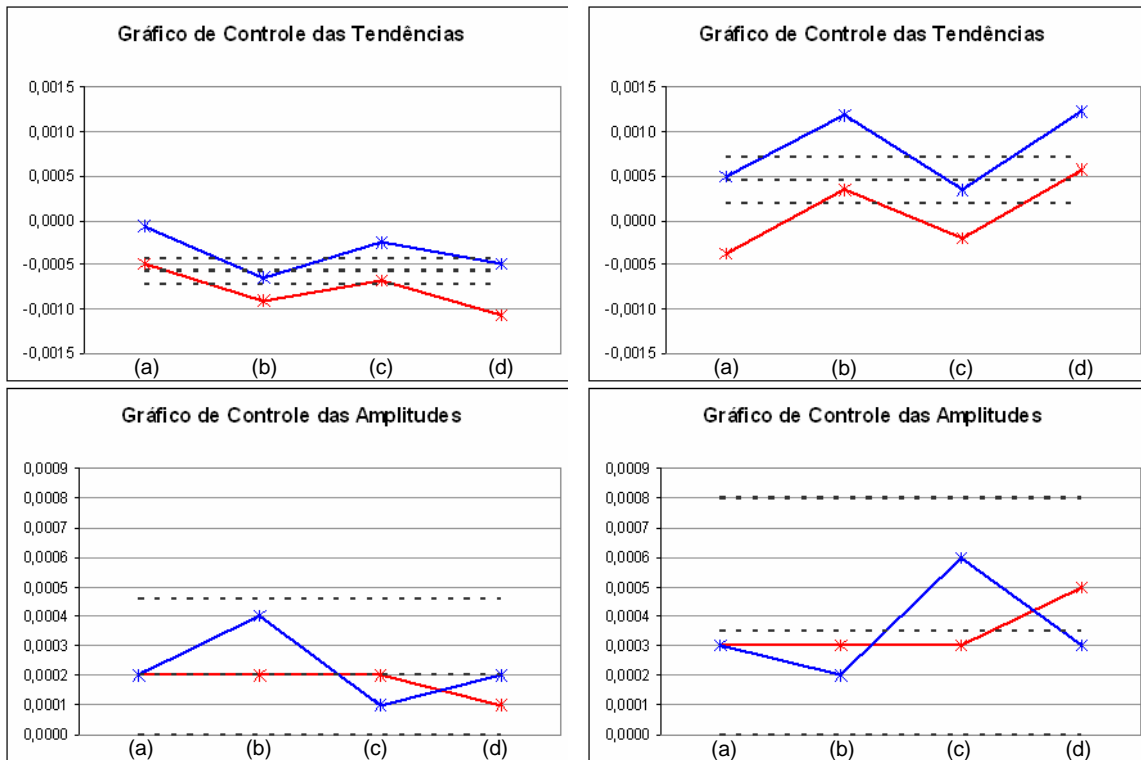


Figura 2.7 – Gráficos de controle das tendências e das amplitudes relacionados às medições do diâmetro GPS.002 em diferentes máquinas (valores em milímetros)

Embora diferenças (que podem ser significativas dependendo da aplicação) tenham sido observadas nas medições de diâmetro, é de se esperar que a magnitude delas tenda a crescer em medições de maior complexidade. Como exemplo, na figura 2.8 são mostrados os resultados das medições de uma característica aninhada da peça padrão (posição GPS.101). Verifica-se, nos gráficos das amplitudes, que a repetitividade das medições feitas em uma máquina é aproximadamente a metade da repetitividade na outra máquina.

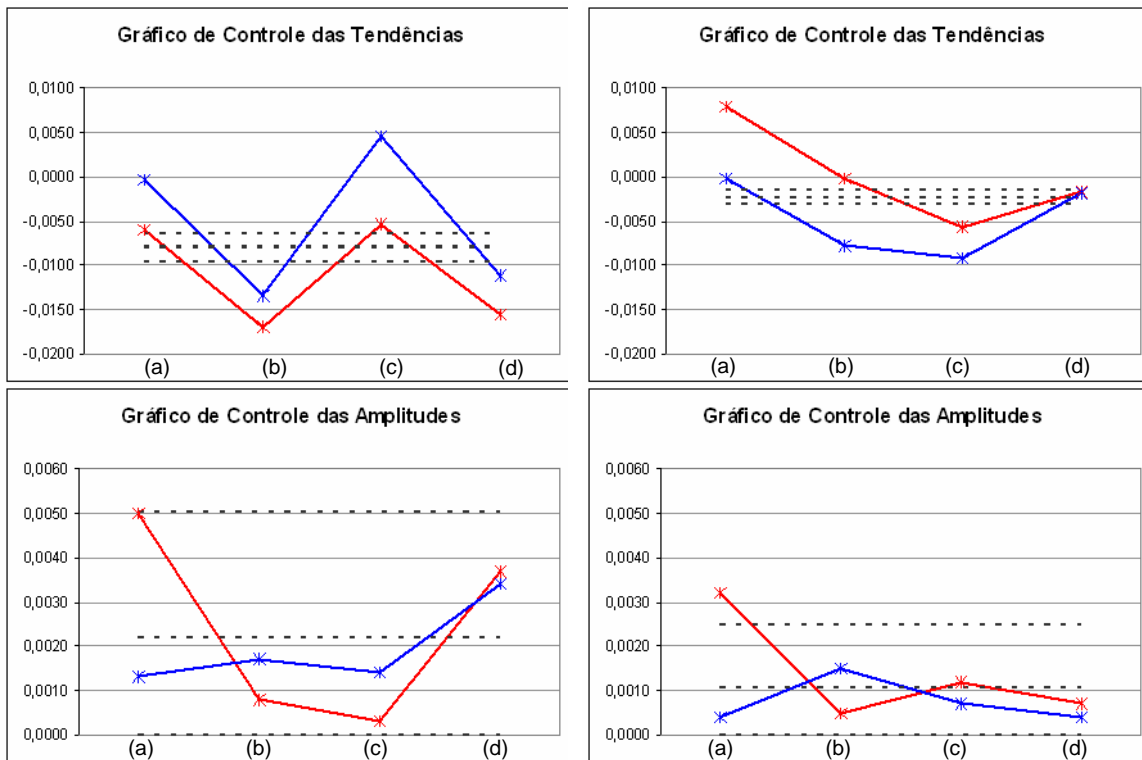


Figura 2.8 – Gráficos de controle das tendências e das amplitudes relativos às medições da posição GPS.101 em diferentes máquinas (valores em milímetros)

Diferenças muito mais significativas, por sua vez, podem ser extraídas dos gráficos das tendências, onde não só os resultados dentro de uma mesma máquina, mas também entre máquinas, impressionam, e de alguma forma exprimem o quão heterogêneas podem ser as medições de um mesmo objeto sob condições específicas.

2.3. ENSAIOS DE VERIFICAÇÃO DOS APALPADORES

Em adição às medições da peça padrão, ensaios com artefatos de referência (figura 2.9) foram conduzidos para checar a capacidade do apalpador de medição.

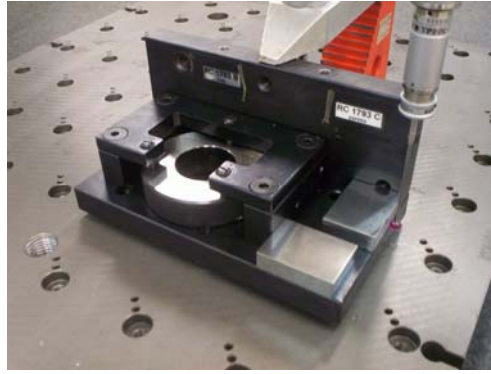


Figura 2.9 – Conjuntos de artefatos (blocos e anel padrão) para verificação do sistema de apalpação

Os ensaios estão definidos na VDI/VDE 2617-3 [2] e na BS6808 [31], e serão brevemente descritos aqui. A repetitividade pura (R_1) é estimada pela medição do mesmo ponto na superfície de um bloco padrão 25 vezes, com o bloco alinhado com um dos eixos da máquina (não afetado pela histerese). A incerteza de apalpação 1D (V_1) é avaliada por meio de 50 medições bidirecionais de um bloco padrão alinhado com cada um dos eixos da máquina (afetado pela histerese). A incerteza de apalpação 2D (V_2) é estimada pela medição de um anel com 50 pontos igualmente distribuídos ao redor da sua circunferência, orientado em cada um dos planos principais. Os resultados obtidos são encontrados na figura 2.10.

Resultados dos Ensaio de Apalpação

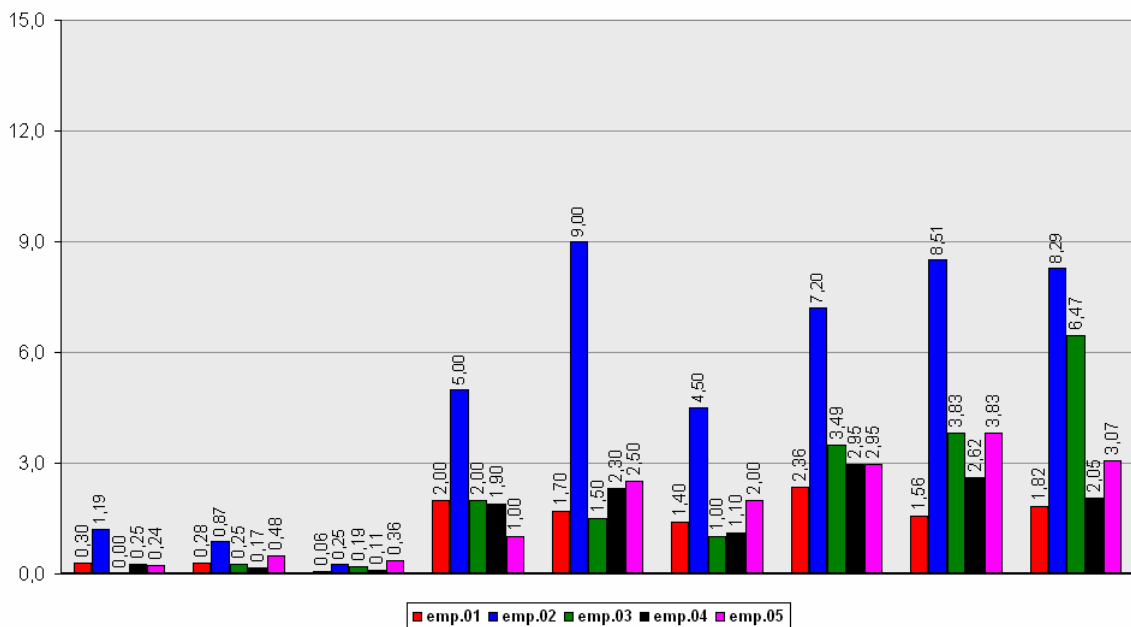


Figura 2.10 – Resultados obtidos dos ensaios de apalpação (valores em micrometros)

Pode-se verificar que desvios apreciáveis são encontrados para uma das máquinas (emp.02), corroborando com os desvios encontrados nas medições da peça padrão. Este efeito deve-se à característica trilobular do apalpador, como se pode verificar no gráfico do ensaio utilizando o anel padrão (V_2) por esta máquina (figura 2.11).

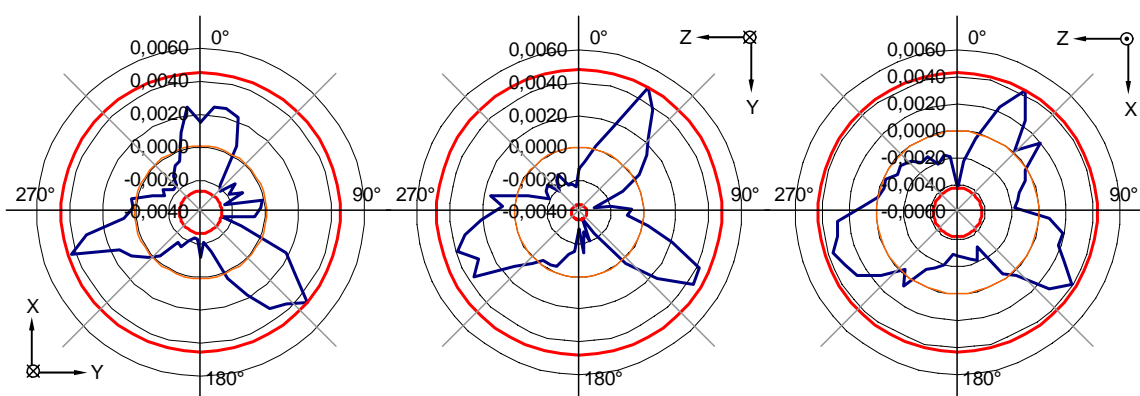


Figura 2.11 – Gráfico mostrando o perfil trilobular de um dos apalpadores, obtido a partir do ensaio de apalpação bidimensional (valores em milímetros)

2.4. ESTUDO UTILIZANDO PEÇAS DAS EMPRESAS

Os estudos realizados com a intercomparação consideraram somente fatores de influência relativos à interação equipamento e ambiente, excluindo da análise o fator operador. Para verificar a influência deste fator, uma peça de linha de produção de cada empresa participante foi escolhida, e algumas características consideradas de maior importância foram selecionadas. Foi então conduzida uma avaliação de incertezas com base na especificação técnica ISO/TS 15530-3 [27], onde as peças foram medidas com o programa de medição das próprias empresas. Posteriormente, a calibração das características selecionadas foi realizada, com base especificação ISO/TS 15530-2 [30].

O procedimento de medição adotado para este estudo consistiu na realização de 15 a 20 ciclos de medição na peça (os quais incluíram referenciamento manual, mas não manuseio e fixação), em uma única posição/orientação, realizados em uma única bateria de medição, com uma única qualificação dos sensores. Este procedimento foi adotado de modo a reduzir os tempos de avaliação, reduzindo as influências de derivas térmicas ao longo do experimento, procurando-se evidenciar os fatores provenientes de

interação entre estratégia de medição e desvios de forma da peça em questão, bem como aqueles provenientes de divergência entre métodos de avaliação. É de extrema importância ressaltar que as incertezas obtidas por este procedimento não são de fato representativas do processo de medição como um todo, pois desconsideram a variabilidade introduzida por distintos fatores, tais como manuseio da peça, dispositivo de fixação, qualificação dos sensores, instabilidade de mais longo termo e interação da estratégia de medição/avaliação com variabilidade dos desvios de forma derivados do processo de produção, estando em desconformidade com a especificação, não devendo, portanto, ser utilizadas para fins de validação do processo de medição.



Figura 2.12 – Medição da peça pertencente a uma das empresas participantes, sendo realizada no equipamento da mesma

Para avaliar o grau de influência das estratégias definidas pelos operadores, foram selecionadas algumas características das peças das

empresas, utilizados os valores dos erros sistemáticos (b), das incertezas relativas ao procedimento (u_p) multiplicadas por um fator de abrangência igual a dois, e das incertezas expandidas da calibração (U_{cal}), advindos da análise com base na especificação supracitada. O erro normalizado foi também calculado, utilizando as mesmas variáveis, conforme a equação a seguir apresentada.

$$E_n = \frac{b}{\sqrt{(2 \cdot u_p)^2 + U_{cal}^2}}$$

Embora uma análise direta (quantitativa) da parcela dos erros sistemáticos que podem ser atribuídos às inconsistências das estratégias de medição/avaliação não seja possível, visto esses erros são também induzidos pelo equipamento/ambiente, uma análise qualitativa, levando em consideração os máximos erros esperados em máquinas com a classe de exatidão das participantes do estudo, revela que os erros associados a estratégia de medição/avaliação podem tomar proporções surpreendentemente elevadas.

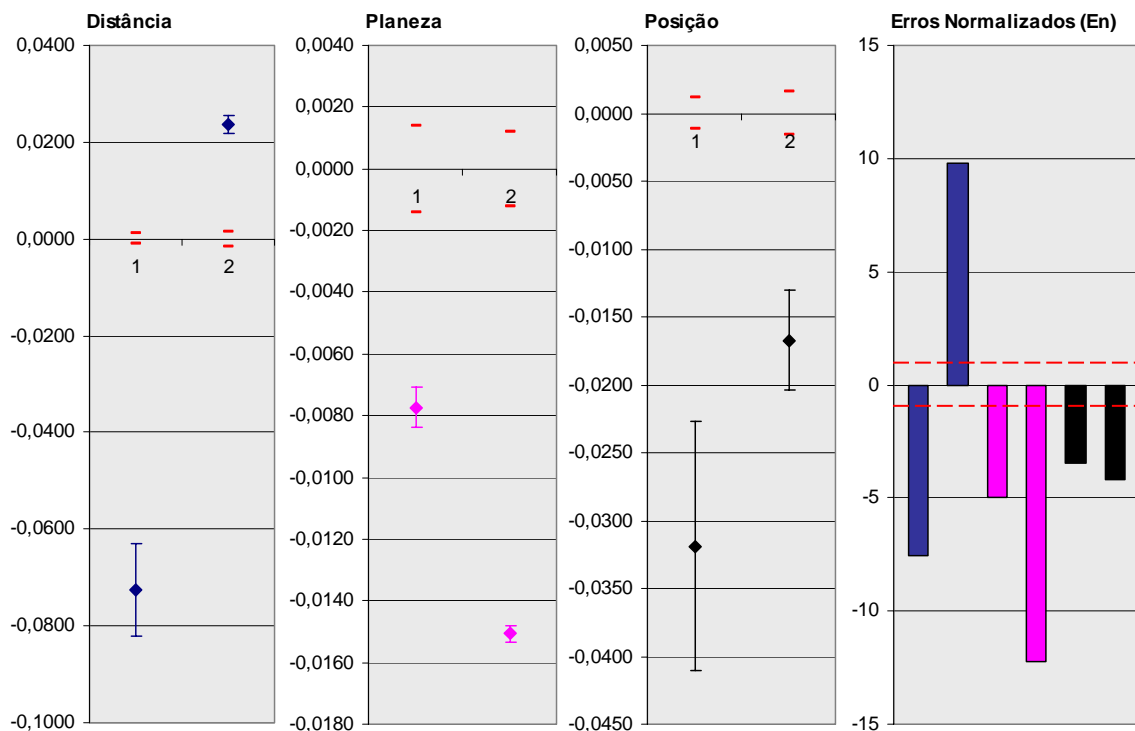


Figura 2.13 – Gráficos mostrando desvios médios obtidos nas medições de algumas características das peças das empresas (pontos), incertezas da calibração (traços horizontais), parcela aleatória da incerteza de medição (bigodes), e erros normalizados (valores em milímetros)

Estes gráficos apresentam algumas situações onde se pôde perceber um misto de desconhecimento e descaso por parte da metrologia industrial, com algumas estratégias de medição utilizadas tais como:

- Avaliação da planeza de um elemento geométrico a partir da medição de quatro pontos aleatoriamente escolhidos;
- Avaliação do diâmetro e posição de um furo supostamente cilíndrico a partir de uma única seção com quatro pontos uniformemente espaçados;
- Avaliação da distância entre dois planos supostamente paralelos a partir de uma única linha definida por dois pontos.

Pode-se perceber que os erros encontrados no caso de planeza e posição estão muito aquém dos que realmente são apresentados pela peças, e muito além do que os que são originados pelo conjunto máquina (sistema de apalpação e estrutura) e ambiente. Nas medições destas características, há um risco potencial de peças fora de conformidade estarem sendo aceitas, ou de provimento de informações pouco úteis para realimentação do processo de produção. A presença de erros que podem ser considerados, em muitos casos, grosseiros, demonstra a relevância de programas de capacitação em medição por coordenadas, e que investimentos isolados em equipamentos de medição não representam garantia de resultados confiáveis.

3. CONCLUSÕES

A comparação de máquinas de medir por coordenadas objeto deste trabalho mostrou os seguintes fatos relevantes:

- O tipo de característica geométrica a controlar possui forte influência na melhor incerteza de medição que pode ser obtida. Em geral, resultados da medição de características de posição e orientação apresentarão maior incerteza que os resultados da medição de características dimensionais. Isso pode ser atribuído principalmente ao processo de estabelecimento das referências. O fenômeno é mais marcante quando essa operação envolve indexação do cabeçote de medição.
- A medição da mesma característica em diferentes setores do volume de medição ou em diferentes orientações com relação aos eixos coordenados da máquina pode gerar resultados significativamente diferentes. A presença de gradientes espaciais de temperatura foi causa de diferenças expressivas em no mínimo uma das máquinas envolvidas.
- Instabilidades ou variações temporais da temperatura ambiente demonstraram ser responsáveis por desempenhos diferenciados durante o dia.
- O erro de repetitividade é, em geral, uma componente pouco expressiva, embora ele aumente no caso de características geométricas que precisem do estabelecimento de referências (por exemplo, tolerâncias de posição).
- Apalpadores com diferentes princípios de chaveamento possuem impactos diferentes na incerteza das medições. Em geral, padrões de erro de apalpação trilobulados vão em detrimento da exatidão, seja na medição de tamanho (por exemplo, diâmetro) ou na medição de características geométricas (por exemplo, posição).
- Os dados obtidos com peças das próprias empresas demonstraram que a estratégia de medição utilizada influencia de forma expressiva o desempenho global do sistema de medir por coordenadas em tarefas específicas.

Desta forma, a situação apresentada de forma qualitativa na figura 1.10 pôde ser validada: as decisões atribuíveis ao operador, enquanto planejador da medição, são críticas e podem modificar radicalmente o desempenho metrologico de uma dada máquina de medir por coordenadas. Operadores atuantes na definição de estratégias de medição precisam de sólidos conhecimentos de geometria e especificações geométricas de produto, assim como de tecnologia de medição por coordenadas. Não basta treinar os operadores no uso do software de medição, embora a proficiência em programação seja pré-requisito para aproveitar esses conhecimentos na geração de programas técnica e economicamente efetivos.

Muito embora seja este fato de vital importância, muitos tomadores de decisão não o levam em consideração no momento de direcionar o investimento. Apesar dos altos patamares atingidos em termos de versatilidade e exatidão pelos modernos equipamentos de metrologia, o ser humano continua sendo o elo mais importante da cadeia que constitui um processo de medição. Manter o foco de forma exagerada sobre ao equipamento, desconsiderando a complexidade que envolve todo um ciclo de medição por coordenadas, freqüentemente conduz a resultados insatisfatórios, podendo mesmo comprometer de forma inaceitável o investimento feito em metrologia.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. S. Hamburg-Piekar, Calibração de Peças Padrão em Máquinas de Medir por Coordenadas. Dissertação de Mestrado em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 14 de Junho de 2006.
- [2] VDI/VDE 2617-3:1989, *Genauigkeit von Koordinatenmeßgeräten; Kenngrößen und deren Prüfung; Komponenten der Meßabweichung des Gerätes*, VDI-Verlag, Düsseldorf, Deutschland.
- [3] E. Trapet, *Interim Checking of Coordinate Measuring Instruments – Responsibility of the User*. APMC Annual General Meeting and Workshop, Hamilton, ON, Canada, June 2005.
- [4] H. Kunzmann, J. Ni, F. Wäldele, *Accuracy Enhancement*. In: *Coordinate Measuring Machines and Systems*, Chapter 10, Edited by J. A. Bosch, Marcel Dekker Inc., New York, NY, USA, 1995.
- [5] ISO 10360-2:2001, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Acceptance and Reverification Tests for Coordinate Measuring Machines (CMM) – Part 2: CMMs Used for Measuring Size*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [6] V. C. Naderlli, G. D. Donatelli, *A Simple Solution to Interim Check of Coordinate Measuring Machines*. Eighteenth IMEKO World Congress: Metrology for a Sustainable Development, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, September 2006.
- [7] K. Doytchinov, *Coordinate Measuring Machine Workshop Lecture Notes*, National Research Council (NRC), Ottawa, ON, Canada, May 2004.
- [8] S. D. Phillips, *Performance Evaluations*. In: *Coordinate Measuring Machines and Systems*, Chapter 7, Edited by J. A. Bosch, Marcel Dekker Inc., New York, NY, USA, 1995.
- [9] A. Weckenmann, et al., *Geometrical Product Specifications – Course for Technical Universities*. Warsaw University of Technology Printing House, 2001.
- [10] E. Trapet, F. Wäldele, *Rückführbarkeit von Koordinatenmeßgeräten*. Abschlußbericht zum DFG Forschungsvorhaben TR 350/1-2 (Fortsetzungsantrag), 2000.
- [11] Fundação CERTI, *Introdução à Tecnologia de Medição por Coordenadas*, apostila do curso, Abril de 2007.
- [12] R. M. M. Orrego, B. Di Giacomo, A. J. Abackerli, *Fontes de Erros em Metrologia a Três Coordenadas: Considerações Gerais*. Revista Ciência & Tecnologia, Volume 8, Número 16, dezembro de 2000. Universidade Metodista de Piracicaba, São Paulo.
- [13] C. Porta, F. Wäldele, *Testing of Three Coordinate Measuring Machine Evaluation Algorithms*. Report EUR 10909 EN, CEC, 1986.
- [14] ISO 1101:2004, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Geometrical Tolerancing – Tolerances of Form, Orientation, Location and Run-out*, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [15] G. D. Donatelli, et al., *Metrologia Geométrica na Indústria: Tendências e Desafios*. In: *O Futuro da Indústria: a Importância da Metrologia para o Desenvolvimento Industrial*, Coletânea de Artigos, pp. 9-28, 2005.
- [16] ISO 14660-1:1999, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Geometrical Features – Part 1: General Terms and Definitions*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [17] VDI/VDE 2631, *Formprüfung (1-9)*. VDI-Verlag, Düsseldorf, Deutschland.

- [18] T. Killmaier, A. R. Babu, *Genetic Approach for Automatic Detection of Form Deviations Of Geometrical Features For Effective Measurement Strategy*. Precision Engineering 27 (2003) 370–381.
- [19] R. Walker, *CMM Form Tolerance Algorithm Testing*. GIDEP Alert X1-A-88-01, Government-Industry Data Exchange Program, Department of Defense, Washington, D.C., 1988.
- [20] ASME Y14.5M:1994, *Dimensioning and Tolerancing*. American Society of Mechanical Engineers, USA.
- [21] ISO 286:1988, *ISO System of Limits and Fits*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [22] ISO 9001:2000, *Quality Management Systems – Requirements*, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [23] ISO/TS 16949:2002, *Quality Management Systems – Particular Requirements for the Application of ISO 9001:2000 for Automotive Production and Relevant Service Part Organizations*, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [24] J. G. Salsbury, *A Simplified Methodology for The Uncertainty Analysis of CMM Measurements*, Precision Metrology/Applying Imaging & Sensoring Conference, Indianapolis, Indiana, EUA, 1995 June.
- [25] ISO GUM, *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, Published Jointly by BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, Geneva, Switzerland, 1995.
- [26] E. Trapet, M. Franke, F. Härtig, H. Schwenke, F. Wäldele, M. Cox, et al., *Traceability of Coordinate Measurements According to the Method of the Virtual Measuring Machine*, Part 2 of the Final Report Project MAT1-CT94-0076, PTB F-35, March 1999.
- [27] ISO/TS 15330-3:2004, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Coordinate Measuring Machines (CMM): Techniques for Determining the Uncertainty of Measurement – Part 3: Use of Calibrated Workpieces or Standards*, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [28] H. S. Nielsen, *CMMs and Proficiency Testing*. International Dimensional Workshop, Knoxville, TN, USA, May 2002.
- [29] H. N. Hansen, L. de Chiffre, *Nordic Audit of Coordinate Measuring Machines – Final Report*. Technical University of Denmark, May 1996.
- [30] Draft ISO/TS 15530-2, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Coordinate Measuring Machines (CMM): Techniques for Determining the Uncertainty of Measurement – Part 2: Use of multiple measurements strategies in calibration of artifacts or Standards*, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [31] BS 6808: Part 2, *Coordinate Measuring Machines: Methods for Verifying Performance*. London, 1987

ANEXO I – Desenho Simplificado da Peça Padrão

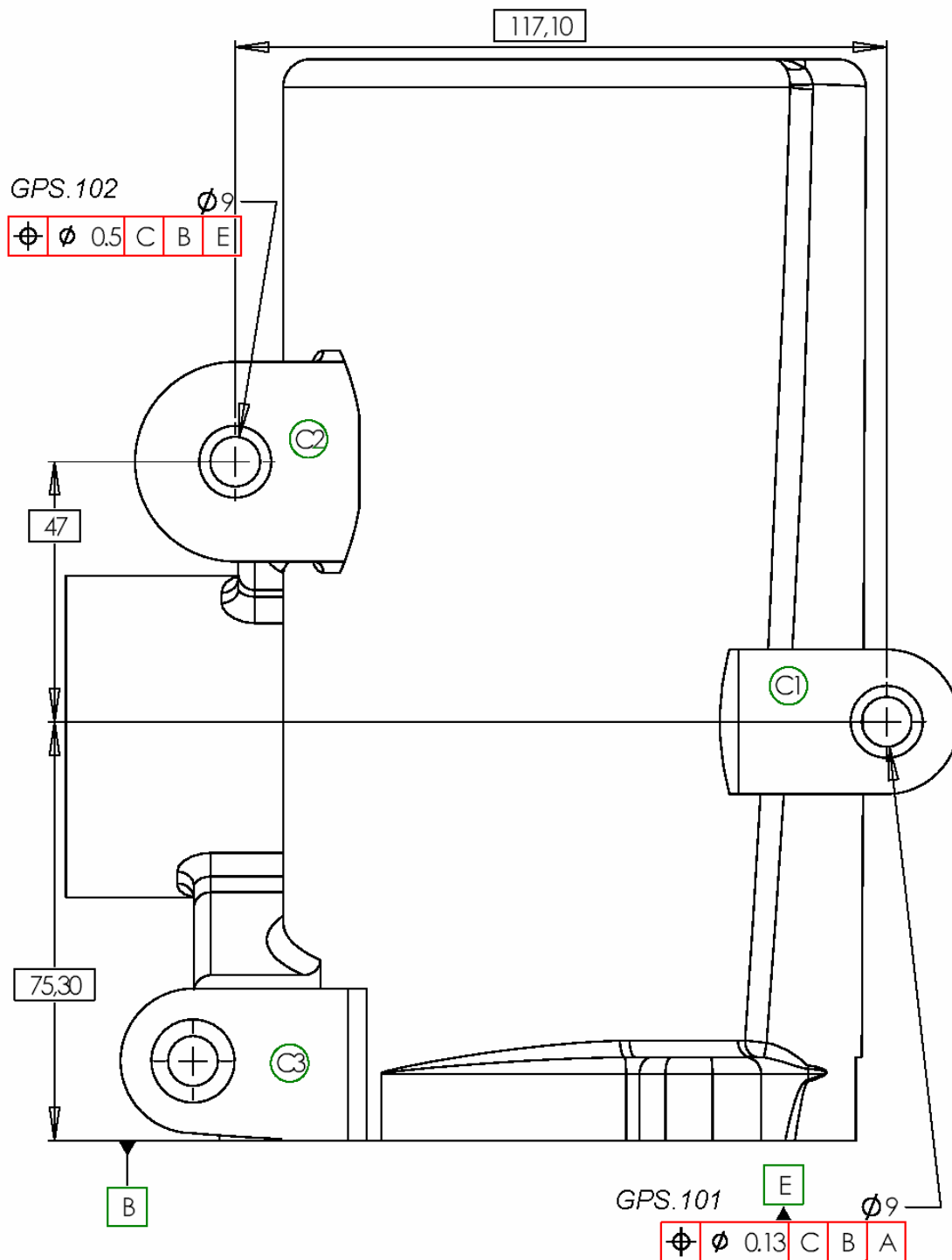


Figura A1.1 – Desenho simplificado da peça padrão, vista 1

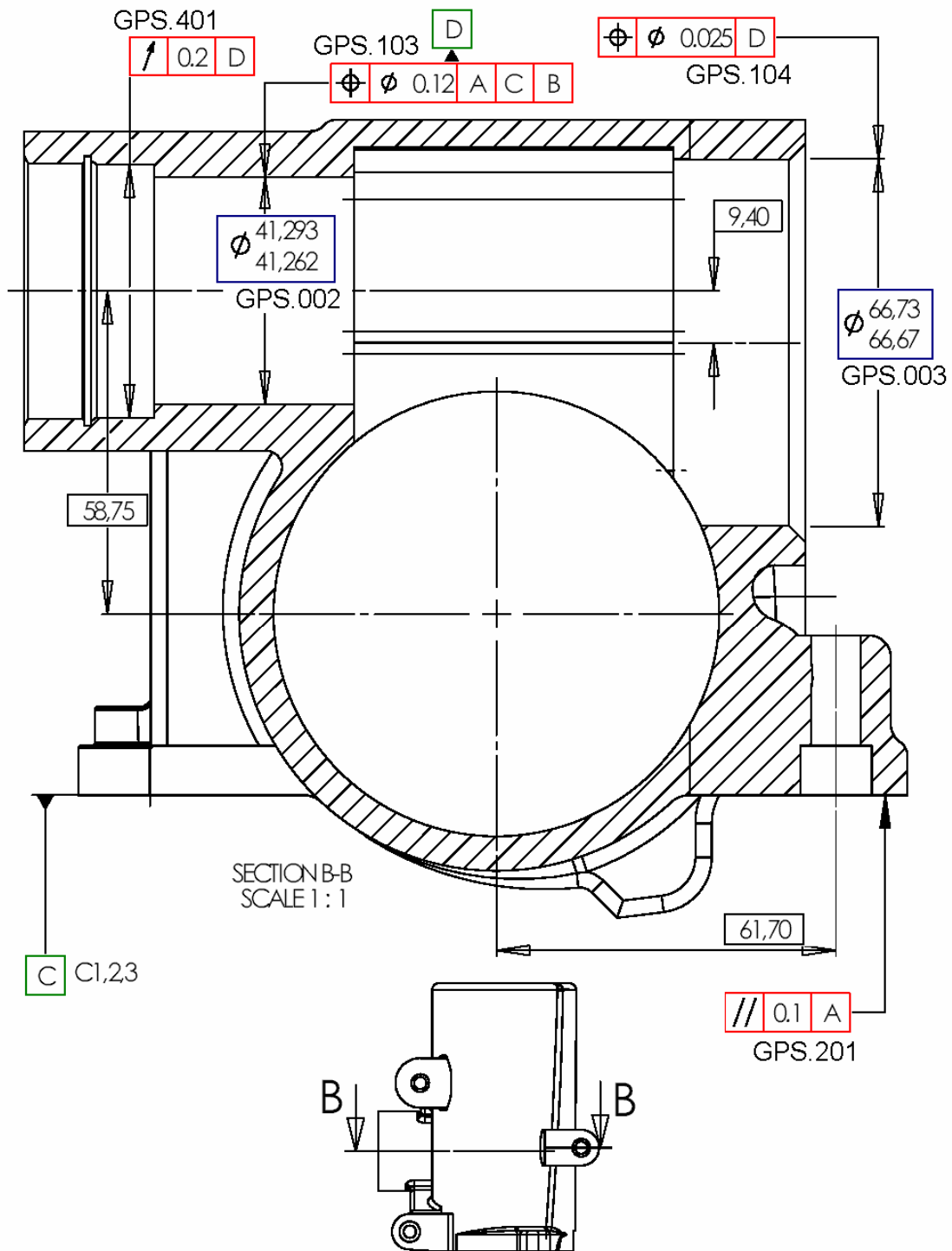


Figura A1.2 – Desenho simplificado da peça padrão, vista 2

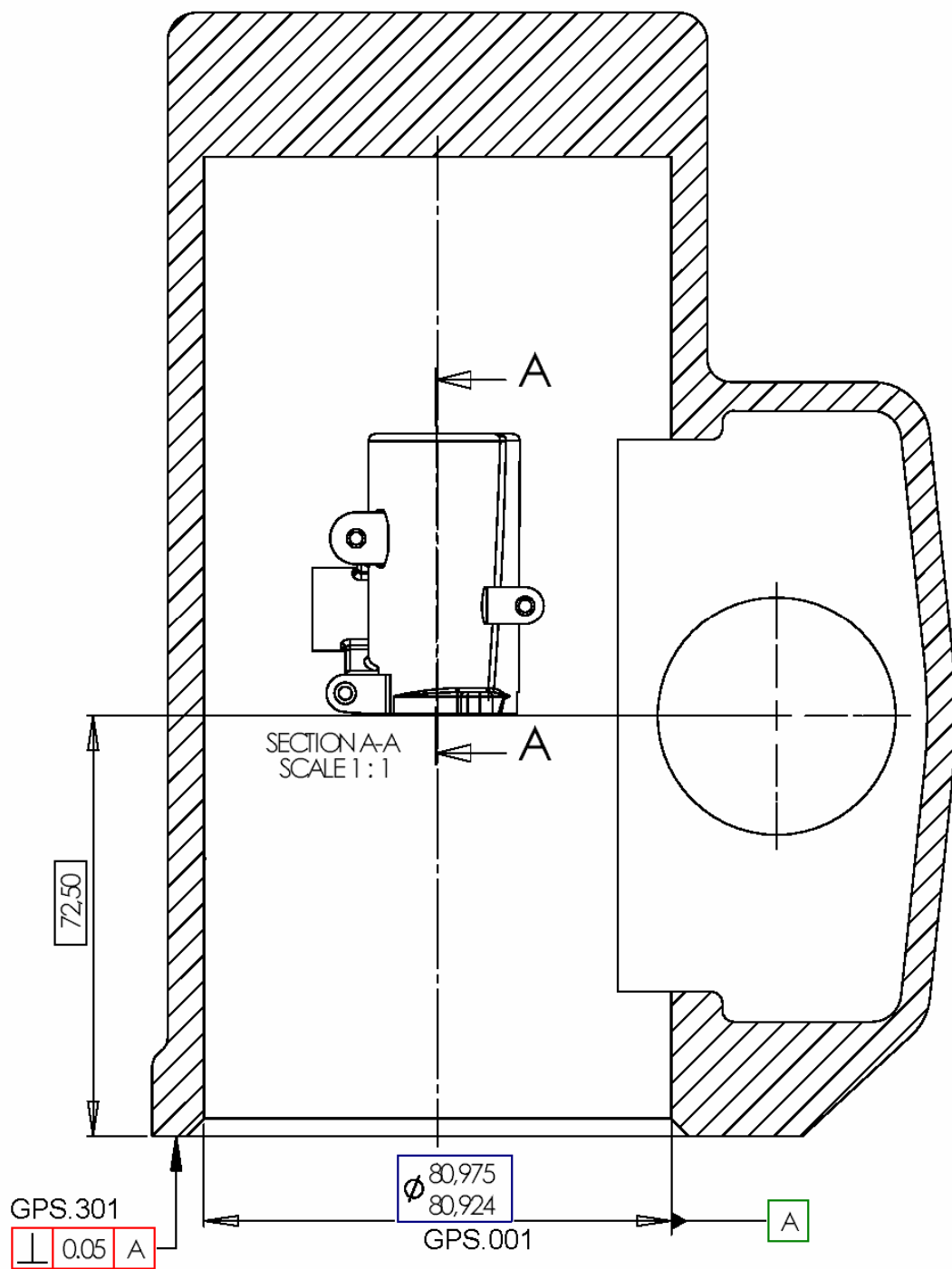


Figura A1.3 – Desenho simplificado da peça padrão, vista 3

ANEXO II – Estratégia de Medição e Valores Calibrados da Peça Padrão

Código	Breve Descrição da Estratégia de Medição	Valor de Referência
ref.A	<i>Eixo associado pelo método dos mínimos quadrados, obtido a partir do centro de três seções circulares associadas pelo método dos mínimos quadrados, com cinco pontos cada, sendo estes uniformemente distribuídos sobre toda a circunferência para duas das seções, e sobre um arco de aproximadamente 240° para a terceira.</i>	-
ref.B	<i>Plano associado pelo método dos mínimos quadrados, obtido a partir de dez pontos uniformemente distribuídos sobre uma circunferência.</i>	-
ref.C	<i>Plano integral associado pelo método dos mínimos quadrados, obtido a partir de três pontos medidos em cada um dos três planos C1, C2 e C3.</i>	-
ref.D	<i>Eixo associado pelo método dos mínimos quadrados, obtido a partir do centro de três seções circulares associadas pelo método dos mínimos quadrados, com cinco pontos uniformemente distribuídos em cada seção.</i>	-
ref.E	<i>Eixo associado pelo método dos mínimos quadrados, obtido a partir do centro de três seções circulares associadas pelo método dos mínimos quadrados, com cinco pontos uniformemente distribuídos em cada seção.</i>	-
gps.001	<i>Diâmetro do cilindro associado pelo método dos mínimos quadrados, obtido a partir da medição de três seções circulares com cinco pontos cada, sendo estes uniformemente distribuídos sobre toda a circunferência para duas das seções, e sobre um arco de aproximadamente 240° para a terceira.</i>	80,9440 ± 0,0012
gps.002	<i>Diâmetro do cilindro associado pelo método dos mínimos quadrados, obtido a partir de cinco pontos uniformemente distribuídos em cada uma das três seções circulares.</i>	41,2783 ± 0,0011
gps.003	<i>Diâmetro do cilindro associado pelo método dos mínimos quadrados, obtido a partir de cinco pontos uniformemente distribuídos em cada uma das três seções circulares.</i>	66,7187 ± 0,0010
gps.101	<i>Posição do eixo extraído, obtido a partir do centro de três seções circulares associadas pelo método dos mínimos quadrados, com cinco pontos uniformemente distribuídos em cada seção, em relação ao sistema de referência (rotação espacial pela ref.C, rotação plana e translação pela ref.B, translação pela ref.A).</i>	0,0589 ± 0,0014
gps.102	<i>Posição do eixo extraído, obtido a partir do centro de três seções circulares associadas pelo método dos mínimos quadrados, com cinco pontos uniformemente distribuídos em cada seção, em relação ao sistema de referência (rotação espacial pela ref.C, rotação plana pela ref.B, translação em duas direções pela ref.E).</i>	0,3121 ± 0,0030
gps.103	<i>Posição do eixo extraído, obtido a partir do centro de três seções circulares associadas pelo método dos mínimos quadrados, com cinco pontos uniformemente distribuídos em cada seção, em relação ao sistema de referência (rotação espacial e translação pela ref.A, rotação plana pela ref.C, translação pela ref.B).</i>	0,1226 ± 0,0023
gps.104	<i>Posição do eixo extraído, obtido a partir do centro de três seções circulares associadas pelo método dos mínimos quadrados, com cinco pontos uniformemente distribuídos em cada seção, em relação ao sistema de referência (rotação espacial e translação pela ref.D, rotação plana não definida).</i>	0,0222 ± 0,0043
gps.201	<i>Paralelismo do plano associado pelo método dos mínimos quadrados, obtido a partir de três pontos medidos em cada um dos três planos C1, C2 e C3, em relação ao sistema de referência (nivelamento espacial pela ref.A), com diâmetro de avaliação de 100 mm.</i>	0,0442 ± 0,0018
gps.301	<i>Perpendicularidade do plano associado pelo método dos mínimos quadrados, obtido a partir de dez pontos uniformemente distribuídos sobre uma circunferência em relação ao sistema de referência (nivelamento espacial pela ref.A), com diâmetro de avaliação de 100 mm.</i>	0,0054 ± 0,0011
gps.401	<i>Batimento circular na direção radial de um círculo extraído, obtido a partir de uma seção circular com 25 pontos uniformemente distribuídos, em relação à ref.D.</i>	0,0252 ± 0,0020

Tabela A2.1 – Descrição das características GPS selecionadas para a intercomparação (valores de referência em milímetros)

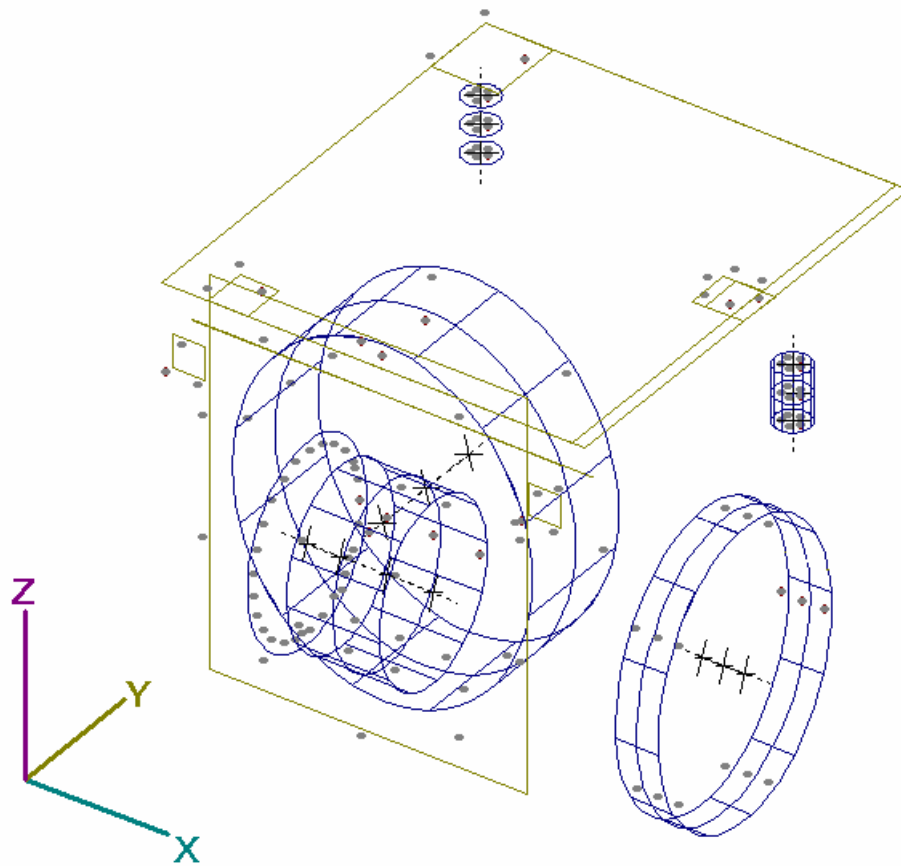


Figura A2.1 – Características associadas calculadas a partir das estratégias de medição adotadas