

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**DESENVOLVIMENTO DE ESTRATÉGIAS
PARA PROMOVER O USO DA INCERTEZA
DE MEDIÇÃO NO CONTEXTO INDUSTRIAL
DA METROLOGIA POR COORDENADAS**

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA À

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE

DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

CRHISTIAN RAFFAELO BALDO

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**DESENVOLVIMENTO DE ESTRATÉGIAS PARA PROMOVER
O USO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO NO CONTEXTO
INDUSTRIAL DA METROLOGIA POR COORDENADAS**

CRHISTIAN RAFFAELO BALDO

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

DOUTOR EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA

SENDO APROVADA EM SUA FORMA FINAL

CARLOS ALBERTO SCHNEIDER, DR.-ING (ORIENTADOR)

GUSTAVO DANIEL DONATELLI, DR.-ING (CO-ORIENTADOR)

EDUARDO ALBERTO FANCELLO, D. SC (COORDENADOR)

BANCA EXAMINADORA

OLÍVIO NOVASKI, DR. ENG. (RELATOR)

ÁLVARO JOSÉ ABACKERLI, DR. ENG.

ANDRÉ ROBERTO DE SOUSA, DR. ENG.

ROLF BERTRAND SCHROETER, DR. ENG.

AGRADECIMENTOS (ACKNOWLEDGMENT)

I would like to express my sincere gratitude to my thesis supervisors, Carlos Alberto Schneider and Gustavo Daniel Donatelli (my second father), for their friendship, continuous encouragement, and contributions to this work.

I am very grateful to my colleagues at the PTB, Heinrich Schwenke, Mathias Franke, Christian Keck, Mathias Franke, Franz Wäldele, for all the support they gave me during my seven-month stay in Germany working in the VCMM II project.

I would like to thank Kostadin Doytchinov for all his assistance in personal and professional issues since we first met in 2004 during a two-month stay at the National Research Council Canada (NRCC).

I would also like to thank two persons that helped me in different ways for the completion of this work (they know what I am talking about): Alexandre Lucas and Francisco Augusto Arenhart.

Not to forget the person I admire a lot, André Roberto de Sousa, who guide me years ago to the metrology world and somehow gave me the opportunity to meet my love, Cristiana Zanatta Viana, again.

Finally, I would like to express my deep appreciation to my mother, sister and father. I just can say that I love them.

RESUMO

A Melhoria Contínua constitui um pré-requisito para a sobrevivência não somente na natureza, mas também na indústria. Para que algo possa ser melhorado, porém, é necessário primeiro conhecer o fenômeno em particular. Conhecimento, por sua vez, resulta do uso adequado da informação, e a medição representa o processo através da qual informação é potencialmente gerada. A Metrologia, portanto, possui impacto direto no sucesso de uma organização. Para formar o conhecimento, entretanto, é importante que a informação e, por conseguinte, a medição, tenha valor intrínseco, e o conceito de incerteza de medição pode ser utilizado para valorar essa condição. No âmbito industrial, por seu turno, apesar da importância destacada da medição por coordenadas, as técnicas existentes para avaliar a incerteza de medição não têm sido suficientes para promover o uso do conceito de incerteza.

Pode-se atribuir parte da constatação acima a uma forma limitada de aplicação do conceito de incerteza, incompatível com o quadro em que a metrologia está hoje inserida. Um modelo de integração da incerteza aos diferentes estágios do processo de realização do produto e da medição é proposto neste trabalho para preencher as lacunas testemunhadas pela metrologia por coordenadas industrial, o qual se baseia no uso combinado e racional de diferentes técnicas de avaliação da incerteza, tendo como parâmetro de escolha o nível de exatidão requerido à incerteza. No contexto visionado, os métodos baseados na lei da propagação da incerteza e no uso de peças calibradas são os que melhor se ajustam às necessidades da metrologia industrial. Contudo, a efetividade do modelo proposto vincula-se diretamente à concepção de meios que permitam ao usuário superar as dificuldades impostas pelos métodos.

Assim, este trabalho não apenas formaliza o modelo de integração da incerteza, mas também fornece instruções para a constituição de balanços de incerteza para mensurandos de diferentes tipos, sob variados níveis de conhecimento, e estratégias para contornar limitações inerentes aos métodos experimentais. Demonstra-se, dentro de um domínio de aplicação definido, porém extensível, que os métodos de avaliação convencionados no GUM clássico podem ser convenientemente empregados em um contexto diferenciado de aplicação da incerteza nas medições por coordenadas de produção, de valor ímpar para o metrologista industrial.

ABSTRACT

Continual Improvement is the prerequisite for survival, not only in nature but also in industry. To be improved, however, the phenomenon of concern first must be known. Knowledge results from the appropriate use of information, which is obtained by a process known as measurement. Metrology, the science of measurement, therefore, plays an important role in the success of an organization. In order to build knowledge, information, and thus measurement, has to have added value, and the concept of measurement uncertainty may be used to quantify that property. On the other hand, coordinate metrology has been proven to be priceless to industries, and despite the existence of principles to evaluate uncertainties, e.g., sensitivity analysis, experimental method, and computer simulation; measurement uncertainty has been rarely evaluated and stated by industrial coordinate metrologists.

Part of the last perception may be attributed to a restricted way of using the concept, which is not compatible with the increasing focus on (and importance of) metrology. To cope with the situation, a concept to integrate the measurement uncertainty with the distinct phases of the process of product and measurement realization is introduced in this work. The concept is based on the rational use of different methods of evaluating the measurement uncertainty, chosen in accordance with the required accuracy to the uncertainty estimation. The methods based on the law of propagation of uncertainty and on the use of calibrated parts are justifiably chosen in this work after pondering some critical points to industrial metrologists. To effectively explore the proposed concept, limitations inherent to both methods need to be (and are) treated.

Thus, this work does not only introduce strategies to use the concept of uncertainty in an effective way but also, and even more relevant, control chart techniques to identify inconsistencies in experimentally-estimated uncertainties, and comprehensive (step-by-step) instructions to draw up uncertainty budgets for several types of GPS characteristics, considering different scenarios/levels of knowledge. Uncertainties provided by the budgets show good agreement with those provided by reference (experimental) methods, and make evident the potential value that can be added by the integration concept proposed in this document to the industrial coordinate metrology.

LISTA DE ACRÔNIMOS

APQP	Planejamento Avançado da Qualidade do Produto <i>Advanced Product Quality Planning</i>
ASME	Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos <i>American Society of Mechanical Engineers</i>
CAD	Desenho Assistido por Computador <i>Computer-Aided Design</i>
CCD	Dispositivo de Carga Acoplada <i>Charge-Coupled Device</i>
CMM	Máquina de Medição por Coordenadas <i>Coordinate Measuring Machine</i>
DKD	Serviço Alemão de Calibração <i>Deutscher Kalibrierdienst</i>
IEC	Comissão Internacional de Eletrotécnica <i>International Electrotechnical Commission</i>
ISO	Organização Internacional de Normalização <i>International Organization for Standardization</i>
FOS	Elemento Geométrico Dimensionável <i>Feature of Size</i>
GD&T	Dimensionamento e Toleranciamento Geométrico <i>Geometric Dimensioning and Tolerancing</i>
GPS	Especificação Geométrica do Produto <i>Geometrical Product Specification</i>
GUM	Guia para a Expressão da Incerteza de Medição <i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement</i>
MPE	Erro Máximo Admissível <i>Maximum Permissible Error</i>
NIST	Instituto Americano de Padrões e Tecnologia <i>National Institute of Standards and Technology</i>
P&D	Pesquisa & Desenvolvimento <i>Research & Development</i>
PTB	Instituto Alemão de Física e Metrologia <i>Physikalisch-Technische Bundesanstalt</i>
R&R	Repetitividade e Reprodutibilidade <i>Repeatability and Reproducibility</i>
TC	Comitê Técnico <i>Technical Committee</i>
TS	Especificação Técnica <i>Technical Specification</i>
VCMM	Máquina de Medição por Coordenadas Virtual <i>Virtual Coordinate Measuring Machine</i>
VDE	Associação de Engenharia Elétrica, Eletrônica e Tecnologia da Informação <i>Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik</i>
VDI	Associação dos Engenheiros Alemães <i>Verein Deutscher Ingenieure</i>
VIM	Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia <i>International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology</i>
WG	Grupo de Trabalho <i>Working Group</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

Introdução	9
1.1 Uma dimensão diferenciada de aplicação da incerteza	10
1.2 Natureza do trabalho de pesquisa	12
1.3 Estrutura do documento	15

CAPÍTULO 2

Contextualização do Trabalho de Pesquisa	17
2.1 Os cenários laboratorial e produtivo de medição	21
2.2 As máquinas de medição por coordenadas nas indústrias	23
2.2.1 Influência do fator ambiente sobre as medições	27
2.2.2 Influência da peça sob investigação	29
2.3 Tarefa específica de medição: impacto na análise da incerteza	31

CAPÍTULO 3

Estado da Arte na Temática “Avaliação da Incerteza em Medições por Coordenadas”	37
3.1 Categoria “análise de sensibilidade”	40
3.1.1 Contribuição de Salsbury: matrizes de relacionamento	41
3.1.2 Contribuição de Hernla: efeitos sistemáticos da CMM	43
3.2 Categoria “método experimental”	45
3.2.1 Avaliação da incerteza de medição usando peças calibradas	45
3.2.2 A calibração das peças de referência	47
3.3 Categoria “simulação computacional”	48
3.3.1 Simulação por restrições: base do software PUNDIT/CMM	48
3.3.2 VCMM: uma solução integrada ao software da CMM	52
3.4 Categoria “parecer de um especialista”	58

CAPÍTULO 4

Detalhamento dos Elementos Constituintes do Modelo de Integração da Incerteza	61
4.1 Forma de atuação do modelo de integração da incerteza	64
4.2 Os balanços de incerteza característicos	67
4.2.1 Domínio preliminar de aplicação	68
4.2.2 Condições e simplificações	69
4.2.3 Os balanços de incerteza característicos sob escrutínio	72
4.2.3.1 Posição de uma linha com respeito a um sistema referencial	72
4.2.3.2 Perpendicularidade de uma linha com respeito a um plano	89

4.2.3.3 Paralelismo de uma linha com respeito a um plano	96
4.2.3.4 Diâmetro de um cilindro (ou de uma seção circular)	97
4.3 A abordagem puramente experimental	97
4.3.1 Inserção de peças não-calibradas ao método experimental	100
4.3.2 Processamento estatístico para mais de uma peça calibrada	102
CAPÍTULO 5	
Resultados da Aplicação dos Elementos Constituintes do Modelo de Integração	111
5.1 Estudos de caso #1: sensibilidade aos efeitos aleatórios	111
5.2 Estudos de caso #2: sensibilidade aos efeitos sistemáticos	114
5.3 O modelo de integração da incerteza no contexto industrial	119
5.3.1 Os balanços de incerteza característicos resultantes	123
5.4 Sobre a premissa adotada: incerteza do método desprezível	128
CAPÍTULO 6	
Discussão e Considerações Finais	131
6.1 Considerações relativas à documentação técnica do produto	131
6.2 Considerações relativas à incerteza do método	133
6.3 Seleção das técnicas no modelo de integração da incerteza	135
6.4 Análise crítica do modelo de integração da incerteza	136
6.5 Considerações finais	138
Referências	141
<i>Apêndice A</i>	
<i>Intercomparação de Máquinas de Medição por Coordenadas de Uso Industrial</i>	153
<i>Apêndice B</i>	
<i>Símbolos Utilizados na Formulação dos Balanços de Incerteza Característicos</i>	163
<i>Apêndice C</i>	
<i>Coefficientes de Sensibilidade para os Parâmetros dos Elementos Geométricos Associados por Mínimos Quadrados</i>	165
<i>Apêndice D</i>	
<i>Transformações Geométricas</i>	171
<i>Anexo A</i>	
<i>Termos e Definições Específicos</i>	175
<i>Anexo B</i>	
<i>Caso VDI/VDE 2617-8: Medição de uma Caixa de Bomba</i>	177

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

No contexto industrial da metrologia, a *tecnologia de medição por coordenadas* merece especial destaque em virtude de características como a flexibilidade para se adequar às mais variadas tarefas de medição e a facilidade de automatização [1]. Vários são os tipos de equipamentos de medição que podem ser enquadrados na tecnologia, os quais permitem que características dimensionais e geométricas as mais diversas sejam medidas com níveis de exatidão, em princípio, compatíveis com as especificações dos produtos ou a variação esperada do processo de fabricação.

Com esses atributos, a tecnologia de medição por coordenadas constitui uma solução bastante convidativa para o meio industrial quando aspectos técnicos e econômicos são ponderados. A qualidade efetiva das medições, por seu turno, está condicionada ao uso apropriado da tecnologia pelo usuário, e vai além do ato de adquirir e instalar a máquina de medição por coordenadas. Outros fatores que definem o cenário de medição, e.g., o método empregado pelo operador e as condições ambientais, afetam a confiabilidade do resultado de uma medição.

O conceito de *incerteza de medição* pode ser empregado para avaliar a qualidade (e a confiabilidade) de uma medição [2]. Por sua vez, avaliar a incerteza em medições por coordenadas não constitui uma tarefa trivial, em virtude do intrincado sistema de causas do erro de medição. Constata-se, com isso, a inexistência de métodos para estimar a incerteza de medição que estejam ao efetivo alcance do usuário comum da tecnologia de medição por coordenadas.

1.1 Uma dimensão diferenciada de aplicação da incerteza

Parte do que foi argumentado no último parágrafo pode ser associado à percepção de que as medições destinam-se a fins e demandam requisitos específicos, de acordo com o processo relacionado ao ciclo de realização do produto e às próprias peculiaridades da aplicação. A fim de exemplificar essa perspectiva, pode-se recorrer ao conhecido modelo do Planejamento Avançado da Qualidade do Produto (APQP) [3], e fazer distinção entre as chamadas medições de suporte à pesquisa e desenvolvimento e as medições essencialmente voltadas à produção [4], conforme definido abaixo e ilustrado na figura 1.1:

- As medições de suporte à P&D buscam gerar conhecimento sobre o produto ou processo, sendo assim estratégica, e normalmente complexa e demorada. Uma vez que a partir delas são definidas, por exemplo, as especificações do produto e processo, é importante que a capacidade da medição seja conhecida e otimizada, para que o efeito dos erros de medição, que nelas ficam congelados, não influenciem excessivamente a qualidade do produto/processo.
- As medições de produção exigem uma exatidão suficiente apenas para atender os requisitos impostos pelo controle do produto ou processo, sem aumentar os custos de inspeção demasiadamente e desnecessariamente, e precisam ser rápidas o suficiente, para não introduzir gargalos no processo produtivo, e simples, uma vez que são normalmente executadas por operadores metrologicamente menos qualificados.

Visto que a própria medição também resulta de uma sucessão de processos inter-relacionados, pode-se adotar, por analogia ao ciclo de desenvolvimento do produto, a expressão *realização do processo de medição* para referenciá-los, dentro da qual são consideradas as seguintes macroatividades [5-6]:

- a. Planejamento da medição: no caso específico das medições por coordenadas no meio industrial, engloba operações estratégicas que orientam a definição do equipamento de medição e das condições do local de instalação do equipamento, e a preparação do plano de medição, as quais devem originar uma solução potencialmente capaz de satisfazer determinados requisitos metrológicos e operacionais.

- b. Execução da medição: envolve a medição propriamente dita de características de protótipos, pilotos e peças de produção. Pode exigir distintas formas de avaliação da capacidade e induzir, inclusive, a melhoria do processo de medição a fim de corrigir, por exemplo, inconsistências não detectadas durante as fases iniciais da realização do processo de medição.

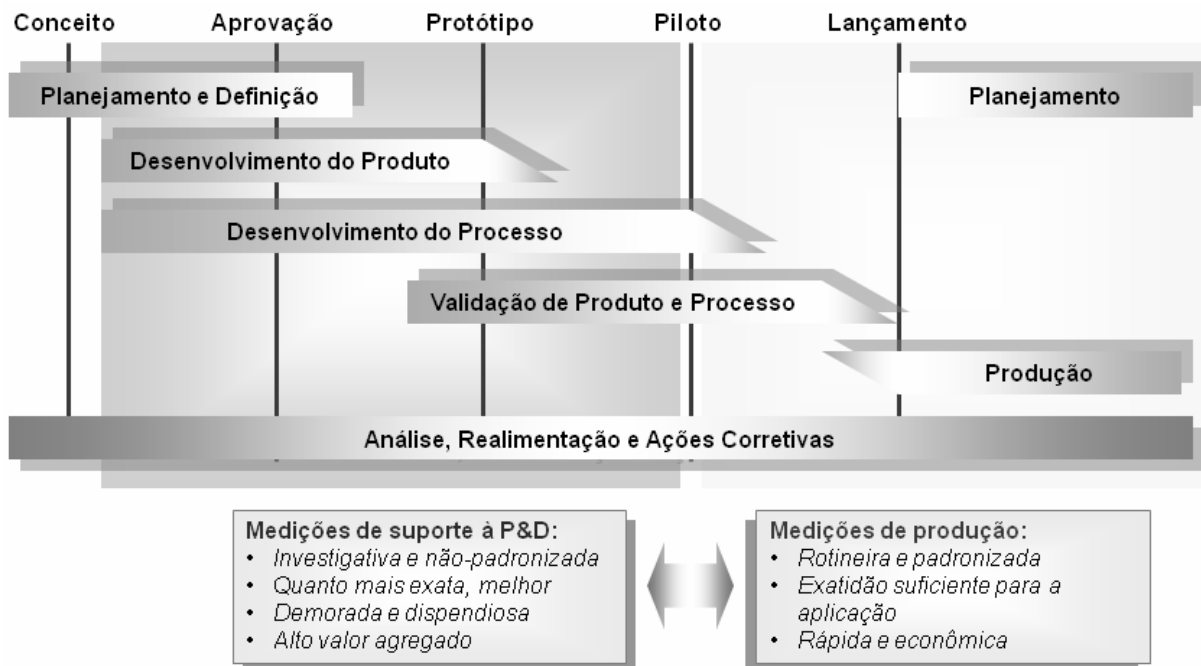


Figura 1.1: Diferentes finalidades e requisitos da medição (por coordenadas) no contexto do desenvolvimento integrado do produto/processo, conforme o Planejamento Avançado da Qualidade do Produto.

Dos fatos assinalados, pode-se inferir que o conceito de incerteza de medição insere-se num contexto muito mais abrangente. Decisões de cunho técnico, metroológico e econômico, nos mais distintos níveis, podem ser mais bem direcionadas e traçadas sempre que informações que caracterizem a qualidade da medição de produção estejam disponíveis ao usuário. Por exemplo, pode-se, com base em uma estimativa da incerteza pré-medição¹, sistematizar questões como a definição das características metroológicas da máquina de medição por coordenadas, dos requisitos do ambiente e da estratégia de medição adequada para cada caso específico, como inclusive apontado, para situações mais simples, por Nielsen [7].

¹ GUM 1.3 [2]: “Este Guia é também aplicável à avaliação e expressão da incerteza associada ao projeto conceitual e à análise teórica de experimentos, métodos de medição, componentes e sistemas complexos. Uma vez que o resultado de uma medição e sua incerteza podem ser conceituais e baseados inteiramente em dados hipotéticos, o termo ‘resultado de uma medição’, tal como usado neste Guia, deve ser interpretado neste sentido mais amplo.”

Não há registros na literatura, no entanto, de uma forma definida de operação que proporcione ao metrologista industrial tirar o máximo proveito do conceito de incerteza nos moldes delineados nos parágrafos anteriores. Têm-se, sim, contribuições isoladas pouco resolvidas por parte de alguns autores e soluções baseadas em experimentos reais ou virtuais, que não atendem satisfatoriamente os usuários da medição por coordenadas ou que não se moldam ao quadro em que a metrologia está hoje inserida. Por se considerar uma iniciativa válida o preenchimento das lacunas testemunhadas pelos usuários de máquinas de medição por coordenadas, o restante deste documento destina-se à proposição e ao delineamento de um *modelo de integração da incerteza* aos diferentes estágios do processo de realização do produto e da medição.

1.2 Natureza do trabalho de pesquisa

Diante de um panorama tão difuso como o até aqui caracterizado para as medições por coordenadas, uma aplicação racional do conceito de incerteza de medição exige necessariamente que elementos como a criticidade da aplicação, a singularidade da medição e a finalidade da avaliação sejam ponderados: esta se relaciona ao estágio no ciclo de realização do processo de medição; essa, à fase no ciclo de realização do produto; aquela, a fatores como o valor agregado do produto ou característica (e.g., custo do produto) e a capacidade relativa do processo de medição.

O raciocínio acima, que é inclusive expressado pela ISO 10012 [8], nos seguintes termos: "... o esforço devotado à determinação das incertezas deve ser comensurável com a importância dos resultados das medições para a qualidade do produto", e que pode ser derivado do próprio Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (GUM) [2]: "... está implícita a suposição de que uma medição pode ser modelada matematicamente até o grau imposto pela exatidão requerida na medição"; é exibido na figura 1.2. Nela se sugere que o grau de exatidão de uma determinada estimativa da incerteza de medição, ou, no jargão da ISO/TS 14253-2 [9], o quanto a incerteza avaliada pode se afastar de uma hipotética *incerteza verdadeira*, seja determinado com base nas características dos três elementos mencionados anteriormente.

A técnica mais apropriada para uma aplicação particular, portanto, poderia basear-se numa modelagem matemática (em determinada instância) genérica da medição, ou

em uma modelagem suficientemente específica, ou até numa abordagem puramente experimental e, por natureza, específica. Diante desse contexto, e buscando ainda convergir, e interagir, com as recentes iniciativas do ISO/TC-213/WG-10² e considerando algumas propriedades importantes para uma solução voltada ao meio industrial, definidas ao fim do próximo capítulo; pode-se depreender que métodos baseados na lei de propagação da incerteza (doravante designado *balanços de incerteza característicos*) e no uso de peças calibradas são potencialmente adequados aos ideais do modelo proposto.

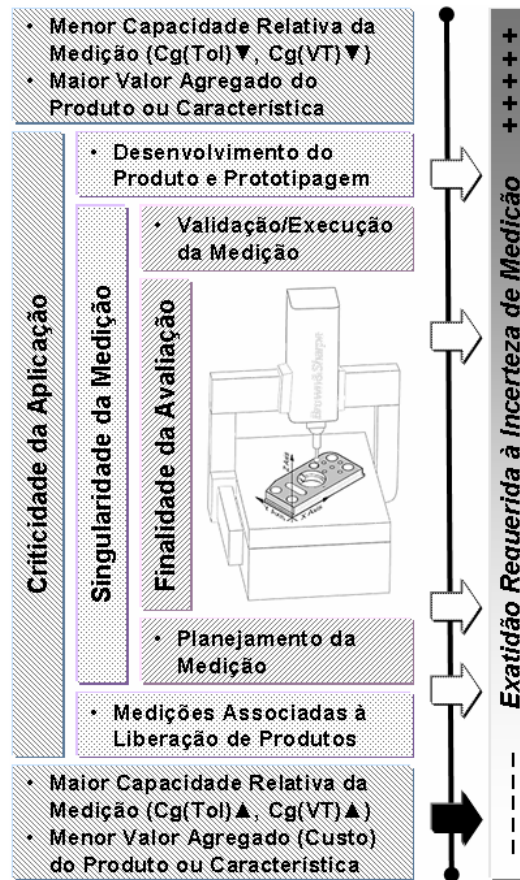


Figura 1.2: Exatidão requerida à incerteza de medição em função dos fatores finalidade da avaliação, criticidade da aplicação e singularidade da medição (as particularidades da tarefa de medição determinam a posição da seta sobre a guia e, por conseguinte, o grau de exatidão para a incerteza de medição).

Dada a multidimensionalidade do problema pode-se inferir ser muito pouco provável que uma técnica individual, daquelas a serem apresentadas e discutidas no capítulo seguinte, atenda todos os requisitos por ele impostos. Por isso, decidiu-se por dedicar esforços à concepção de um *modelo de integração da incerteza* aos processos

² Grupo de Trabalho 10 do Comitê Técnico 213 da ISO, responsável pela preparação dos documentos da série ISO/TS 15530 [10-13].

necessários para a realização do produto e da medição por coordenadas. O modelo tem em sua essência, como sintetizado na figura 1.3, não o uso de uma única técnica de avaliação da incerteza de medição, mas a combinação de diferentes técnicas, definidas de acordo com a exatidão requerida à estimativa da incerteza.

Como consequência natural de qualquer aplicação do modelo, poder-se-ia visionar a sistematização de métodos e práticas de uso da metrologia por coordenadas. Isso porque, a partir de uma caracterização suficientemente adequada da medição, poderiam ser mais bem orientadas ações relacionadas ao processo de medição e às atividades que dele dependem. Desse modo, poder-se-ia, por exemplo, aperfeiçoar o laço de realimentação dos processos produtivos e o provimento de informações para a base de dados da qualidade, além de garantir o atendimento efetivo de requisitos normativos, ponto este também a ser destacado neste documento.

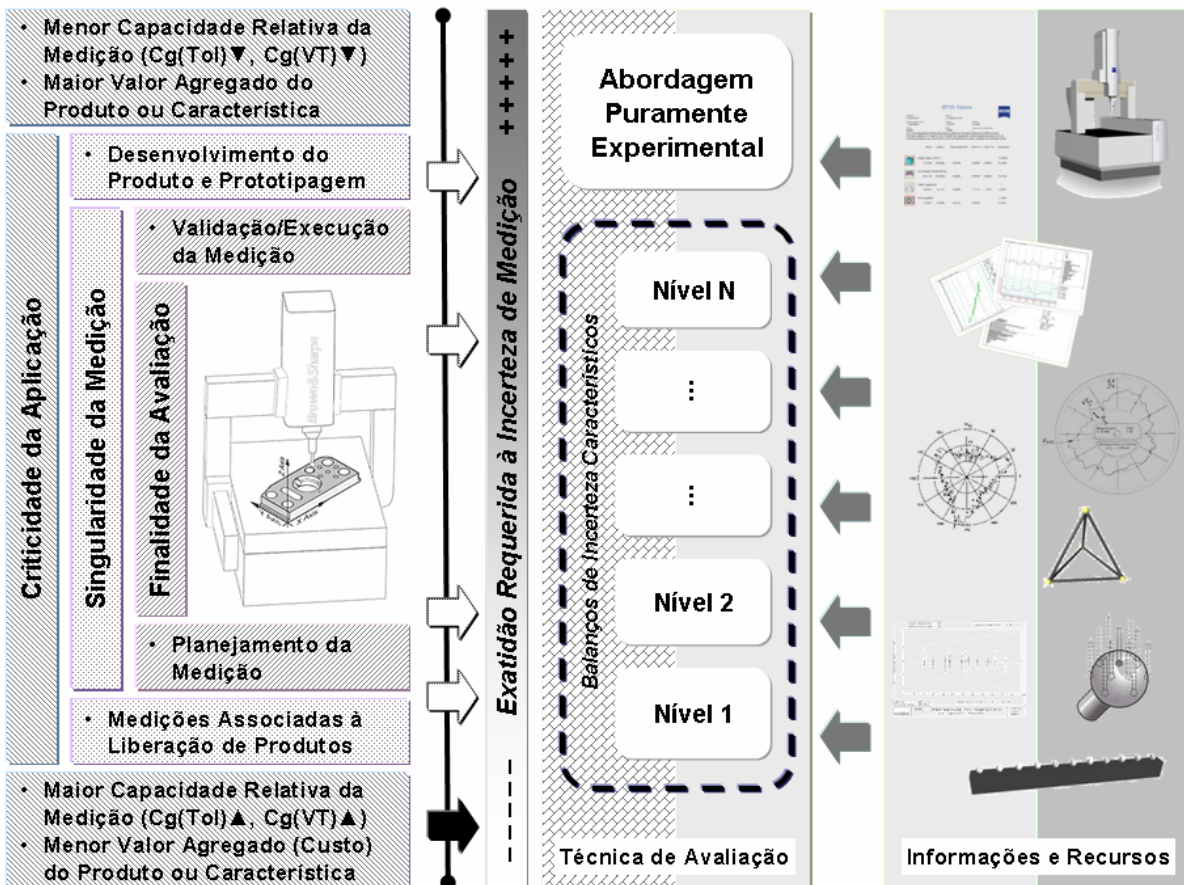


Figura 1.3: Forma de atuação do modelo de integração da incerteza: o nível de exatidão requerido à incerteza dita a seleção da técnica de avaliação e as informações e recursos necessários.

Por outro lado, apesar de serem sólidos os argumentos que sustentam a concepção do *modelo de integração da incerteza*, não se pode conceder o mesmo parecer à alternativa pelos *balanços de incerteza característicos* e pelo uso de peças calibradas,

como será discorrido ao longo do terceiro capítulo. Assim, este trabalho de pesquisa propõe:

Demonstrar que os métodos de avaliação da incerteza convencionados no GUM clássico, i.e., análise estatística de uma série de observações e lei de propagação da incerteza, podem ser utilizados dentro de um contexto diferenciado de aplicação da incerteza nas medições por coordenadas de produção.

Não se pretende, contudo, estabelecer qualquer forma de contraposição às outras técnicas de avaliação da incerteza não abrangidas pela proposição acima. De fato, acredita-se que outras técnicas possam também ser empregadas dentro do *modelo de integração da incerteza*, embora não seja possível precisar, pelo menos sem uma análise minuciosa, os possíveis ganhos ou perdas para cada situação particular.

1.3 Estrutura do documento

Tendo sido introduzida a temática de interesse e apresentada a linha de trabalho ao longo do presente capítulo, o restante do documento expõe todos os pontos relevantes para defender e ponderar a proposição definida na seção anterior. No capítulo 2 contextualiza-se este trabalho de pesquisa; no capítulo 3 faz-se uma exposição analítica do estado da arte no tópico *avaliação da incerteza em medições por coordenadas*. Das inferências decorrentes, reforça-se a relevância da linha de atuação traçada e evidenciam-se os problemas que precisam ser contornados.

O capítulo 4 traz, por uma parte, a metodologia proposta para conceber os *balanços de incerteza característicos* e atuar em algumas das limitações atinentes. O domínio de aplicação e as condições e simplificações adotadas são apresentados, e a metodologia explicada através da solução de exemplos práticos industriais. Por outra parte, definem-se meios para atenuar os problemas associados aos experimentos com peças calibradas. Casos reais ilustram a relevância e a efetividade dos procedimentos sugeridos.

Embora resultados de experimentos reais tenham sido incluídos no delineamento dos elementos que constituem o *modelo de integração da incerteza*, para dar maior

sustentação ao conceito proposto, outros exemplos de aplicação são apresentados no capítulo 5. Com base nos resultados dos exemplos, pôde-se avaliar a credibilidade das estimativas produzidas pelos *balanços de incerteza característicos* e também o valor agregado à metrologia industrial.

Por fim, no capítulo 6, fazem-se considerações adicionais a respeito dos importantes pontos levantados ao longo do texto e conjeturam-se oportunidades futuras de trabalhos. O texto ainda reúne quatro apêndices e dois anexos, todos devidamente referenciados ao longo do texto principal.

CAPÍTULO 2

CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO DE PESQUISA

Um dos mais populares dizeres de Henry Ford (1863-1947), fundador da Ford Motor Company e criador da linha de montagem móvel, datado da década de 1920:

“There is one rule for the industrialist and that is: make the best quality of goods possible at the lowest cost possible, paying the highest wages possible.”

já destacava a importância da qualidade para o sucesso de uma organização. Por vários anos a inspeção seletiva do produto após a produção, seguida da segregação ou eventual retrabalho dos itens defeituosos, fora o único expediente empregado para controlar a qualidade dos produtos (denominado controle da qualidade clássico).

Em maio de 1924, por meio de um memorando de aproximadamente uma página, Walter Shewhart, então na Western Electric Company, sentou as bases do controle estatístico da qualidade [14]. Desde então, o controle dos processos de fabricação tem desempenhado um papel importante nas indústrias, p.ex., através da aplicação de métodos estatísticos ou de sistemas de controle em malha fechada; principalmente porque ele mostra um caráter muito mais proativo, i.e., busca-se evitar que unidades desconformes sejam produzidas, e não meramente reativo, como observado no controle da qualidade clássico.

Atualmente se reconhece que os desvios da qualidade surgem ao longo de todos os processos necessários para a realização do produto, e não somente durante a sua fabricação. Pfeifer [15] salienta que a maior parte dos defeitos origina-se ainda nas etapas preliminares da realização do produto, muito embora a detecção deles se dê

normalmente nas etapas posteriores, i.e., durante a fabricação, inspeção ou mesmo no uso continuado do produto, resultando em prejuízos significativos por retrabalho, refugo ou mesmo *recall* de produtos, como demonstrado na figura 2.1.

Portanto, pôr em prática abordagens como *do it right the first time* e *zero defects*, promovidas por Crosby [16] e que hoje orientam as organizações que almejam ou mantêm o que se convencionou chamar de *qualidade classe mundial*, requer esforços sistematizados das pessoas em todas as etapas de planejamento, desenvolvimento e fabricação de um produto. As ferramentas da garantia da qualidade são especialmente importantes para o êxito dessas atividades, uma vez que a partir delas podem ser encaminhadas decisões e iniciativas de alto impacto no ciclo de realização do produto.

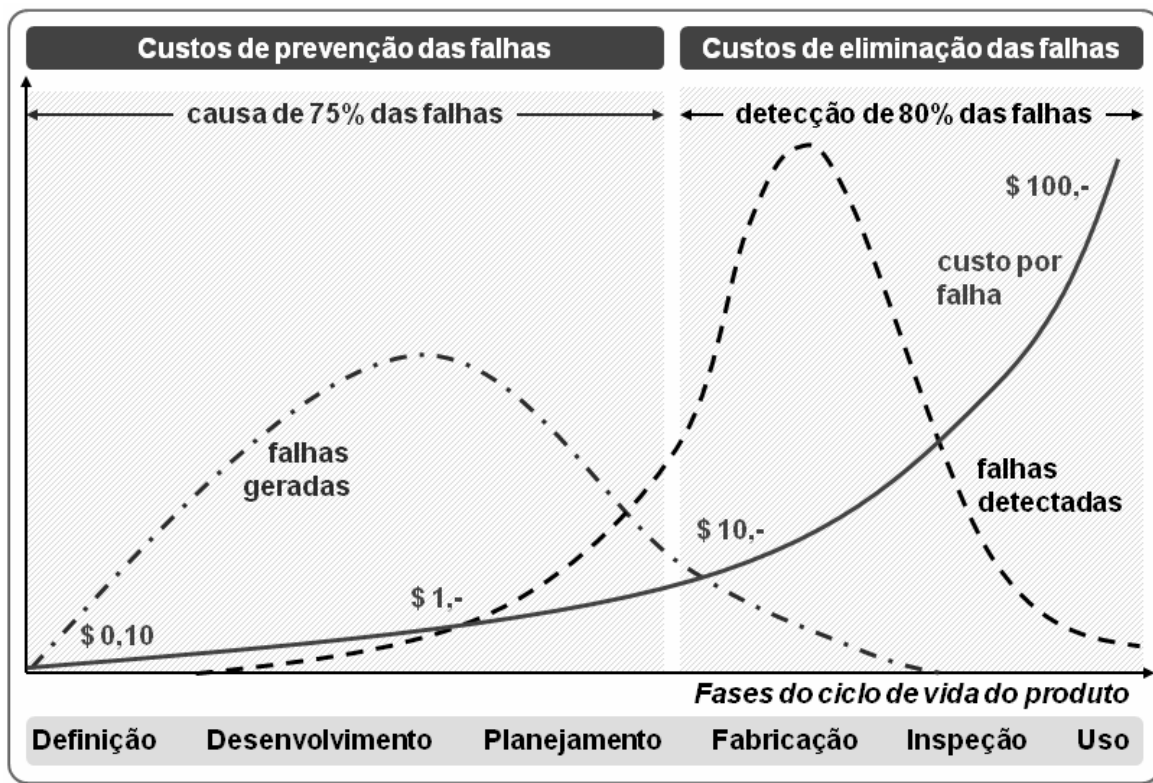


Figura 2.1: Curvas de origem (linha traço-ponto) e detecção (linha tracejada) dos defeitos de um produto e do custo associado à eliminação dos defeitos (linha sólida), as quais indicam a relevância de uma garantia preventiva da qualidade.

Por sua vez, as ferramentas da garantia da qualidade dependem de dados que expressem, de forma quantitativa ou qualitativa (atributiva), características específicas de um produto ou parâmetros funcionais de um processo. Os dados são essencialmente obtidos por medições, que envolvem basicamente a comparação de grandezas ou a contagem de eventos. A metrologia industrial ocupa-se justamente da adequação dessas medições a um fim específico, tendo sido as tecnologias e os méto-

dos de medição que a constituem objetos dos mais significativos avanços nos últimos anos, não só para acompanhar o desenvolvimento dos produtos e processos, mas também para possibilitá-lo.

Peters [17] apresenta em seu artigo, datado de 1977, como reflexo das transformações acima apontadas, uma subdivisão da metrologia industrial:

- Metrologia passiva: engloba aquelas medições que têm por fim apenas verificar a conformidade do produto final contra limites de especificação (inspeção final).
- Metrologia ativa: engloba aquelas medições que são feitas nas proximidades ou na própria linha de produção para avaliar e controlar um processo produtivo.
- Metrologia dinâmica: abrange aquelas medições continuamente adquiridas por sensores que formam um sistema de controle em malha fechada, formando o que Peters denominou *sistema integrado de fabricação*.

Peters ainda esboçou o futuro da metrologia (industrial), chamando a atenção para a interferência da metrologia nas distintas fases do *sistema integrado de fabricação*, ou seja, o papel da metrologia antes, durante e após a fabricação. Peters pode ser assim considerado o pioneiro do conceito de *productive metrology* [18], apresentado recentemente à comunidade metrológica, o qual essencialmente expressa que o valor agregado pela metrologia depende do uso eficiente das medições. Para tanto, não basta que somente números, naturais portadores de algum tipo de informação sobre uma grandeza específica, sejam coletados, mas que conhecimento e *know-how* sejam gerados a partir daquela informação (*know-how* é interpretado pelos autores do conceito como um nível mais elevado na pirâmide do conhecimento voltado à ação).

No contexto atual da metrologia industrial, de atuação não mais passiva, porém ativa (ou dinâmica), e de caráter não mais meramente informativo, porém cognitivo, pode-se atribuir à tecnologia de medição por coordenadas, ao menos no domínio das medições dimensionais, boa parte dos méritos por essa evolução. A flexibilidade para se adequar às mais variadas tarefas de medição e a facilidade de automatização e informatização são apenas duas das características que explicam esse paralelismo.

As máquinas de medição por coordenadas são os equipamentos que melhor representam a tecnologia de medição por coordenadas. Entretanto, hoje a tecnologia a-

brange muito mais que as máquinas convencionais, também conhecidas como cartesianas, com sensores de medição por contato. Outros equipamentos de medição com capacidade de medir objetos no espaço tridimensional, também formam a tecnologia de medição por coordenadas. Inserem-se, nessa definição, os braços articulados de medição, que não têm guias de movimentação mutuamente perpendiculares, e sistemas baseados em princípios interferométricos e fotogramétricos.

A tecnologia, dependendo dos recursos disponíveis/instalados no equipamento de medição, possibilita avaliar características dimensionais, geométricas e desvios de forma de objetos os mais diversos possíveis, muitas delas difíceis ou até mesmo impossíveis de serem analisadas sem os recursos de medição atuais. Além disso, normalmente o tempo demandado é consideravelmente inferior àquele que se esperaria caso fossem empregadas técnicas e instrumentos convencionais de medição. Tudo isso com níveis de exatidão, em princípio, compatíveis com as especificações dos produtos modernos ou a variação esperada do processo produtivo, particularizando uma solução bastante atraente no concernente aos aspectos técnicos e econômicos. Tanto que seu campo de aplicação tem englobado, para mencionar alguns exemplos, indústrias do ramo aeroespacial, automotivo, eletrônico e plástico [19].

No ambiente produtivo, por exemplo, as informações provenientes das medições por coordenadas podem ser empregadas para três propósitos distintos, embora não necessariamente independentes [20]:

- Avaliação da conformidade dos produtos: representa a operação de comparar o valor medido de uma determinada característica com a tolerância especificada, simulando um dispositivo do tipo passa/não-passa.
- Avaliação da qualidade dos produtos: significa não apenas classificar o produto de forma binária, i.e., como conforme ou desconforme, mas também assinalar um valor numérico a característica sendo inspecionada e utilizá-lo, por exemplo, para algum tipo de análise estatística.
- Avaliação da qualidade dos processos produtivos: representa um estágio mais avançado de utilização da tecnologia, que não fica limitada apenas à provisão de informações, até certo ponto, óbvias para uma dada inspeção, mas inclui também outras análises fundamentais para avaliar a qualidade do processo produtivo, como, por exemplo, um gráfico dos desvios (resíduos) suportando o

valor numérico obtido para uma medição de retitude ou circularidade.

Tendo-se tornado potencialmente imprescindível para as empresas que fornecem produtos com requisitos dimensionais e geométricos, os equipamentos de medição por coordenadas têm sido alvo dos mais significativos avanços em hardware e software. O custo de aquisição e a sofisticação tecnológica, porém, têm gerado algumas impressões equivocadas sobre a tecnologia, tais como [1]: “os erros de medição são sempre pequenos”, “a aquisição da máquina é o único investimento necessário”, “a influência do operador na medição é mínima” e “os erros de medição provêm basicamente do equipamento”.

Na verdade, a efetividade dos desenvolvimentos e a qualidade (confiabilidade) das medições ficam condicionadas às atitudes e decisões dos próprios usuários da tecnologia, as quais vão além do ato de adquirir uma máquina de medição por coordenadas. No entanto, antes de detalhar esses pontos, é fundamental fazer clara separação entre as medições de laboratório e as medições de produção, pois as condições e definições a elas inerentes requerem, de um modo geral, julgamentos bastante particulares.

2.1 Os cenários laboratorial e produtivo de medição

Os laboratórios de calibração de artefatos de referência e os centros de pesquisa e desenvolvimento (P&D) são dois dos ambientes que têm continuamente usufruído da tecnologia de medição por coordenadas. Nesses ambientes as máquinas de medição por coordenadas estão geralmente confinadas a medições de artefatos de precisão relativamente simples ou de objetos que apresentam imperfeições geométricas com magnitudes desprezíveis frente, por exemplo, à repetitividade do equipamento. Isso sem contar que não são raros os casos em que o interesse não está na totalidade de uma característica geométrica, mas somente em alguns pontos específicos desta.

O fato de a exatidão da medição despontar como a variável de interesse maior também é um ponto relevante. Não sendo o tempo de medição o elemento de maior importância e não possuindo direta relação com o ambiente produtivo, ao qual normalmente se associam aportes proporcionalmente reduzidos em metrologia, atenção

especial é comumente dada a fatores que circundam o equipamento e a definição e execução da medição propriamente dita. De fato, é muito comum que técnicas de substituição e inversão/rebatimento, esta provém do termo em inglês *reversal techniques*³, sejam usadas em medições de alta exatidão, como a calibração de placas de esferas, esquadros e régua.

Um exemplo bastante interessante de aplicação de ambas as técnicas é descrito por Osawa et al. [22], onde o problema de medição reside na calibração das características dimensionais e geométricas de um artefato cilíndrico de referência, usado em intercomparações de máquinas de medição por coordenadas. O procedimento de calibração desenvolvido baseia-se não apenas na medição do artefato em múltiplas orientações, mas também no uso de padrões de comprimento e diâmetro para corrigir fatores de escala. Com isso, os valores das grandezas de interesse podem ser conhecidos com incertezas submicrométricas, pois todos os efeitos sistemáticos provenientes, p.ex., da geometria da CMM e do próprio apalpador de medição, podem ser reduzidos a níveis diminutos.

Noutra vertente estão as medições realizadas no ambiente industrial, que definitivamente particularizam uma classe de aplicação diferenciada da metrologia por coordenadas. Primeiro, por serem mais severas as condições do ambiente de medição; segundo, por estarem envolvidos mensurandos de maior complexidade; terceiro, por existirem requisitos da produção que precisam ser atendidos, normalmente condicionados ao tempo de medição.

Ao contrário das medições comumente observadas nos laboratórios de referência, nas medições industriais as imperfeições geométricas causadas pelos processos de fabricação normalmente precisam ser investigadas para contrastar as informações com as especificações e, conseqüentemente, para garantir o perfeito funcionamento do componente em seu uso posterior. Os dados do produto medido podem também realimentar um laço de controle do processo de fabricação (p.ex., possibilitando derivar parâmetros de correção) e guiar ações da garantia da qualidade, a fim de evitar que produtos desconformes sejam originados ou mesmo enviados ao cliente [23].

³ Técnicas que se baseiam na medição de um artefato em diferentes orientações, de maneira tal que a soma algébrica dos efeitos sistemáticos do equipamento de medição em um determinado sistema de coordenadas seja idêntica para todos os pontos medidos, possibilitando a compensação deles sempre que as médias dos pontos medidos para distintas orientações sejam usadas para estimar o valor da grandeza de interesse [21].

Não se pode questionar, portanto, que a integração da metrologia por coordenadas ao ambiente de produção constitui uma solução de alto valor agregado. Entretanto, algumas dificuldades, até certo ponto, irrelevantes em aplicações laboratoriais precisam ser apropriadamente gerenciadas, para assegurar que o ciclo de informações não seja corrompido. A seção seguinte dedica-se ao detalhamento dos diversos fatores que precisam ser ponderados quando da utilização da medição por coordenadas no contexto industrial.

2.2 As máquinas de medição por coordenadas nas indústrias

Hoje o mercado oferece máquinas de medição por coordenadas com especificação de erro máximo admissível para medições de comprimentos, conforme a terminologia definida na norma ISO 10360-1 [24], a partir de $MPE_E = \pm \left(0,3 + \frac{L}{1000} \right) \mu\text{m}$, onde L denota o comprimento medido em milímetros⁴. Uma vez que toda e qualquer medição é afetada pelos erros inerentes ao equipamento, entender o que realmente informam, ou deixam de informar, os números especificados pelos fabricantes passa a ser essencial para compreender a dimensão do problema.

Normas como a ISO 10360-2 [26] definem os testes necessários para verificar se determinados erros de uma CMM, após a devida instalação, satisfazem os limites estipulados pelo fabricante. Outros ensaios de similar teor referem-se aos contidos na norma americana ASME B89.4.1 [27] e na diretriz alemã VDI/VDE 2617-2.1 [28]. Por existir uma tendência crescente no uso da norma internacional, apenas os ensaios nela contidos são detalhados na seqüência, os quais caracterizam parâmetros diferentes: o erro de indicação para medições de comprimentos (simbolizado por E) e o erro de apalpação (simbolizado por P).

O ensaio para avaliar o erro de indicação para medições de comprimento é particularmente interessante porque os resultados possuem rastreabilidade direta à unidade de comprimento. O erro de indicação na medição de comprimento é avaliado a-

⁴ Especificação declarada pelo fabricante do equipamento, válida para as seguintes condições ambientais: temperatura absoluta na faixa de $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$; variação temporal de temperatura inferior a 0,3 K/h e 0,4 K/d; gradiente espacial de temperatura inferior a 0,1 K/m [25].

través da comparação dos valores calibrados com os valores medidos em cinco diferentes comprimentos (usando um conjunto de blocos padrão ou um padrão escalonado). Esses cinco padrões de comprimento devem ser posicionados em sete localizações diferentes (ou orientações ou ambas) no volume de trabalho da máquina de medição por coordenadas e medidos três vezes em cada situação, totalizando 105 medições (a figura 2.2 ilustra o contexto de aplicação do ensaio de aceitação para a medição de comprimento).

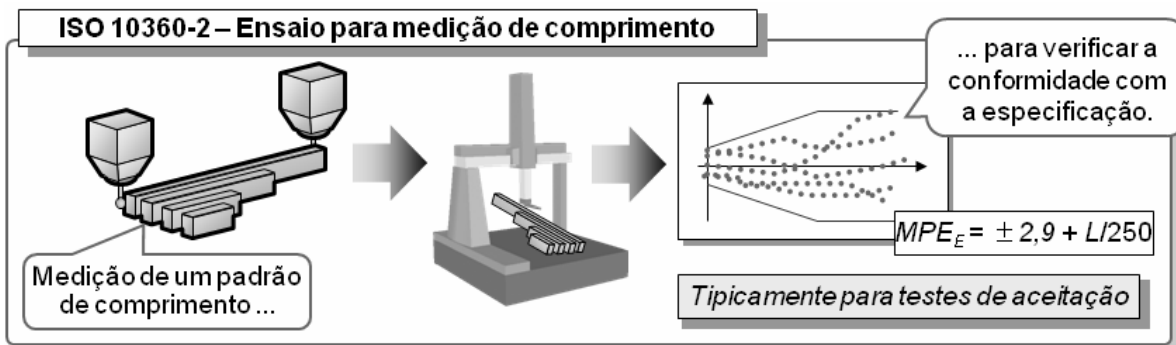


Figura 2.2: Ilustração do ensaio para avaliação em máquinas de medição por coordenadas convencionais do erro de indicação em medições de comprimentos, conforme a norma ISO 10360-2 (adaptada de [29]).

O ensaio para avaliar o erro de apalpação complementa o anterior, pois o sistema de apalpação é solicitado em várias outras direções. O erro de apalpação é obtido através da medição de 25 pontos, preferencialmente, uniformemente distribuídos ao redor de um hemisfério da esfera de referência. Aos pontos medidos se deve ajustar uma esfera pelo método dos mínimos quadrados, e calcular a distância radial de cada ponto em relação à esfera teórica. A amplitude máxima dessas distâncias radiais representa o erro de apalpação.

Com base nos parâmetros definidos pelos testes, poder-se-ia ter uma noção de como a CMM se comportaria em medições de distâncias e diâmetros, usando o erro de indicação na medição de comprimento, e em medições de forma, p.ex., circularidade, usando o erro de apalpação [30]. O uso do termo “noção” foi proposital, primeiro, porque os parâmetros exprimem apenas o comportamento esperado da máquina para aquelas medições particulares; segundo, porque os testes definidos possuem um caráter essencialmente comercial, sendo inclusive adotado o termo *benchmark tests* [31] para referenciá-los. De fato, os testes visam muito mais facilitar a comunicação do usuário com o fabricante, por meio de uma linguagem unívoca, do que subsidiá-lo com informações para efetivamente qualificar o resultado de uma determinada medição executada na rotina [32-34].

Como reflexo deste último ponto, tem-se recorrido ao modelo de corpo rígido^{5,6} para descrever os deslocamentos das partes móveis da máquina de medição por coordenadas. Imperfeições nas guias de movimentação e nas escalas de medição da máquina são convertidas, para cada parte móvel, em três erros de translação e três erros de rotação, identificados na figura 2.3. Em uma máquina representada por três eixos cartesianos, portanto, dezoito erros que dependem da posição das partes móveis (paramétricos) e três erros de (falta de) perpendicularidade entre os eixos, formam os chamados erros geométricos.

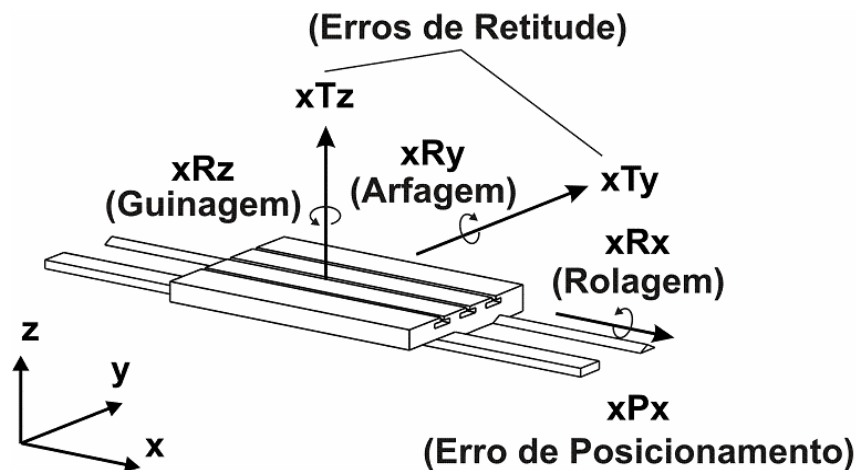


Figura 2.3: Esquemático dos seis erros geométricos individuais revelados por um corpo durante a movimentação ao longo de um eixo.

Infelizmente, não é possível individualizar os erros geométricos com base nos testes definidos na ISO 10360-2. Trapet [39] inclusive menciona que não mais que 70% dos erros de medição de comprimento são, de fato, sensibilizados pelos testes. Embora outros procedimentos possam ser empregados para esse propósito, alguns deles relacionados nos capítulos seguintes, é importante ressaltar que, para muitas situações práticas, por exemplo: medições de criticidade (exatidão requerida) baixa ou média; podem ser suficientes para avaliar a influência do equipamento na medição, as informações provenientes dos ensaios de aceitação ou de algum tipo de avaliação parcial dos erros geométricos.

Contudo, independente da criticidade da medição, fatores além do equipamento po-

⁵ O modelo de corpo rígido tem validade caso sejam observadas as seguintes condições: (a) que as partes móveis da máquina se mantenham rígidas durante os deslocamentos; (b) que os erros em um eixo não dependam das posições dos demais [35-38].

⁶ O modelo de corpo rígido tem-se mostrado suficientemente adequado para representar o comportamento de máquinas do tipo pórtico (com mesa fixa ou móvel), mas tem suas condições violadas, p.ex., em máquinas do tipo braço horizontal.

dem afetar, em maior ou menor grau, uma determinada medição executada em uma máquina de medição por coordenadas, os quais precisam ser coerentemente ponderados a fim de caracterizar a qualidade do resultado dessa medição. Weckenmann et al. [40] fazem referência a três outros grupos, a saber: ambiente, peça e operador, sendo a estratégia de medição parte deste; e argumentam que os fatores: equipamento, ambiente e operador; proporcionam diferentes níveis de erros, que podem ser aproximados, respectivamente, pela relação 1/10/100. Segundo os mesmos autores, o fator peça não pode ser generalizado, visto que ele é muito dependente do processo de fabricação e, até certo ponto, do próprio ambiente.

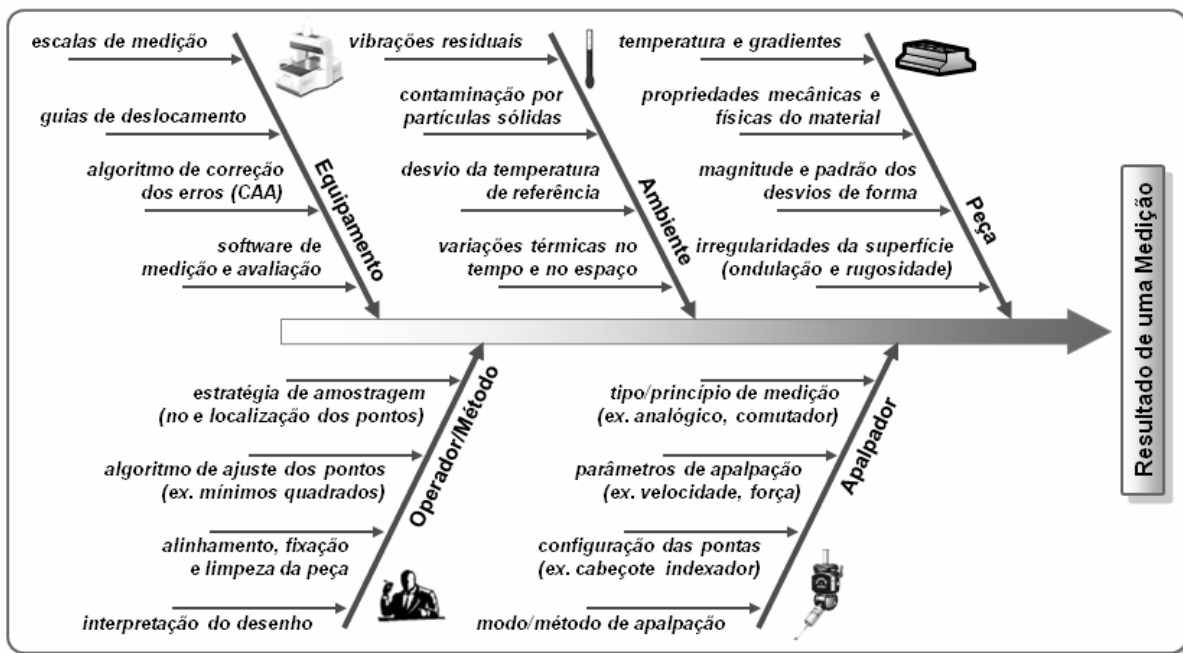


Figura 2.4: Diagrama apontando alguns dos fatores que podem influenciar o resultado de uma medição realizada em uma máquina de medição por coordenadas convencional (os fatores não são necessariamente independentes; adaptada de [41]).

Algumas das potenciais fontes de erro em medições por coordenadas no ambiente de produção, correlacionadas de alguma forma com o agrupamento sugerido acima, são sumarizadas na figura 2.4. Da própria estrutura da máquina, passando pelos apalpadores de medição e culminando com aspectos extrínsecos ao equipamento propriamente dito: temperatura, vibrações, peça, decisões como a estratégia de medição e a própria interpretação do desenho; muitas são as possibilidades de deteriorar-se a qualidade do resultado de uma medição e, conseqüentemente, qualquer análise ou ação posterior.

Em distinção às aplicações laboratoriais, portanto, no ambiente de produção é muito comum que efeitos resultantes do ambiente, da peça sob análise e das decisões e

métodos empregados pelo operador sobrepõem os efeitos do equipamento de medição propriamente dito [42]. As subseções seguintes destinam-se justamente a detalhar as causas não diretamente relacionadas ao equipamento de medição, mas aos outros elementos que constituem o processo de medição.

2.2.1 Influência do fator ambiente sobre as medições

Instaladas nas adjacências da linha de produção, a fim de satisfazer requisitos logísticos da própria empresa, as máquinas de medição por coordenadas, não por acaso, estão geralmente confinadas em salas de medição. O seguinte trecho, extraído de um documento que condiciona o fornecimento de uma CMM [43], retrata a situação: “Para obtenção da melhor capacidade da máquina, é importante que as condições ambientais e de instalação citadas a seguir, sejam respeitadas. O não cumprimento dessas condições pode comprometer a exatidão e aspectos funcionais do equipamento. Nessas condições o fabricante não tem como garantir as especificações originais de exatidão do mesmo.”

Normalmente limites máximos são impostos à variação dos mais diversos fatores, com especial destaque para a temperatura e as vibrações. Tomando como exemplo o documento supracitado, é recomendado pelo fabricante que a temperatura no ambiente de medição situe-se na faixa de $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$, com gradiente térmico inferior a 1 K (por 8 h), e que os níveis de vibração não ultrapassem 2 μm (amplitude pico a pico) para frequências menores que 10 Hz e aceleração inferior a $0,004\text{ m/s}^2$ para frequências entre 10 Hz e 50 Hz.

Os valores acima especificados exprimem a extrema sensibilidade das máquinas de medição por coordenadas às características do ambiente. Sob condições não ideais de temperatura, a estrutura da máquina fica suscetível a efeitos os mais diversos. Desvios da temperatura de referência provocam a expansão/contração das escalas de medição da máquina, gradientes espaciais e temporais de temperatura induzem erros de rotação (guinagem e arfagem) e erros de perpendicularidade entre os eixos, e erros de rolagem podem ser causados pela falta de homogeneidade na temperatura das guias de deslocamento [44]. Alguns desses efeitos são representados na figura 2.5. Na parte esquerda da figura é ilustrado o efeito sobre a base da CMM de um gradiente de temperatura na direção vertical, provocando um desvio de rotação do

tipo arfagem, e na parte direita um gradiente horizontal nas colunas da CMM ocasiona um erro de (falta de) perpendicularidade entre os eixos.

A magnitude desses erros pode ser reduzida a níveis diminutos caso algumas regras sejam observadas, tais como: controlar continuamente a temperatura do ambiente, manter a máquina afastada das paredes, isolar termicamente as paredes, limitar o número de pessoas no laboratório e não orientar o fluxo de ar diretamente sobre máquina. Contudo, não é suficiente considerar apenas a instalação da CMM em um ambiente adequadamente climatizado e esquecer que a peça, proveniente do meio produtivo, também sofre com variações de temperatura. Por serem compostos por materiais distintos, objeto e máquina experimentam comportamentos bastante dissimilares na presença de discrepâncias térmicas. Uma alternativa para contornar esse problema poderia ser a construção de uma ante-sala, também climatizada, onde as peças ficassem dispostas até que o equilíbrio térmico fosse atingido.

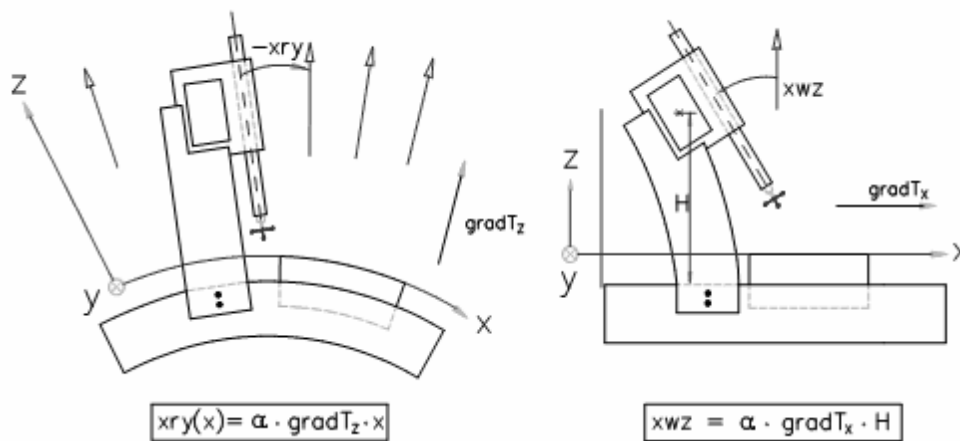


Figura 2.5: Modelo simplificado que relaciona distintos gradientes de temperatura com os erros geométricos por eles induzidos [45].

Como a capacidade de uma CMM pode ser também consideravelmente degradada por níveis de vibração excessivos, é extremamente importante que as amplitudes de vibração e as frequências em que elas ocorrem no (provável) local de instalação da máquina sejam quantificadas, analisadas e comparadas com os limites máximos definidos pelo fabricante para uma determinada CMM. Com base nesses dados um sistema de amortecimento apropriado para uma determinada aplicação pode ser selecionado (p.ex., isoladores passivos à base de elastômeros, sistemas ativos de amortecimento, bases inerciais de concreto) ou, em casos críticos, um novo local para a instalação da CMM pode ser estudado.

A integração das máquinas de medição por coordenadas com o ambiente de produção tem suscitado outro ponto: as condições de asseio [46]. Não apenas porque partículas sólidas podem afetar o bom funcionamento e a vida útil do equipamento (efeito este que pode ser atenuado caso a pressão dentro do laboratório seja mantida ligeiramente superior à externa), mas também porque as medições podem ser negativamente influenciadas pela presença de partículas, cavacos e/ou rebarbas nas superfícies de interesse da peça. Conseqüentemente, mesmo se o local fosse apropriadamente pressurizado, medições isentas de asperezas só seriam possíveis caso boas práticas fossem seguidas pelas pessoas.

Se todos os cuidados mencionados nos últimos parágrafos fossem tomados durante a instalação e uso de uma CMM, 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 aquelas considerações são, mesmo que parcialmente, respeitadas. Assim, sempre que a instalação de uma CMM se dê num local vicinal à produção, ou na própria linha ou célula de produção, é recomendável que o efeito do fator ambiente nas medições seja apropriadamente considerado, para que as decisões nelas baseadas não sejam desvirtuadas de alguma maneira.

2.2.2 Influência da peça sob investigação

Um dos maiores dilemas da metrologia dimensional envolve o contraste *mundo ideal* versus *mundo real*. O primeiro reflete o intento do projetista, repassado por meio de elementos geométricos perfeitos (p.ex., linhas, planos, cilindros, cones) nos desenhos de engenharia. O segundo simboliza o fato de qualquer produto de um processo de fabricação exibir imperfeições. Nos processos de usinagem tradicionais, por exemplo, as imperfeições relacionam-se ao tipo de processo de fabricação, às propriedades do material da peça, à fixação da peça, aos comportamentos estático e dinâmico da máquina ferramenta, aos parâmetros de corte (avanço, profundidade e velocidade) e aos efeitos térmicos sobre máquina e peça [47].

As imperfeições se manifestam em uma peça na forma de desvios no tamanho, localização, orientação e forma de um determinado elemento geométrico em relação ao nominal, assim como de irregularidades na superfície (ondulação e rugosidade). Os limites funcionais dessas imperfeições são especificados em desenhos técnicos,

normalmente baseados nas normas ASME Y14.5M [48] e ISO 1101 [49]. Determinar a aceitabilidade de um produto usando uma CMM (ou qualquer técnica de medição que se baseie na amostragem de pontos discretos), contudo, pode não ser trivial caso os desvios de forma da peça sejam significativos.

Uma vez que os requisitos geométricos especificados usando as normas aplicam-se à superfície completa dos elementos geométricos da peça, é virtualmente impossível avaliar tolerâncias dimensionais e geométricas estritamente conforme as normas em máquinas de medição por coordenadas [50-52]. Por outro lado, apenas alguns pontos extremos na superfície da peça determinam realmente a sua funcionalidade [23]. Seguindo esse raciocínio, seria suficiente, em princípio, amostrar unicamente os extremos funcionais da superfície da peça. Conseqüentemente, a definição da estratégia de medição, tarefa normalmente deixada a cargo do operador da máquina, deveria considerar esses aspectos.

Sendo as incógnitas de uma medição justamente os extremos funcionais da peça, não são diretas as decisões sobre a estratégia de medição, i.e., número de pontos e distribuição dos pontos. A complexidade do problema se torna ainda maior porque qualquer técnica de amostragem de pontos discretos naturalmente informa apenas as coordenadas desses pontos referenciados a um sistema coordenado fixo. Para possibilitar a avaliação da conformidade de um produto, portanto, é necessário que elementos geométricos (em geral ideais) sejam ajustados aos pontos medidos através de algum algoritmo matemático específico (e.g., mínimos quadrados, mínima zona, máximo [mínimo] elemento inscrito [circunscrito]), e os parâmetros que os definem (e.g., posição, dimensão, orientação) posteriormente comparados com as informações contidas nos desenhos.

Se o número de pontos amostrados fosse suficientemente grande, certamente os extremos funcionais seriam tomados e a questão estaria resolvida sempre que o algoritmo de avaliação apropriado fosse escolhido. O fator tempo de medição, por sua vez, desqualifica essa opção. Na prática, portanto, durante a definição de uma estratégia de medição, é preciso fazer um balanço entre o tempo de medição e a perda de informação ocasionada por uma amostragem limitada. Entende-se por perda de informação o fato de as geometrias substitutas assim definidas revelarem resíduos, causados por dois efeitos inter-relacionados: informação incompleta sobre a geometria da peça e sensibilidade aos erros de medição e desvios de forma das peças [34].

A relevância do tema estratégia de medição/avaliação foi identificada por Walker [53] ainda em 1988, e endossada por Brown [54] em 1992 através do uso da expressão *methods divergence*. Desde então, vários trabalhos sobre a temática, normalmente intitulada *otimização da estratégia de medição*, têm sido publicados, sendo alguns deles mencionados na bibliografia [50-51,55-56]. Em geral esses trabalhos sugerem que uma subamostra seja selecionada a partir de uma amostragem suficientemente densa da superfície de interesse, e que perda de informação resultante seja estimada com base em algum critério especial (p.ex.: erro combinado, fator de subestimação). Não existem registros, no entanto, da utilização desses conceitos em cenários não-acadêmicos.

Em adição à difícil tarefa de definir uma estratégia de medição eficiente, pode-se atribuir ao operador ainda estas atividades: interpretação dos desenhos de engenharia, definição das referências da peça, qualificação das pontas de medição, manuseio, fixação e limpeza da peça. A confiabilidade do resultado de uma medição depende em grande escala da correta realização das atividades mencionadas, assim como da adequada observância dos outros pontos até aqui externados. Mensurar a qualidade desse resultado na presença daqueles fatores de influência constitui o tópico da seção seguinte.

2.3 Tarefa específica de medição: impacto na análise da incerteza

As seções anteriores ilustraram que, independente do tipo de aplicação, muitas são as variáveis que potencialmente afetam a confiabilidade/qualidade das medições por coordenadas. A magnitude com que elas se manifestam, e a maneira como elas são controladas é o que diferencia uma medição de laboratório de uma medição de produção. Ficou evidente que vincular a efetiva capacidade de medição à máquina somente, p.ex., com base nas especificações declaradas pelo fabricante, não constitui uma prática consistente. A influência de fatores além do equipamento e a forma como eles se relacionam, transformam cada tarefa de medição em um evento essencialmente único.

Isso significa dizer que, embora medições confiáveis formem um importante pré-requisito para a produção industrial de alta qualidade, não é trivial evidenciar e garantir, pelos fatos destacados, que uma medição em particular seja realmente ade-

quada para um fim específico. A comunidade metrológica tem direcionado esforços nos últimos anos à questão da rastreabilidade aos resultados das medições de produção [57-58]. À primeira vista pode parecer que essa questão exprime apenas mais um capricho dos metrologistas ou um mero legado da metrologia científica, que vai de encontro às reais necessidades do setor industrial. Definir e compreender o conceito de rastreabilidade, portanto, torna-se mister para fundamentar as iniciativas correntes.

Rastreabilidade é definida pelo Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia (VIM) [59] como a “propriedade do resultado de uma medição ou do valor de um padrão estar relacionado a referências estabelecidas, geralmente a padrões nacionais ou internacionais, através de uma cadeia contínua de comparações, todas tendo incertezas estabelecidas.” A moderna definição de rastreabilidade, portanto, amarra os conceitos de calibração (inclusive, a versão preliminar do novo VIM [60] emprega o termo “calibrações” em vez de “comparações”) e incerteza de medição [61-62].

A incerteza é o parâmetro internacionalmente aceito para estimar o erro de medição, definida no VIM como um “parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser fundamentadamente atribuídos a um mensurando.” Como a incerteza potencialmente descreve o cúmulo de todos os possíveis erros de medição, provenientes de efeitos aleatórios e sistemáticos, pode-se interpretá-la como uma métrica de confiabilidade/qualidade do resultado de uma medição. Assim, a partir do conhecimento da incerteza, pode-se não apenas garantir a rastreabilidade do resultado de uma medição de produção, mas também julgar a efetiva capacidade da medição.

O GUM [2] é o documento que estabelece as regras fundamentais para a avaliação e expressão da incerteza em medições. A metodologia apresentada no GUM baseia-se no adequado conhecimento do processo de medição e das grandezas que contribuem para a incerteza. A partir das informações úteis que descrevem o processo de medição, o modelo matemático que estabelece o relacionamento entre o mensurando Y e as grandezas de entrada relevantes X_i das quais Y depende:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (2.1)$$

geralmente precisa ser formulado. A incerteza do resultado de uma dada medição y ,

denotada por $u(y)$, provém da propagação gaussiana dos vários componentes de incerteza, $u(x_i)$ [63]:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i) + 2 \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial f}{\partial x_j} \cdot u(x_i, x_j) \quad (2.2)$$

onde x_i e x_j são as estimativas de X_i e X_j e $u(x_i, x_j) = u(x_j, x_i)$, a covariância estimada, associada com x_i e x_j . As derivadas parciais, ou coeficientes de sensibilidade, $\partial f / \partial x_i$ descrevem como a estimativa de saída y varia com alterações nos valores das estimativas de entrada.

Embora o GUM seja um documento considerado por muitos como tecnicamente robusto e completo, seu uso fora dos laboratórios de calibração tem-se dado de forma bastante isolada, em parte porque muitos enxergam o método nele descrito matematicamente profundo, muito condensado e pouco prático [64]. No caso específico das medições por coordenadas, o complexo relacionamento entre as grandezas que influenciam o resultado de uma medição surge como um complicador a mais na difusão do uso do conceito de incerteza.

Entretanto, simplesmente renunciar ao conceito de incerteza e operar praticamente às escuras não parece constituir uma decisão apropriada. 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 considerado decisivo, até mesmo, para a sobrevivência de uma organização. Por esses e outros motivos, técnicas têm sido especialmente propostas para promover a (boa) prática da avaliação da incerteza em medições por coordenadas. A descrição e análise crítica dessas técnicas constituem o tópico principal do capítulo seguinte deste documento.

Em todas essas técnicas, por sua vez, está implícita a percepção de que a avaliação da incerteza relaciona-se sempre a uma tarefa específica de medição, sendo usual, até como forma de desvinculá-la por completo de qualquer avaliação feita no escopo dos testes de aceitação e reverificação da máquina pelo próprio fabricante, o uso da

expressão *incerteza da tarefa específica de medição*⁷. Por exemplo, a incerteza associada ao resultado da medição do diâmetro de um furo cilíndrico, de valor nominal Ø90,5 mm e produzido sob condições particulares e estáveis de fabricação, é, para um nível da confiança de 95%, 0,008 mm (valor válido apenas para um equipamento de medição específico, sendo observado um procedimento de medição e avaliação bem definido).

Outra forma de ilustrar o porquê das avaliações específicas de incerteza é resgatar o que foi descrito na subseção 2.2, na forma de um exemplo hipotético, adaptado de Phillips [61]. Supondo que o procedimento de confirmação metrológica de uma CMM envolvesse apenas avaliar o erro de posicionamento em um dos eixos da máquina, a $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$, e que a grandeza de interesse fosse o comprimento de um bloco alinhado com aquele mesmo eixo, a $22\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$; sendo as condições de medição e avaliação muito semelhantes, poder-se-ia considerar necessário apenas, na composição da incerteza, em adição ao erro de posicionamento da máquina, os efeitos associados ao desvio da temperatura.

Por outro lado, caso a grandeza de interesse fosse a cilindricidade de um furo inclinado em relação aos eixos da CMM, uma tarefa de medição comumente observada na prática industrial, então as condições de medição e avaliação seriam completamente distintas, e muitas outras informações seriam necessárias para a composição da incerteza, tais como a capacidade volumétrica da máquina, as características direcionais do apalpador e o impacto da estratégia de medição (inclusive filtragem mecânica e digital) na avaliação da característica de interesse.

Fica evidente então que, apesar de a flexibilidade e a versatilidade constituírem duas das inestimáveis virtudes das máquinas de medição por coordenadas, elas também complicam sobremaneira a tarefa de estimar as incertezas das medições específicas. No particular caso dos laboratórios de calibração, os requisitos técnicos da norma ISO/IEC 17025 [66] são usualmente cumpridos por estarem envolvidos apenas um número gerenciável de fatores que contribuem para a incerteza, e porque as técnicas existentes para auxiliar a avaliação da incerteza operam satisfatoriamente.

⁷ Summerhays et al. [65] a definem como sendo uma expressão da incerteza de medição que é específica para um mensurando em particular, específica para um conjunto de condições de medição em particular e específica para um nível de confiança em particular.

Essas mesmas constatações, porém, não podem ser estendidas às chamadas medições de produção, visto que raras são as situações em que se observam declarações bem fundamentadas sobre a confiabilidade do resultado de uma medição. Embora a complexidade intrínseca aos processos de medição por coordenadas contribua para esse fato, a ausência de métodos que estejam ao efetivo alcance do usuário comum da tecnologia de medição por coordenadas pode ser entendida como a causa principal.

CAPÍTULO 3

ESTADO DA ARTE NA TEMÁTICA “AVALIAÇÃO DA INCERTEZA EM MEDIÇÕES POR COORDENADAS”

De acordo com a moderna definição de rastreabilidade, uma expressão completa do resultado de uma medição deve necessariamente incluir a sua incerteza de medição. Como já ressaltado, na grande maioria das medições por coordenadas industriais, não é suficiente repetir os ensaios de aceitação de uma CMM numa base periódica para assegurar a rastreabilidade e a confiabilidade dos resultados das medições feitas em peças de produção. A relevância da incerteza de medição tem transcendido, entretanto, os aspectos técnicos, descritos no capítulo anterior, sendo hoje parte do conteúdo de normas de distintos escopos.

Embora as normas de sistemas da qualidade ISO 9000 [67] e ISO/TS 16949 [68] não explicitem a necessidade da incerteza de medição, ambos os documentos fazem referência à norma ISO 10012, que claramente expressa que a incerteza de medição deve ser estimada para cada processo de medição, e que todos os resultados de medição devem ser rastreáveis ao SI. Cabe ressaltar, porém, que a ISO 10012 não deve ser utilizada como um requisito para demonstrar conformidade com as duas normas da qualidade supramencionadas. Por outro lado, o conteúdo nela descrito evidencia a relevância dos conceitos de incerteza e rastreabilidade para uma organização.

Normas como a ISO 14253-1 [69] e a ASME B89.7.3.1 [70] dedicam-se à importante questão da avaliação da conformidade de produtos, e de equipamentos de medição, considerando a presença da incerteza de medição. Essas normas descrevem regras de decisão para demonstrar conformidade com as especificações, regras estas que consideram não somente o resultado da medição de uma determinada característica de um produto e a tolerância (ou erro máximo admissível), mas também a incerteza.

A principal diferença entre a norma internacional e a americana reside no fato que esta estabelece que as regras sejam decisões de cunho gerencial, sugerindo que seja aplicada uma fração da incerteza de medição apropriada para a economia da empresa; por outro lado, aquela usa 100% da incerteza de medição na formulação das regras de decisão, como ilustrado na figura 3.1, onde a faixa de conformidade é definida como a faixa de especificação reduzida pela incerteza de medição e as faixas de não-conformidade como as faixas de fora de especificação reduzidas pela incerteza de medição. As faixas de incerteza indicam regiões onde a conformidade e a não-conformidade não podem ser rigorosamente demonstradas [70-72].

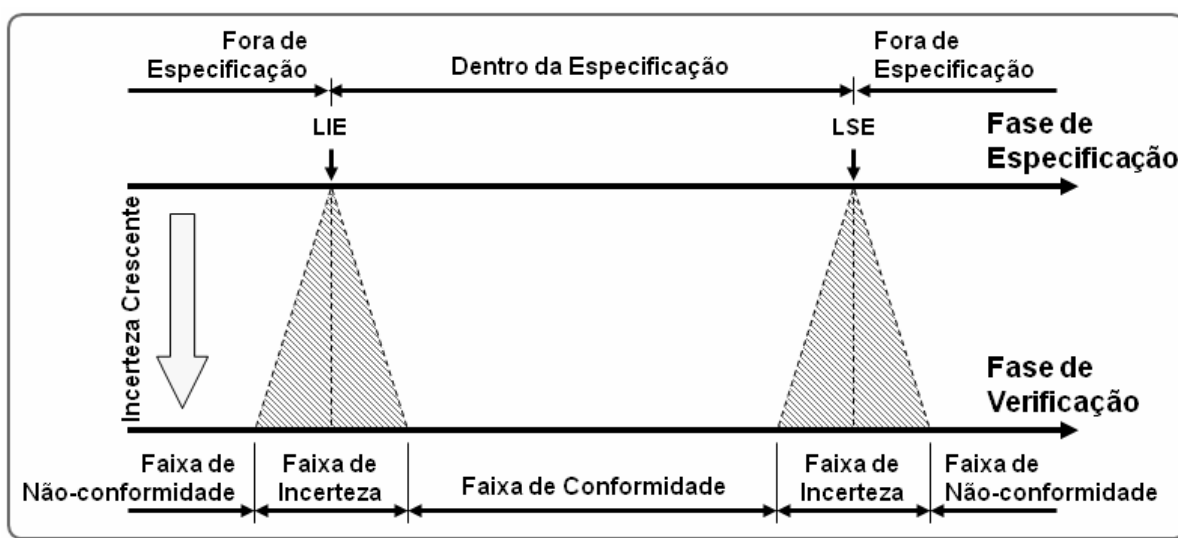


Figura 3.1: Efeito da incerteza de medição na avaliação da conformidade de produtos, segundo as regras de decisão explicitadas na norma ISO 14253-1.

O bom senso metrológico e o gradual surgimento de requisitos normativos têm impulsionado várias iniciativas no contexto da transferência da rastreabilidade e da avaliação da incerteza em medições de produção com máquinas de medição por coordenadas. De uma forma geral, as técnicas sugeridas se enquadram em uma destas quatro categorias: análise de sensibilidade, método experimental, simulação computacional e parecer de um especialista, descritas abaixo:

- A análise de sensibilidade denota o método analítico descrito no GUM clássico, e basicamente envolve os seguintes passos: (1) formular um modelo matemático que relacione todas as grandezas que possam afetar significativamente a medição; (2) estimar o valor de cada grandeza de entrada a partir da análise estatística de uma série de observações (denominada avaliação Tipo A) ou por outros meios (denominada avaliação Tipo B); (3) avaliar a incerteza padrão de cada estimativa de entrada; (4) determinar os coeficientes de sensibilidade; (5)

avaliar as covariâncias no caso de correlações significativas; (6) estimar a incerteza padrão combinada do resultado da medição através da *lei de propagação da incerteza*; e, finalmente, (7) obter a incerteza expandida para um determinado fator de abrangência.

- O método experimental pode ser interpretado com uma variação do método (de medição) por substituição, outrora comparação; aceito como uma das soluções técnicas para acreditar laboratórios que usam máquinas de medição por coordenadas para calibrar peças e padrões [73]. Essencialmente, a incerteza de medição para uma característica em particular é determinada através de repetidas medições, sob condições reais, de uma peça de referência, que apresente propriedades metrológicas similares às da peça de interesse e cujo valor da característica seja conhecido, seguida da avaliação estatística dos desvios observados em relação ao valor calibrado.
- A simulação computacional refere-se à aplicação de métodos numéricos, em especial do método de Monte Carlo, conforme o suplemento 1 para o GUM [74]. A avaliação da incerteza parte, assim como no GUM clássico, da formulação de um modelo matemático relacionando a grandeza de saída com as grandezas de entrada das quais ela depende. O que diferencia os métodos é que funções densidade de probabilidade são atribuídas às grandezas de entrada e a propagação das distribuições é empregada para determinar, por simulação numérica, um intervalo de abrangência que contenha o valor da grandeza de saída para uma dada probabilidade.
- O parecer de um especialista (*expert opinion/judgement*) representa aquele tipo de avaliação da incerteza baseada apenas na experiência prática e no conhecimento geral de um especialista devidamente qualificado (que demonstre competência), e que está diretamente associado com os termos expressados no item 4.3.2 do GUM.

O restante deste capítulo dedica-se a apresentar as soluções de maior impacto para estimar a incerteza de uma tarefa específica de medição no estágio atual. É preciso salientar, até como forma de enfatizar o cenário até aqui apresentado, que todas as técnicas sugeridas fazem sempre alusão ao intrincado sistema de causas do erro de medição e a dificuldade em se descrever a medição de uma característica qualquer por meio de algum modelo matemático fechado.

3.1 Categoria “análise de sensibilidade”

Embora represente o método de avaliação da incerteza explicitado no GUM clássico, a categoria “análise de sensibilidade” tem sido raramente povoada por soluções para estimar a incerteza em medições por coordenadas [75], fato este que pode ser entendido como resultado das seguintes observações, feitas por Schwenke et al. [76]:

- o modelo matemático toma relativa complexidade, não apenas pelo número de grandezas que afetam a medição, mas também porque normalmente algoritmos numéricos são usados para ajustar os pontos individuais medidos a elementos geométricos perfeitos;
- a determinação dos coeficientes de sensibilidade não é possível analiticamente, pois os mensurandos, i.e., parâmetros direta ou indiretamente relacionados aos elementos geométricos perfeitos, são obtidos a partir de cálculos numéricos;
- a correção para efeitos sistemáticos significativos reconhecidos geralmente não é conveniente na rotina industrial, sendo assim interessante considerar esse efeito ampliando-se o intervalo de incerteza atribuído ao resultado.

Os dois primeiros pontos refletem exatamente aquilo que foi delineado no capítulo anterior, enquanto que o terceiro argumento é no mínimo discutível. Primeiro, porque o próprio GUM declara, na nota do item 6.3.1, que: “A avaliação da incerteza de um resultado de medição não deve ser confundida com o estabelecimento de um limite de segurança associado a uma determinada grandeza.”; segundo, porque o mesmo GUM recomenda tratamentos específicos para casos em que não sejam aplicadas correções para efeitos sistemáticos significativos conhecidos.

No entanto, outros especialistas têm explorado o uso do método tradicional do GUM, em especial, Weckenmann [42] e Cross [77], que o aplicam para solucionar casos práticos extremamente simples, e Salsbury [78] e Hernla [79-80], que o adotam para avaliar a incerteza em medições em que os mensurandos são características GD&T ou GPS. As contribuições relevantes destes últimos dois especialistas serão abordadas nas subseções seguintes, uma vez que eles buscam atuar nos pontos críticos levantados no capítulo anterior.

3.1.1 Contribuição de Salsbury: matrizes de relacionamento

Um dos tratamentos mais completos para a avaliação da incerteza em medições por coordenadas usando o método tradicional do GUM pode ser atribuído a Salsbury. A metodologia por ele apresentada orienta o usuário na definição dos componentes de incerteza que potencialmente afetam a avaliação de uma determinada característica GD&T, e na quantificação e posterior combinação desses componentes.

Para auxiliar a definição dos vários componentes de incerteza, primeiramente eles foram reagrupados em quatro categorias, em princípio, independentes entre si, que são definidas nos itens abaixo:

- Categoria máquina: considera essencialmente os erros geométricos da CMM e as variações médias normais ocasionadas pelo ambiente.
- Categoria apalpador: inclui os fatores que afetam a qualificação das pontas individuais (p.ex., velocidade e força de medição, inclinação da haste), os efeitos do uso de múltiplas pontas durante medição de uma característica e a influência do modo de apalpação, i.e., discreto ou contínuo/analógico.
- Categoria peça: compreende a influência da estratégia de medição (número de pontos, distribuição dos pontos e algoritmo de avaliação) e da temperatura, i.e., efeito da diferença de temperatura entre a peça e as escalas da máquina.
- Categoria repetitividade: inclui todos os efeitos significativos não levados em conta pelos três componentes anteriores, tais como a influência do operador no processo de fixação da peça, a influência de variações espaciais e temporais de temperatura, etc.

Com base nessa classificação, tabelas de referência (matrizes de relacionamento) foram formuladas para as três primeiras categorias, as quais relacionam e indicam quais são aqueles componentes de incerteza que afetam (ou podem afetar) significativamente a avaliação de algumas características GD&T, conforme tabela 3.1.

Uma vez definidos o mensurando, i.e., a característica GD&T, e os componentes de incerteza que afetam significativamente a sua realização, precisam ser estimadas as magnitudes destes. Para tanto, resultados de ensaios de aceitação/verificação da CMM e do apalpador, experimentos os mais variados, p.ex., estudos de repetitivida-

de e reprodutibilidade (R&R), ou qualquer outra fonte de informação podem ser usados. De posse desses valores, e dos coeficientes de sensibilidade que os relacionam com o mensurando, a incerteza de uma tarefa específica de medição pode ser estimada extraindo-se a raiz quadrada positiva da soma das variâncias associadas às quatro categorias consideradas, pois se assume independência estatística entre as grandezas de influência.

Tabela 3.1: Síntese das matrizes apresentadas por Salsbury, que relacionam e indicam quais componentes de incerteza afetam determinadas características GD&T. Código de referência: 5 (afeta); 4 (possivelmente afeta); 3 (provável, mas depende da superfície); 2 (improvável, exceto para grandes superfícies); 1 (não afeta, a menos que sejam usadas múltiplas pontas no mesmo elemento); 0 (não afeta).

		Característica GD&T							
		Posição	Paralelismo	Perpendicularidade	Batimento Circular	Planeza	Circularidade	FOS	
Fator de Influência	Máquina	---	5	5	5	5	2	2	5
	Apalpador	Qualificação das Pontas	5	0	0	0	0	0	5
		Uso de Múltiplas Pontas	5	1	1	5	5	5	5
		Modo de Apalpação	4	4	4	5	5	5	4
	Peça	Estratégia de Amostragem	5	5	5	5	5	5	5
		Efeitos Térmicos	5	4	4	3	2	2	5

Apesar de ter sido apresentada há mais de uma década, poucos são aqueles que reportam alguma experiência com a metodologia. Wilhelm et al. [81] descrevem que excelentes resultados foram obtidos com o uso da técnica (embora não mencionem o que foi realmente avaliado), e que a técnica exige esforço significativo por parte do interessado. De fato, dois são os aspectos que explicam o limitado uso do método:

- Aspectos técnicos: embora pontos como assumir correlação desprezível entre as grandezas de entrada e contar duplamente os componentes de incerteza possam ser alvos de discussões; a maior deficiência do método reside na falta de subsídios sobre como empregar, de maneira coerente, os dados provenientes de ensaios de avaliação da CMM, e como derivar coeficientes de sensibilidade para os parâmetros que descrevem as geometrias substitutas calculadas.

- Aspectos operacionais: por ser uma técnica que exige considerável empenho e conhecimento por parte do responsável pela medição, e sendo a metrologia industrial uma atividade meramente operacional na maioria das situações, a reação dos usuários ao método não poderia ser muito distinta daquela até hoje observada.

3.1.2 Contribuição de Hernla: efeitos sistemáticos da CMM

Uma solução aparentemente independente, porém que atua em parte das limitações técnicas da metodologia proposta por Salsbury, pode ser verificada nos trabalhos de Hernla. Embora condições como a independência estatística entre as grandezas de entrada seja comum a ambas as técnicas, a provisão de expressões (tabela 3.2) para quantificar, a partir da especificação de erro máximo admissível para medições de comprimento, o efeito dos desvios geométricos da CMM em cada característica GPS constitui, por si só, uma importante contribuição.

Tabela 3.2: Extrato das expressões apresentadas por Hernla [79] para estimar o efeito dos erros da CMM sobre características dimensionais e geométricas, sendo K uma constante adimensional definida na ISO 10360-1 [24].

Característica GPS	Estimativa (μm)	Observação
FOS	$\Delta L \leq \frac{L}{K}$	L: valor nominal do elemento tolerado ou cota básica da tolerância de posição
Posição (no espaço)	$\Delta L \leq \frac{1}{K} \cdot \sqrt{L^2 + l^2}$	L: cota básica da tolerância de posição l: maior valor nominal do elemento perpendicular à cota básica
Coaxialidade	$\Delta L_C \leq \frac{1}{K} \cdot \sqrt{\frac{D^2}{4} + L^2}$	D: maior valor nominal do diâmetro L: valor nominal do menor comprimento
Perpendicularidade	$\Delta L_P \leq \frac{2L}{K}$	L: valor nominal do comprimento do menor cateto (o maior refere-se ao plano de referência)
Retitude	$\Delta F_R \leq \frac{L}{K}$	L: valor nominal do comprimento da reta
Planeza	$\Delta F_P \leq \frac{1}{K} \cdot \sqrt{5l^2 + L^2}$	L: valor nominal do maior lado do plano l: valor nominal do menor lado do plano

Para a formulação de todas as expressões mostradas na tabela 3.2, Hernla adotou o seguinte raciocínio: que cada componente individual de erro geométrico da máquina seja integralmente caracterizado pelo valor do erro máximo admissível declarado. Com base nesse raciocínio, e em algumas considerações adicionais para casos particulares, a dedução das expressões se torna relativamente simples e direta, embora seja questionável o valor agregado pela maioria delas. Primeiro, porque o emprego do raciocínio acima pode induzir estimativas demasiadamente conservativas dos respectivos componentes de incerteza; segundo, porque alguns dos erros geométricos não solicitados durante medições de distâncias entre faces de um padrão de comprimento, por exemplo, erros de retitude e alguns erros de rotação, são estimados com base nelas.

Tendo como base algumas publicações de Lotze [82-83], Hernla também mostra que coeficientes de sensibilidade podem ser estimados para os parâmetros que definem círculos e esferas ajustadas pelo método dos mínimos quadrados, i.e., coordenadas do centro e diâmetro do elemento associado. Expressões fechadas, que dependem tão somente do número de pontos amostrados e do desvio padrão dos pontos coordenados, podem ser obtidas para avaliar a incerteza dos parâmetros dos elementos ajustados, desde que algumas condições sejam satisfeitas: (1) que os pontos estejam igualmente espaçados ao longo/redor de toda a superfície do elemento; (2) que apenas efeitos puramente aleatórios independentes e identicamente distribuídos (i.i.d) estejam associados aos pontos.

Apesar de adicionar elementos à metodologia de Salsbury, os trabalhos de Hernla partilham das mesmas dificuldades operacionais apontadas anteriormente. Os casos solucionados pela técnica não refletem em absoluto os mensurandos observados na prática industrial, como se pode verificar em [84], e orientações não são dadas ao metrologista industrial sobre como proceder nessas situações, comprometendo a receptividade ao método.

Embora isso confirme a grande dificuldade em modelar matematicamente medições por coordenadas, as iniciativas de Hernla e Salsbury indicam também que parte das colocações de Schwenke et al. [76], citadas no início da seção, não podem ser tomadas como verdades irrefutáveis. Pode-se inferir, a partir dos trabalhos mostrados, que a técnica clássica de avaliação da incerteza tem sim aplicação potencial, mesmo em medições com máquinas de medição por coordenadas, desde que especial a-

tenção seja dada à forma de interação com o usuário, que deveria ser a mais intuitiva possível, e que casos observados na prática industrial sejam de fato tratados.

3.2 Categoria “método experimental”

Uma alternativa ao uso de complexos modelos matemáticos da medição e, dentro de certos limites, da própria lei de propagação das incertezas, é conduzir experimentos que sejam suficientemente sensíveis às causas concebíveis de incerteza. A variação esperada para uma determinada medição, por exemplo, poderia ser avaliada por estudos de R&R, conforme instruções dadas em manuais de referência da indústria automotiva [6,85]. Em sua forma tradicional, porém, os resultados gerados por estudos de R&R não são suficientes para quantificar a incerteza de medição, pois efeitos sistemáticos absolutos não são identificados por eles.

A insensibilidade dos estudos de R&R convencionais aos efeitos sistemáticos absolutos pode ser remediada por meio da utilização das chamadas peças de referência (peças padrão), do termo em inglês *golden parts* [33,86], cujos valores das grandezas de interesse sejam conhecidos. Espelhado no conhecido método por substituição, de ampla aplicação, por exemplo, na calibração de blocos padrão, o uso de peças normais de produção, porém calibradas, para avaliar a incerteza desponta como uma solução atraente na perspectiva do metrologista industrial.

Isso porque, em tese, de posse de uma peça de referência que represente suficientemente bem o problema de medição, o metrologista industrial pode fazer estimativas razoáveis da incerteza com base apenas em um conjunto limitado de medições da peça de referência e em alguns processamentos matemáticos bastante elementares. Em virtude da sua aparente simplicidade, o conceito tem conquistado adeptos na comunidade metrológica, sendo hoje inclusive formalizado nos seguintes documentos técnicos: ISO/TS 15530-3 [10] e VDI/VDE 2617-8 [87].

3.2.1 Avaliação da incerteza de medição usando peças calibradas

Embora ainda não possua um *status* de norma internacional, muitos são os relatos de aplicação da técnica experimental especificada na ISO/TS 15530-3 [88-91]. A

praticidade operacional desponta como uma qualidade inegável do procedimento, pois, de posse de uma ou mais peças (de referência) calibradas, com características metrológicas semelhantes às peças medidas no cotidiano, as respectivas incertezas podem ser extraídas a partir da avaliação estatística de algumas medições da(s) peça(s) calibrada(s), sob condições normais de operação, p.ex., configuração do apalpador de medição, estratégia de medição, programa de medição, etc.

De uma forma geral, conforme explicitado na equação 3.1, a incerteza resulta da combinação da incerteza padrão associada ao valor calibrado da grandeza, u_{cal} , com o desvio padrão das observações individuais, u_p . Uma correção pode ser aplicada ao resultado caso exista tendência significativa, b , entre a média das medições da CMM e o valor calibrado, embora seja também possível, como descrito no item 7.3.3.2 da ISO/TS 15530-3, adicioná-la algebricamente à incerteza expandida calculada. Caso outras contribuições para a incerteza sejam relevantes, como aquelas relacionadas à peça, u_w , deve-se também considerá-las na incerteza.

$$U = k \cdot \sqrt{u_{cal}^2 + u_p^2 + u_w^2} + |b| \quad (3.1)$$

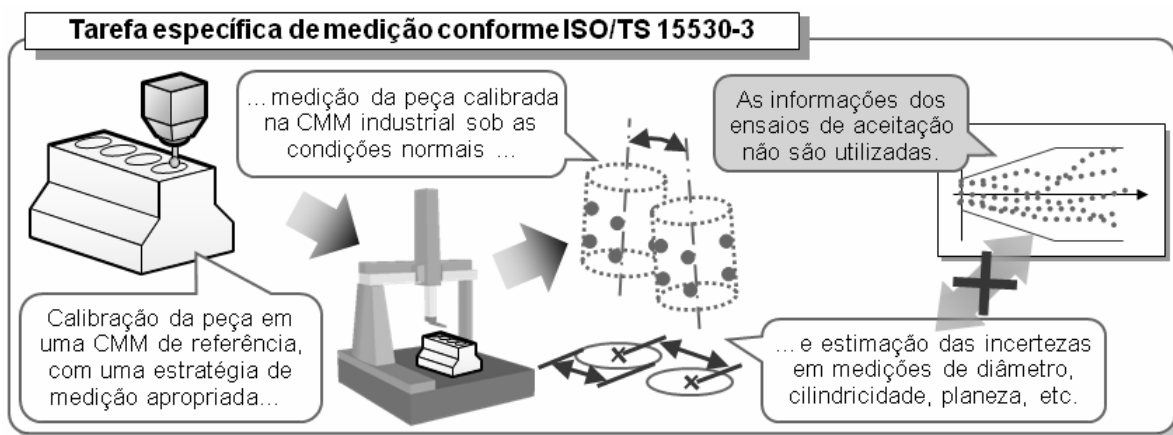


Figura 3.2: Esquema simplificado do procedimento descrito na ISO/TS 15530-3 para avaliar a incerteza de medição usando peças de produção calibradas (adaptada de [29]).

Por outro lado, como é característico de qualquer abordagem tipo caixa-preta, a validade de uma estimativa da incerteza pela técnica descrita na ISO/TS 15530-3 depende enormemente da qualidade das informações de entrada. Em especial, os seguintes pré-requisitos precisam ser atendidos:

- que a(s) peça(s) calibrada(s) seja(m) representativa(s) daquelas esperadas nas medições na rotina e dimensionalmente estável(is);

- que as incertezas dos valores de referência das características dimensionais ou geométricas da(s) peça(s) calibrada(s) sejam suficientemente pequenas;
- que todos os possíveis cenários ambientais e operacionais estejam atuantes durante a execução do procedimento experimental.

Como qualquer divergência entre as peças pode suscitar efeitos significativos, não detectáveis durante a execução do procedimento, como diferentes padrões de erros de forma e coeficientes de expansão térmica, parece não ser difícil violar a primeira condição. As outras duas condições também são críticas, uma intimamente ligada ao custo e à própria realização da calibração, e a outra relacionada ao tempo de execução do experimento. Embora esta última condição seja uma particularidade de qualquer técnica experimental, sendo assim de difícil tratamento, as outras duas condições podem ser suficientemente controladas, como será demonstrado nos capítulos subsequentes deste documento.

3.2.2 A calibração das peças de referência

Em função da complexidade dos mensurandos envolvidos em medições por coordenadas, pode-se declarar que medições da mesma natureza são também necessárias para a calibração do artefato. Uma das técnicas difundidas para avaliar a incerteza na calibração de peças de produção baseia-se em experimentos virtuais, conforme descrito na seção seguinte. Uma outra possibilidade compreende o uso de técnicas baseadas em múltiplas estratégias de medição, de acordo com o procedimento definido nas versões pré-publicação da ISO/TS 15530-2 [11].

Apesar da aparente semelhança com as técnicas de rebatimento/inversão, pois o valor do mensurando é também estimado a partir da média das medições executadas em múltiplas orientações do artefato (de fato, variam-se duas condições de medição: distribuição dos pontos e orientação do artefato); não se espera que os erros geométricos da CMM atuem de forma invertida nas medições do artefato em diferentes orientações/posições, o que possibilitaria a virtual eliminação dos efeitos sistemáticos do equipamento, mas apenas que os erros atuem de forma independente.

Como consequência direta dessa propriedade do método, tem-se observado, na prática, uma superestimação da incerteza, uma vez que alguns dos componentes de in-

certeza são normalmente contados duplamente [92-93]. O procedimento definido na ISO/TS 15530-2 ainda porta alguns outros inconvenientes relacionados à sua aplicação propriamente dita, como a medição do artefato em diferentes orientações, algo nem sempre possível na prática (e.g., pela necessidade de dispositivos de fixação especiais, diferentes configurações de pontas), e o próprio tempo de medição. Entretanto, para máquinas de medição por coordenadas de referência, usualmente é possível realizar uma avaliação do tipo B para alguns componentes de incerteza não detectados em virtude de alguma simplificação da técnica, sem prejuízo significativo para a credibilidade e rastreabilidade do resultado da medição.

3.3 Categoria “simulação computacional”

Muitas são as referências que descrevem e defendem o uso de métodos numéricos para avaliar a incerteza em medições com máquinas de medição por coordenadas, sendo inclusive apontada como uma alternativa elegante para tratar o problema [76]. Isso porque, em tese, através da simulação computacional, pode-se fugir de atividades tediosas, como calcular os coeficientes de sensibilidade para cada tarefa específica de medição, aspecto inerente à categoria análise de sensibilidade, e de situações exóticas, como a necessidade de uma dependência para o armazenamento de peças calibradas, algo supostamente vinculado aos métodos experimentais [81].

Sob os mais diferenciados rótulos, tais como: *Máquina Virtual de Medição por Coordenadas* (VCMM) [94], *Simulação por Restrições* [95], *Máquina Especialista de Medição por Coordenadas* [96], *Instrumento Virtual* [97], ou simplesmente, *Simulação Monte Carlo* [98]; mas conservando o mesmo princípio fundamental, i.e., modelagem matemática do processo de medição e posterior propagação das distribuições para determinar um intervalo de abrangência contendo a grandeza de saída, várias são as soluções presentes na literatura. As subseções seguintes dão ênfase às duas soluções mais difundidas: simulação por restrições e máquina virtual de medição por coordenadas (VCMM).

3.3.1 Simulação por restrições: base do software PUNDIT/CMM

Concebido por pesquisadores do NIST, o método de simulação por restrições parte

do princípio de que as incertezas associadas aos erros paramétricos de uma CMM podem ser razoavelmente estimadas, mesmo sem uma completa descrição de cada erro individual, sempre que medições suficientes sejam consideradas para confinar uma população de possíveis estados paramétricos da CMM. Assim, poder-se-ia interpretar que os resultados dos ensaios de aceitação de uma CMM, portadores de informações incompletas e não detalhadas sobre o comportamento geométrico do equipamento, constituíssem as chamadas medições suficientes.

Contudo, os resultados de uma avaliação da máquina de medição por coordenadas conforme os ensaios da ISO 10360-2 não são suficientes para limitar os possíveis estados paramétricos da máquina. De fato, a implementação do método de simulação por restrições considera, exclusivamente, alguns dos testes definidos na norma ASME B89.4.1, i.e.: repetitividade de apalpação, exatidão de posicionamento linear, desempenho volumétrico, desempenho com ponta indexada; sendo necessário ainda que algumas ponderações sejam feitas [95]:

- que os erros de retitude dependam apenas dos erros de rotação relacionados, para compensar a baixa sensibilidade dos ensaios da ASME B89.4.1 aos erros de retitude das guias da CMM;
- que os termos não-lineares do erro de rolagem em torno do eixo vertical da CMM assumam magnitudes inferiores a do termo linear, visto que os ensaios da ASME B89.4.1 limitam-no apenas.

Para testar a capacidade do método, variados experimentos foram conduzidos pelos seus desenvolvedores, os quais se fundamentaram na comparação das incertezas calculadas pelo método de simulação por restrições com os erros observados em medições de artefatos calibrados em distintas máquinas de medição por coordenadas [99]. Os resultados, apesar de mostrarem que os intervalos definidos pelas incertezas contêm os erros observados, evidenciam também ser muito freqüente, com base somente nos ensaios da ASME B89.4.1 e nas considerações acima, que estimativas de incerteza conservativas em demasia sejam geradas pelo método, como relatado por Phillips et al. [95].

Atualmente o método de simulação por restrições integra o aplicativo denominado PUNDIT/CMM (trata-se de um produto comercial autônomo, que opera sem dependência alguma do software da CMM), desenvolvido e comercializado pela empresa

norte-americana MetroSage LLC. Ao aplicativo são incorporados ainda:

- modelos de erros para apalpadores de medição tipo piezelétrico e comutador, nas configurações ponta simples, múltiplas pontas e ponta articulada, que são supridos com informações de alguns ensaios descritos em normas;
- formas de representação de peças com elementos geométricos imperfeitos, por meio de modelos puramente analíticos ou com base em dados provenientes de uma medição com alta densidade de pontos do elemento real;
- diversos cenários para descrever os efeitos da temperatura, e.g., compensação parcial ou total da temperatura pelo software da CMM, presença de transientes de temperatura na peça no decurso da medição, etc.

Infelizmente, as poucas publicações sobre o software não trazem informações muito detalhadas sobre grande parte dos modelos matemáticos utilizados para representar o processo de medição. A única exceção diz respeito à modelagem dos erros de forma em elementos cilíndricos, que, por ser um fator que pode, junto com a estratégia de medição (e avaliação) escolhida, contribuir significativamente para a incerteza, será brevemente descrita nos parágrafos seguintes.

A modelagem de um elemento cilíndrico imperfeito parte da idéia de que um cilindro obtido por um processo de fabricação aproxima-se de, mas não é exatamente igual a, um cilindro perfeito. Pode-se assumir então que um cilindro imperfeito pode ser representado por um cilindro perfeito acrescido de pequenas (relativamente falando) correções no raio, as quais dependem da posição na superfície do cilindro, i.e., no caso de um sistema de coordenadas cilíndricas, ao longo do eixo, z , e do ângulo polar, θ . Considerando-se ainda que os desvios da superfície ideal de um cilindro possam ser descritos através da combinação linear de funções elementares $f_i(\theta, z)$, a função de correção resulta de $a_1f_1(\theta, z) + a_2f_2(\theta, z) + a_3f_3(\theta, z) + \dots + a_nf_n(\theta, z)$, sendo a_i os pesos atribuídos a cada função elementar.

Dois são os tipos de funções elementares implementadas no PUNDIT/CMM: uma puramente analítica, com dependências angulares modeladas por séries de Fourier e dependências axiais, por polinômios de Chebyshev de segunda espécie; e a outra,

envolvendo autoformas (do termo original, em inglês, *eigenshapes*), provenientes da análise de componentes principais (PCA)⁸ dos resultados de medições do elemento real com alta densidade de pontos. Cada tipo de função elementar possui uma aplicação específica. Caso o usuário conheça de antemão o formato experimentado por um cilindro real, e considerando ainda que variações abruptas não estejam presentes, os parâmetros que descrevem o modelo analítico podem ser geralmente definidos. Caso contrário, ou seja, na presença de descontinuidades ou de formatos particularmente complexos, autoformas tornam-se uma alternativa convidativa e eficiente para representar os erros de forma. Mais detalhes sobre essa modelagem para elementos cilíndricos imperfeitos e suas aplicações podem ser encontradas em Henke et al. [47] e Summerhays et al. [51].

A partir dos parâmetros informados pelo usuário, que incluem também a definição da estratégia de amostragem dos diferentes elementos geométricos da peça, o software executa vários ciclos de medições virtuais do modelo CAD da peça, adicionando aos pontos nominais medidos perturbações consistentes com o cenário criado. Os parâmetros GD&T de interesse são avaliados em cada ciclo de medição virtual e, a partir da média e da dispersão dos valores de cada parâmetro avaliado, no transcorrer dos vários ciclos de medição, o software computa a incerteza das correspondentes tarefas de medição.

Ancorado no princípio de que incertezas podem ser razoavelmente avaliadas mesmo sem uma completa análise dos elementos que compõem um determinado processo de medição por coordenadas, o que necessariamente implica menor custo e esforço despendido pelo usuário, o PUNDIT/CMM porta consigo algo apreciado pelos metrologistas industriais. Entretanto, a superestimação da incerteza tem despontado como efeito negativo do princípio adotado, algo que pode não ser conveniente, por exemplo, no caso da avaliação da incerteza de tarefas de medição envolvendo características críticas.

Por ser uma norma nacional e por estabelecer muitos ensaios, poucos são os fabricantes que especificam os erros de suas máquinas de acordo com a ASME B89.4.1. É comum ainda que, quando as especificam, sejam informados e verificados, nos

⁸ Principal Component Analysis (Análise de Componentes Principais): procedimento matemático que transforma um número de variáveis possivelmente correlacionadas em um número menor de variáveis independentes (não-correlacionadas), denominadas componentes principais [100].

ensaios de aceitação, apenas os dados concernentes ao ensaio de desempenho volumétrico da CMM [31]. Nessa situação, os usuários do PUNDIT/CMM ficam desprovidos de informações que permitam delimitar os possíveis estados paramétricos da máquina, a menos que partam dos próprios usuários as iniciativas de execução dos ensaios.

Com relação aos modelos para representar elementos cilíndricos imperfeitos, chama a atenção a dificuldade de se representar no modelo analítico imperfeições que não se aproximem, ou que sejam uma combinação dos tipos clássicos de erros de forma⁹, uma vez que a seleção dos parâmetros do modelo torna-se pouco intuitiva, podendo requerer, inclusive, o emprego de algoritmos matemáticos de relativa complexidade para derivá-los a partir de medições reais do elemento. No caso do modelo baseado em medições com alta densidade de pontos, para que não sejam classificados como imperfeições da peça erros provenientes, p.ex., da geometria da máquina e do padrão de lóbulos do apalpador, e para que os dados não sejam deturpados pela filtragem mecânica, é necessário que uma máquina de referência seja usada¹⁰.

3.3.2 VCMM: uma solução integrada ao software da CMM

A repetição de experimentos virtuais também constitui a base da VCMM, sem dúvida a solução para avaliar a incerteza em medições com máquinas de medição por coordenadas mais divulgada em congressos e publicações técnicas [31,94,102-110]. Desenvolvido por pesquisadores do departamento de tecnologia de medição por coordenadas do PTB, e atualmente oferecido opcionalmente a usuários dos aplicativos Zeiss Calypso e Leitz Quindos, o conceito foi apresentado em meados de 2003 ao grande público como a panacéia para superar todas as dificuldades até aqui levantadas [111].

O procedimento, contudo, tem sido alvo de críticas as mais diversas, principalmente relacionadas à sua baixa capacidade em lidar com fatores que afetam as medições feitas no ambiente industrial, e que explicam o porquê da sua aplicação reservada a

⁹ Estes são os tipos clássicos de erros de forma para elementos supostamente cilíndricos: cone, barril, ampuheta, banana, boca de sino e lóbulo [101].

¹⁰ Nos casos descritos na literatura, as medições dos elementos cilíndricos foram executadas em uma máquina Moore M48V, com incerteza estimada para a medição de distâncias radiais de 0,6 µm, usando pontas esféricas de 1-2 mm de diâmetro [47].

alguns poucos laboratórios de referência, como os citados em [89-91,112]. Uma vez que as críticas estão intimamente ligadas aos preceitos do método idealizado pelos pesquisadores do PTB, a sua compreensão torna-se indispensável; por conseguinte, constituindo o tema dos parágrafos seguintes desta subseção.

Baseada no método de Monte Carlo, a VCMM adota um modelo geral da medição, em tese, apropriado para todas as máquinas de medição por coordenadas com três eixos cartesianos e equipadas com sensores de medição por contato. Uma vez que o módulo da VCMM opera de forma integrada com software da máquina, ao finalizar a execução de um determinado programa de medição, as coordenadas $\bar{x}_i = (x_i, y_i, z_i)$ dos pontos medidos $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n$, que se afastam das coordenadas dos pontos nominais/verdadeiros $\bar{x}_1^*, \bar{x}_2^*, \dots, \bar{x}_n^*$ por quantidades desconhecidas $\bar{e}(\bar{x}_i)$, são transferidas ao módulo da VCMM¹¹, assim como as direções de apalpação de cada ponto medido $\bar{n}(\bar{x}_1), \bar{n}(\bar{x}_2), \dots, \bar{n}(\bar{x}_n)$.

Através da função dada na equação 3.2, desvios são adicionados a cada ponto medido, resultando assim em vários novos conjuntos de coordenadas virtualmente modificadas, que podem ser entendidos como repetições do programa de medição sob condições consistentes com o cenário definido. Cada novo conjunto de coordenadas é submetido ao próprio software da CMM para calcular os valores das características definidas no programa de medição¹². Do contraste dos resultados obtidos para cada novo conjunto (virtual) de coordenadas com aqueles obtidos pela medição original, a incerteza do resultado da medição de cada característica pode ser determinada.

$$\bar{x}_i = \bar{x}_i^* + \bar{e}_g(\bar{x}_i) + \bar{e}_s(\bar{x}_i) + \bar{e}_p(\bar{x}_i) + \bar{e}_c(\bar{x}_i) + \bar{e}_d(\bar{x}_i) + \bar{e}_w(\bar{x}_i) \quad (3.2)$$

O modelo matemático da medição definido pela equação acima, conforme denotado pelos subíndices, considera as seguintes grandezas de influência (que são também ilustradas na figura 3.3):

- Geometria da CMM (g: *geometry*): onde figuram os erros paramétricos da CMM, cada um deles representado por um componente sistemático, um componente

¹¹ No caso do software Zeiss Calypso, os pontos medidos são, de fato, passados ao módulo da VCMM [113], ao contrário do software Leitz Quindos, onde são passados os pontos nominais de cada elemento avaliado [114].

¹² A VCMM opera sob a condição de que o software da CMM não introduz quaisquer desvios adicionais durante as avaliações numéricas [115].

sistemático desconhecido independente e outro linearmente dependente da posição e componentes periódicos, e os erros não-paramétricos, cada um deles representado por um componente sistemático e um sistemático desconhecido; p.ex., provocados por imperfeições geométricas das guias e falta de ortogonalidade entre os eixos (inclusive induzidos termicamente).

- Escalas de medição (s: *scale*): que leva em conta imperfeições das escalas de medição, assim como variações da temperatura e dos coeficientes de expansão térmica, influências que são tratadas como incertezas associadas aos erros de posicionamento da CMM.
- Apalpador de medição (p: *probe*): que inclui os erros dependentes da direção de apalpação, rotulados como características base, e vinculados ao princípio de funcionamento do apalpador de medição, que são modelados por meio de uma composição de harmônicas, e a repetitividade da apalpação na direção radial.
- Qualificação das pontas (c: *calibration*): que considera a incerteza da esfera de qualificação e a incerteza associada ao uso de várias pontas de medição, p.ex., configuração estrela.
- Deriva (d: *drift*): que designa a influência da deriva temporal da CMM no curto prazo provocada pela variação de temperatura.
- Peça (w: *workpiece*): que considera basicamente a influência da rugosidade da superfície da peça na medição, pois os efeitos da temperatura sobre a peça são contemplados pelo componente “escalas de medição”.

Mesmo se todas as funções densidade de probabilidade associadas às grandezas de influência mencionadas acima fossem rigorosamente conhecidas, a determinação da incerteza de medição ainda assim poderia não ser apropriada, pois contribuições associadas, por exemplo, à deformação da peça, provocada pela forma de fixação e pelas forças de medição, e aos desvios de forma da peça não são consideradas pelo módulo. Sem contar que o módulo atual da VCMM não dispõe de modelos matemáticos que descrevam estes componentes: sensores de medição que operam por princípios ópticos, sistemas de troca de apalpadores e mesas rotativas; assim como modelos matemáticos para os modos de apalpação analógico e autocentrante.

Embora a resposta às questões acima aparente ser trivial, ou seja, basta que termos

adicionais sejam incorporados ao modelo matemático da medição, a modelagem das influências do modo contínuo de apalpação, por exemplo, é extremamente complexa; resultado de um sistema de causas que inclui elementos como a estrutura mecânica e o sistema de controle de posicionamento da CMM, a rugosidade e a curvatura da superfície do objeto de interesse e os parâmetros da medição [116]. Tornar-se-ia crítico ainda, para o modo contínuo de apalpação (e para sensores baseados em princípios ópticos), o elevado tempo e esforço computacional necessários para gerar diferentes cenários da medição e avaliar repetidas vezes as características de interesse, dada a grande quantidade de pontos que poderiam estar envolvidas numa medição desse tipo.

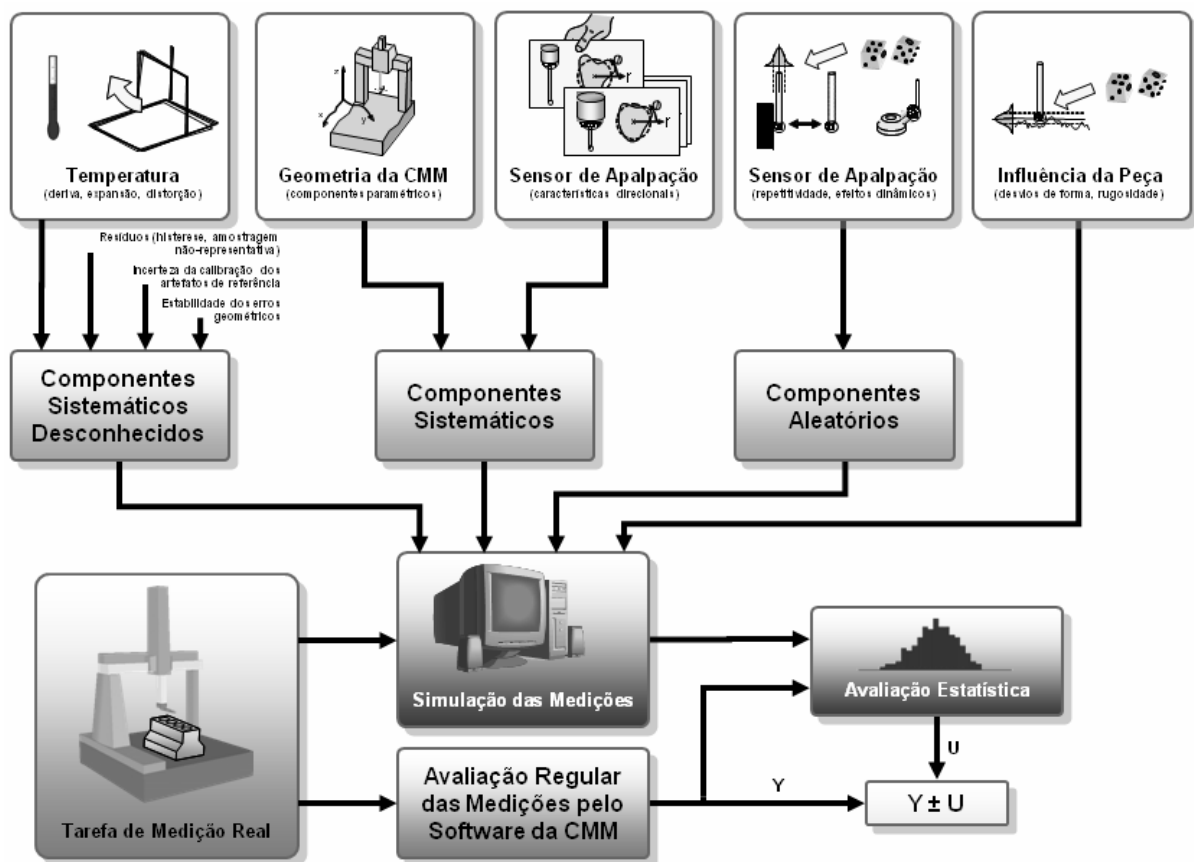


Figura 3.3: Esquema idealizado do conceito da VCMM, dos componentes de incerteza à avaliação estatística das medições virtuais (adaptado de [102]).

O fato de a VCMM não considerar “automaticamente” alguns elementos que fazem parte da rotina das indústrias, no entanto, não tem sido o motivo principal das limitações à aplicação direta do conceito. Os próprios autores do método reconhecem que o maior entrave está na própria definição dos parâmetros de entrada, por meio de procedimentos de relativa complexidade e/ou extremamente específicos [88]. Um exemplo que descreve bem a questão refere-se à estimação dos erros geométricos

da CMM, hoje inteiramente dependente de um detalhado mapeamento do cenário individual máquina-ambiente, através da medição um padrão corporificado (e.g., placa de esferas ou furos) de acordo com um procedimento específico [117-118], como demonstrado na figura 3.4.

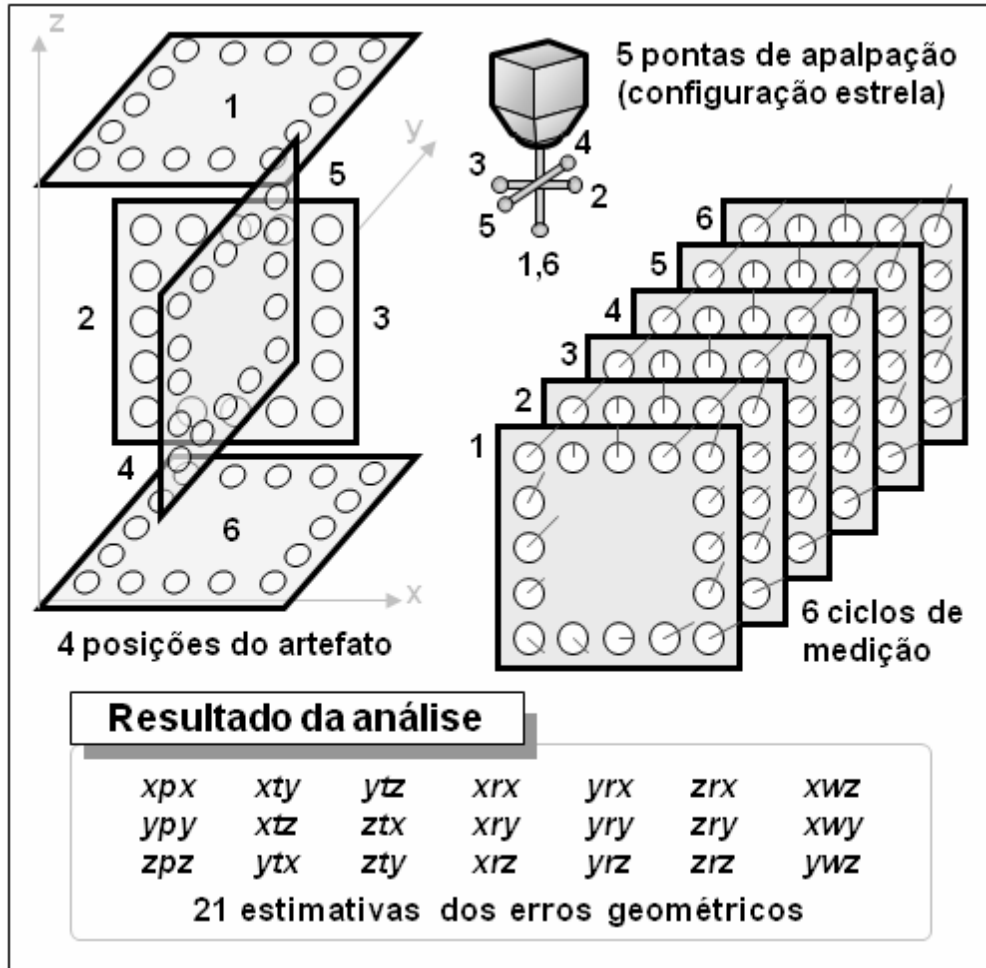


Figura 3.4: Posições necessárias para o padrão de referência bidimensional (placa de esferas ou furos), para possibilitar a análise dos vinte e um componentes de erros geométricos (adaptada de [73]).

Considerando apenas aspectos operacionais e econômicos, torna-se praticamente inviável a adoção do procedimento pelo metrologista industrial. Somam-se ainda aspectos técnicos, como a impossibilidade de se garantir gradientes de temperatura inferiores a 0,07 K [94] durante um ciclo de medição da placa, a menos que as máquinas estejam instaladas sob condições de referência. Mesmo que as flutuações de temperatura no curto prazo fossem minimizadas, o que permitiria a avaliação dos erros geométricos pelo procedimento proposto, atenção especial ainda deveria ser dada aos efeitos da temperatura no longo prazo, pois, do contrário, a incerteza posteriormente gerada pela VCMM não contemplaria todos os estados possíveis da medição.

Não sendo a VCMM, em sua concepção atual¹³, uma solução atraente para a metrologia industrial, tem-se promovido a sua inclusão no meio industrial de forma indireta, como mostrado na figura 3.5. Sob a égide do DKD, laboratórios são acreditados com base na norma ISO/IEC 17025 para calibrar peças prismáticas, sendo a incerteza de cada valor reportado, referente a cada característica GPS de interesse, calculada através de simulações computacionais, como definido na VDI/VDE 2617-7 [119]. As peças de referência podem, então, em tese, ser usadas para avaliar experimentalmente a incerteza associada à medição de cada característica particular, conforme a técnica descrita na ISO/TS 15530-3 (subseção 3.2.1).

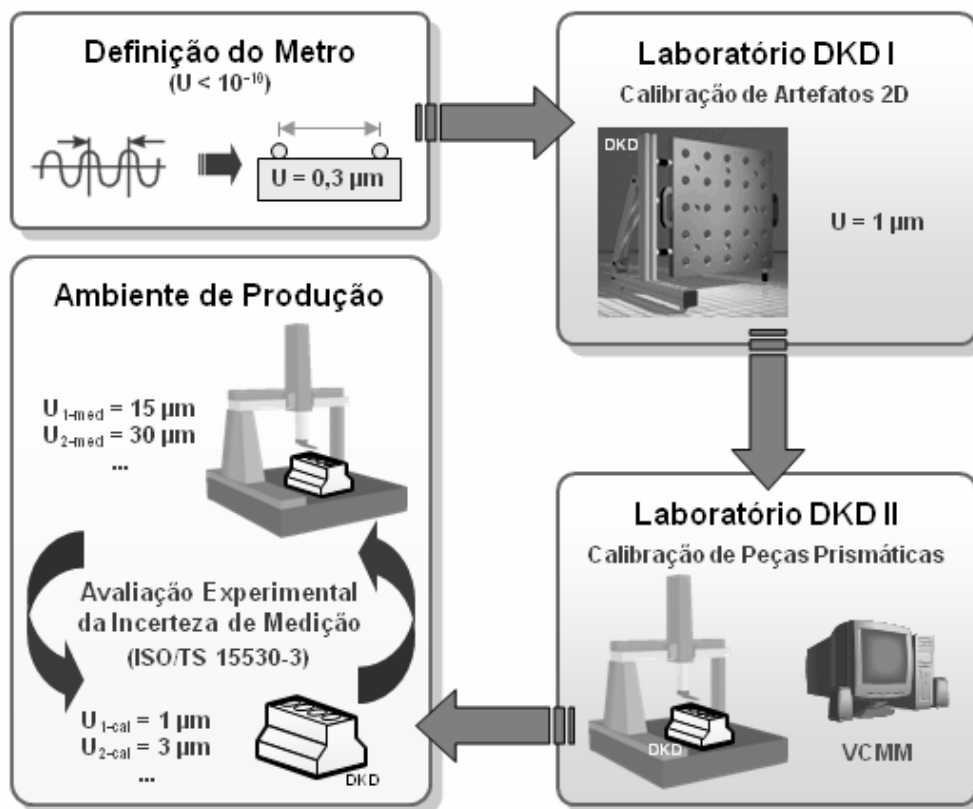


Figura 3.5: Transferência da rastreabilidade em medições por coordenadas, da definição do metro à avaliação experimental da incerteza utilizando peças prismáticas calibradas (adaptada de [109]).

Em adição às potenciais dificuldades do método experimental, listadas na subseção 3.2.1, as quais por si só podem comprometer a realização das etapas finais do fluxo ilustrado na figura 3.5, desponta também o tratamento deficiente proporcionado pela VCMM aos erros de forma da superfície da peça. Primeiro, porque somente um valor

¹³ O projeto VCMM II, iniciado em 2005, que envolve o PTB e os fabricantes de máquinas de medição por coordenadas Carl Zeiss IMT GmbH, Hexagon Metrology GmbH e Mitutoyo Corporation, objetiva otimizar a VCMM e estender seu campo de aplicação.

pode ser definido para a rugosidade, que é aplicado durante a simulação a todos os pontos medidos, i.e., assume-se que todos os elementos geométricos da peça apresentam a mesma rugosidade; segundo, porque as incertezas estimadas referem-se exatamente a um padrão específico de pontos de medição, tomados como referência. Assim, a filtragem mecânica ocasionada pela esfera de apalpação e as ondulações das superfícies da peça não são diretamente consideradas pelo módulo da VCMM [120].

Caso as peças fossem livres de imperfeições superficiais relevantes, tudo o que foi comentado no parágrafo anterior poderia ser olvidado. Contudo, na prática, erros de forma não desprezíveis estão normalmente presentes, os quais, combinados com amostragens pouco representativas, implicam uma realização imperfeita da definição do mensurando¹⁴. Para tanto, tem-se recomendado que os certificados de calibração das peças prismáticas declarem não apenas os valores encontrados para cada característica GPS e suas respectivas incertezas, mas também a exata posição dos pontos amostrados [108]. Em outras palavras, os valores especificados referem-se a um mensurando definido para aqueles pontos apenas.

O usuário final, por sua vez, quando for medir a peça de referência em sua máquina, precisa amostrar exatamente os mesmos pontos considerados durante a calibração da peça, e ainda adicionar, como mínimo, uma contribuição associada aos desvios de forma da peça, como expressado na equação 3.1. Do contrário, a rastreabilidade do resultado da medição fica comprometida, pois a incerteza obtida desconsidera alguns efeitos significativos, sem contar que se tornam questionáveis quaisquer decisões tomadas, por exemplo, no contexto da norma ISO 14253-1 (figura 3.1).

3.4 Categoria “parecer de um especialista”

Dentro desta categoria, por sinal, bastante polêmica, em virtude da dificuldade em se demonstrar a validade do valor de incerteza estimado [65,121], pode-se dar especial destaque à seguinte idéia, esboçada por Trapet et al. [103] há cerca de uma década: usar um sistema especialista para determinar a incerteza associada a uma nova ta-

¹⁴ Mensurandos em medições GPS são as próprias características GPS (muitas vezes) definidas nos desenhos técnicos [9], as quais normalmente se referem à superfície completa de cada elemento geométrico.

refa de medição, como a média ponderada de incertezas previamente avaliadas para tarefas de medição similares, armazenadas em uma base de dados. Uma das experiências mais relevantes nesse contexto é reportada por Hansen [122-123] e sintetizada abaixo.

Dentro do sistema especialista proposto por Hansen, a base de dados desponta como o elemento central. Cada registro da base de dados contém informações sobre uma tarefa de medição específica, incluindo dados sobre a CMM, apalpador de medição, ambiente, característica de interesse; e a respectiva incerteza de medição determinada pelo método por substituição ou pelo método paramétrico, i.e., VCMM. Por meio de um mecanismo de comparação, os registros mais relevantes na base de dados para a medição de interesse são utilizados para calcular a incerteza desconhecida, que resulta da média ponderada das incertezas recuperadas, onde os pesos (denominados coeficientes de correlação) são obtidos a partir da contrastação dos registros recuperados com as informações a respeito do processo de medição sob análise.

Embora a lógica do sistema seja, até certo ponto, trivial, o mesmo não se pode dizer com relação à sua implementação. Caracterizar de forma suficientemente adequada qualquer medição mais ou menos complexa em uma máquina de medição por coordenadas, por exemplo: a posição do eixo de um furo com respeito a um sistema de referência formado por três planos; requereria um grande número de parâmetros que, mesmo que fossem definidos, dificilmente encontrariam similaridade em algum registro na base de dados que não fosse a própria medição em questão, sem contar que seria extremamente complexo, quiçá impossível, determinar os coeficientes de correlação, os quais poderiam assumir valores de qualidade, no mínimo, duvidosa.

As dificuldades mencionadas acima são inclusive reconhecidas pelo próprio Hansen, que limitou a verificação do sistema desenvolvido às simples tarefas de medição de comprimento, realizadas em máquinas de medição por coordenadas de alta exatidão (instaladas em laboratórios de referência). Mesmo para casos tão particulares, onde os próprios coeficientes de correlação entre os distintos cenários de medição podem ser quantificados com relativa facilidade, os resultados não foram muito animadores, em função da baixa exatidão das estimativas de incerteza extrapoladas pelo método (normalmente incertezas significativamente inferiores àquelas obtidas pelos métodos de referência).

CAPÍTULO 4

DETALHAMENTO DOS ELEMENTOS CONSTITUINTES DO MODELO DE INTEGRAÇÃO DA INCERTEZA

Algo comum a qualquer uma das quatro categorias apresentadas ao longo do capítulo anterior diz respeito à necessidade ou observância de algum modelo matemático que represente o processo de medição, do qual se pode determinar, de forma analítica ou numérica, a incerteza de medição. Convém, portanto, fazer referência ao seguinte aforismo, atribuído a Box & Draper [124]:

“Remember that all models are wrong; the practical question is how wrong do they have to be to not be useful.”

uma vez que ao seu conteúdo se pode associar o tema *dimensão diferenciada de aplicação da incerteza de medição*, base do *modelo de integração da incerteza* proposto neste documento.

Sob outra perspectiva, todas as categorias/técnicas discutidas revelam aspectos positivos e negativos para uma aplicação no ambiente industrial. Uma forma elegante de sintetizá-los é por meio de uma matriz de escores, onde se atribuem índices que qualificam o quão bem uma determinada técnica de avaliação da incerteza atende requisitos considerados providenciais para o escopo definido, não limitado às etapas finais do processo de realização do produto e da medição; a saber:

- extensibilidade: denota o fato de serem suportadas as características GPS mais relevantes e as grandezas de influência mais significativas para cada aplicação específica;

- adaptabilidade: simboliza o fato de serem úteis informações de diferentes fontes para compor a incerteza, ou, em outros termos, a perfeita harmonia com o tema *dimensão diferenciada de aplicação da incerteza de medição*;
- autonomia: representa o fato de não haver dependência, por exemplo, de aplicativos dedicados ou modelos CAD da peça, nem de exigir a participação direta de fornecedores de serviços/soluções (e.g., para a execução de procedimentos específicos de mapeamento dos erros);
- transparência: caracteriza o fato de serem identificadas de forma clara e direta as maiores contribuições para o valor da incerteza, a fim de propiciar um maior entendimento e direcionar esforços de melhoria da medição;
- economicidade: reflete o fato de ser exigido um investimento mínimo, sendo inclusive ponderada a capacidade de acesso remoto (especialmente atrativa para empresas de pequeno e médio porte);
- simplicidade (intuitividade): considera o fato de ser simples/direta a avaliação da incerteza, da derivação dos parâmetros de entrada à estimativa da incerteza;
- exatidão: exprime o fato de a estimativa da incerteza estar potencialmente próxima de uma hipotética incerteza verdadeira; cabe salientar que esta propriedade está intimamente relacionada à propriedade adaptabilidade.

Como consequência do campo de aplicação vinculado indissolavelmente ao ambiente laboratorial, a matriz de escores apresentada na tabela 4.1 não inclui as seguintes soluções: VCMM, que inclusive depende fortemente de iniciativas dos fabricantes de máquinas, e sistemas especialistas¹⁵; e da natural superposição das contribuições feitas por Salsbury e Hernla (vide subseções 3.1.1 e 3.1.2), estas são enquadradas em uma técnica genérica, denominada GUM convencional. Da interpretação da matriz de escores, fica evidente que aplicativos como o PUNDIT/CMM, de configuração fechada, não se mostram muito atraentes nos seguintes quesitos: adaptabilidade, autonomia e transparência; embora atendam razoavelmente as outras propriedades.

¹⁵ O apêndice A reporta alguns dos resultados mais expressivos de uma intercomparação de máquinas de medição por coordenadas de uso industrial, realizada no escopo deste projeto de tese. Dos resultados, pode-se estimar a dificuldade, quiçá impossibilidade, em se construir um sistema especialista capaz de auxiliar a determinação das incertezas em casos tipicamente observados na prática industrial.

As maiores virtudes das técnicas baseadas em experimentos com peças calibradas, considerando que a calibração da peça seja atribuída a terceiros, dizem respeito à exatidão e extensibilidade, pois a partir de um experimento bem planejado podem ser consideradas as contribuições mais significativas para a incerteza de medição, e à simplicidade operacional. Entretanto, o método deixa a desejar em termos de custo e versatilidade, dado o requisito por peças calibradas, e de transparência, por se tratar de uma abordagem tipo caixa-preta.

Tabela 4.1: Matriz de escores relacionando as propriedades desejáveis em uma solução voltada ao meio industrial a algumas das técnicas de avaliação existentes. Código de referência: ☺ (atende plenamente); ☹ (atende razoavelmente); 😐 (questionável).

		Categoria (Técnica)		
		Análise de Sensibilidade (GUM Convencional)	Método Experimental (ISO/TS 15530-3)	Simulação Computacional (PUNDIT/CMM)
Propriedade Desejável	Extensibilidade	☹	☺	☹
	Adaptabilidade	☺	☹	☹
	Autonomia	☺	☹	☹
	Transparência	☺	☹	☹
	Economicidade	☹	☹	☹
	Simplicidade	☹	☺	☹
	Exatidão	☹	☺	☹

Por seu turno, as iniciativas embasadas no GUM convencional pecam em questões como a simplicidade e a exatidão da estimativa da incerteza; esta, por não ser trivial computar as derivadas parciais e considerar a correlação entre as grandezas de entrada; aquela, em virtude da própria natureza do método: laboriosa. Entretanto, elas mostram-se potencialmente capazes de atender os demais quesitos; subentende-se, portanto, que tem ocorrido uma subutilização do conceito.

Em outras palavras, pode-se inferir que, apesar das qualidades claramente antagônicas, as técnicas analítica e puramente experimental complementam-se dentro do

contexto *dimensão diferenciada de aplicação da incerteza de medição*. Justifica-se, a partir dessa constatação, a configuração proposta para o *modelo de integração da incerteza* (de medição), brevemente apresentada ao longo da seção 1.2, e detalhada na seção seguinte.

4.1 Forma de atuação do modelo de integração da incerteza

Da seção 1.2 pode-se recuperar a essência do *modelo de integração da incerteza* de medição, que consiste no uso combinado e racional de diferentes técnicas de avaliação da incerteza, e não de uma única técnica, tendo como critério de seleção a exatidão requerida à estimativa da incerteza. Em virtude do quadro exposto na seção anterior, foram considerados na constituição o *modelo de integração da incerteza* os métodos baseados na lei de propagação da incerteza e no uso de peças calibradas.

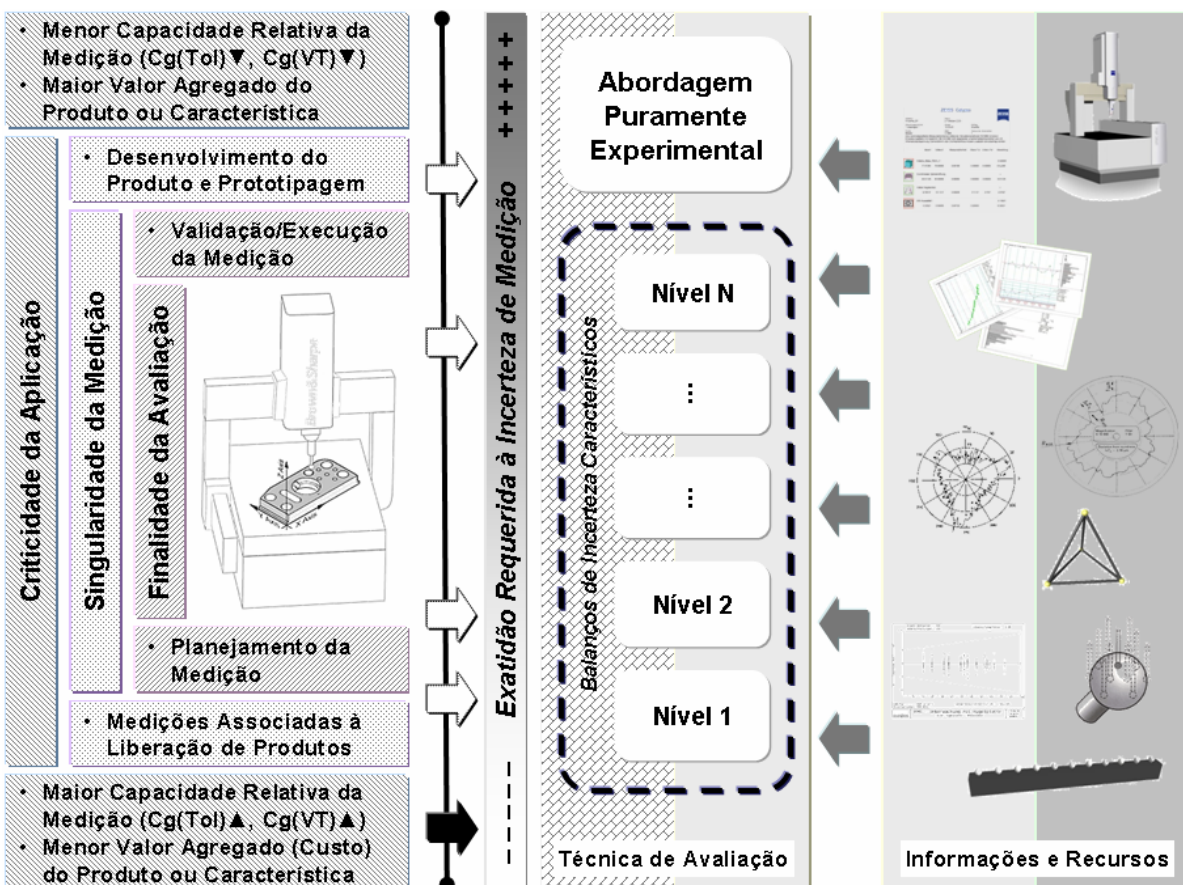


Figura 4.1: Forma de atuação do modelo de integração da incerteza: o nível de exatidão requerido à incerteza dita a escolha da técnica de avaliação e as informações e recursos necessários.

O *modelo de integração da incerteza* tem sua forma macro de operação esboçada na figura 4.1. Dentro dele, a primeira responsabilidade do metrologista industrial refere-se à definição (e caracterização) da tarefa específica de medição. Isso implica definir a criticidade da aplicação, a singularidade da medição e a finalidade da avaliação. Tendo sido caracterizada a tarefa de medição, pode-se ponderar sobre o nível de exatidão requerido à incerteza de medição, e derivar a técnica de avaliação mais adequada e as informações e recursos necessários. Medições críticas, em princípio, exigem análises com peças de referência calibradas (por natureza, específicas). Aos *balanços de incerteza característicos* podem-se vincular diferentes níveis de informação e investimento, que podem assumir, mas não se limitar, em absoluto, ao seguinte arranjo:

- Nível primário de conhecimento: suficiente para muitas análises preliminares de um processo de medição, v.g., durante a seleção de um equipamento de medição, análise de uma estratégia de medição, e para medições não-críticas, refere-se à disponibilidade de informações genéricas (de investimento mínimo), tais como:
 - erro máximo admissível para medições de comprimento, especificado pelo fabricante do equipamento;
 - repetitividade de posicionamento das pontas de medição (se aplicável), informada pelo fabricante do cabeçote indexador, e.g., [125], e/ou pelo fabricante da CMM, segundo a norma ISO 10360-5 [126];
 - noção sobre o comportamento da temperatura no local de medição, ou simplesmente a verificação dos limites de variação impostos pelo fabricante da CMM;
 - estimativa dos erros de forma dos elementos geométricos da peça, na forma de um conhecimento prévio do processo de fabricação.
- Nível secundário de conhecimento: fundamental em casos onde o nível anterior pode não prover estimativas suficientemente exatas, e refere-se à disponibilidade de informações como as que seguem:
 - estimativa dos erros de escala e esquadro da máquina, e.g., estes pela medição de um padrão de comprimento em duas posições/orientações

cruzadas em cada plano, e aqueles pela medição de um padrão de comprimento alinhado com cada um dos eixos da máquina¹⁶;

- o estimativa da repetitividade do processo de apalpação nas direções de interesse, por meio da medição repetida de um mesmo ponto na superfície de um bloco padrão, conforme método descrito na norma britânica BS 6808 [128];
- o estimativa do efeito combinado da estratégia de medição com os erros de forma do elemento no parâmetro de interesse, por meio da medição de peças reais com a estratégia estipulada (neste caso, a repetitividade do processo de apalpação pode já estar incluída no valor estimado);
- o estimativas dos desvios da temperatura de referência e da diferença de temperatura entre as escalas da máquina e a peça.

Deve-se interpretar a coleção das informações necessárias para avaliar a incerteza também como uma responsabilidade do metrologista industrial, que pode ou não requerer a participação de terceiros (representada na figura 4.1 pelo retângulo escuro, à direita). Um evento típico onde se faz necessário o seu envolvimento envolve a calibração de peças de referência, que, pelos motivos mais diversos, e.g., equipamentos com capacidade marginal de medição, condições laboratoriais deficientes e despreparo das pessoas, normalmente não pode ser executada pelo próprio metrologista industrial.

Surge, por conseguinte, a figura de um laboratório externo e competente, responsável pelo fornecimento do serviço de calibração de peças de produção. A determinação propriamente dita da incerteza pode ser vista como uma ação isolada do metrologista industrial, que elabora os *balanços de incerteza característicos* ou efetua uma análise estatística das medições de uma peça; ou então respaldada por alguma parte competente, denotada na figura 4.1 pelo retângulo com textura tipo tijolo.

Para permitir uma consecução eficaz das atividades supracitadas, por sua vez, são descritas, ao longo das seções seguintes, as estratégias desenvolvidas para contornar as limitações vinculadas aos métodos de avaliação da incerteza selecionados,

¹⁶ É importante ressaltar que artefatos dedicados também poderiam ser usados para o mesmo propósito, v.g., tetraedros, cubos, placa de furos [39,94,127], que trazem como vantagem a praticidade operacional.

conforme apontado na seção anterior. Antes, porém, é interessante destacar dois aspectos: o primeiro refere-se à própria lógica do *modelo de integração da incerteza*, que por orientar o uso de peças de referência calibradas em medições críticas, de alto valor intrínseco apenas, pondera o fator limitante “custo de calibração” (um dos aspectos que poderiam minar a efetividade do modelo de integração); o segundo, à congruência dos *balanços de incerteza característicos* com os propósitos de documentos referenciais como a ISO/TS 15530-5 [13] e a VDI/VDE 2617-11 [129].

4.2 Os balanços de incerteza característicos

Independente de qual seja o método utilizado para avaliar e expressar a incerteza do resultado de uma medição, as primeiras iniciativas relacionam-se necessariamente a uma adequada definição do mensurando e do procedimento de medição. No caso das medições de características geométricas de uma peça, a primeira deve ser entendida como uma atribuição do projetista, expressada através da documentação técnica do produto; e a segunda do metrologista industrial, definida num plano de verificação¹⁷ nos moldes da ISO/TS 17450-1 [130].

Neste ponto, até para ancorar os desenvolvimentos seguintes, é importante que sejam resgatados alguns dos termos definidos na ISO/TS 17450-2 [131], apresentados na seqüência juntamente com algumas considerações feitas por Nielsen [132-134] e Dovmark [135-136]:

- Incerteza da correlação: componente resultante da imperfeita correlação entre a especificação e a função pretendida da peça.
- Incerteza da especificação: componente inerente a uma especificação quando aplicada a um elemento geométrico real, i.e., refere-se à ambigüidade nos requisitos definidos pela especificação ou, nos termos do GUM, à definição incompleta do mensurando.
- Incerteza do método: componente resultante dos desvios existentes entre aqui-

¹⁷ Verificação refere-se à atividade em que o metrologista industrial determina se a superfície real de uma peça está em conformidade com o campo especificado de desvios admissíveis.

lo que está especificado na documentação técnica do produto e aquilo efetivamente implementado para verificá-lo, i.e., refere-se à realização imperfeita da definição do mensurando e não considera fatores como imperfeições físicas do equipamento de medição. Por exemplo, observa-se uma incerteza do método, no caso de um elemento geométrico não perfeitamente circular, quando um diâmetro é avaliado como sendo a distância entre dois pontos diametralmente opostos e a especificação se refere ao diâmetro definido pelo menor círculo circunscrito.

- Incerteza da execução: componente resultante das imperfeições físicas do equipamento de medição e/ou de erros na execução do procedimento de medição predefinido, p.ex., erros de geometria da CMM (inerentes ao equipamento ou induzidos termicamente), efeitos sistemáticos e aleatórios associados ao sistema de apalpação, etc.

No concernente aos *balanços de incerteza característicos*, voltados ao metrologista industrial, apenas os dois últimos componentes de incerteza supramencionados são de interesse, pois os outros dois estão vinculados a decisões do projetista [137]. Por outra parte, visto que diferentes metrologistas/operadores podem produzir planos de verificação diferentes para um mesmo mensurando, os quais podem não refletir o intento do projetista, decidiu-se pela padronização dos planos de verificação.

Para tanto, recorreu-se ao modelo de verificação geométrica definido na ISO/TS 17450-1, do qual pode ser idealizado, para cada mensurando em particular, um *operador perfeito da verificação* (vide anexo A para a definição do termo). Os *balanços de incerteza característicos*, portanto, respondem, em sua essência, pela incerteza da execução somente, pois eles não consideram diretamente a incerteza inerente ao método efetivamente empregado pelo metrologista industrial, a qual precisa ser estimada externamente sempre que significativa.

4.2.1 Domínio preliminar de aplicação

Embora se considere que a metodologia proposta para a concepção dos *balanços de incerteza característicos* possua um escopo de aplicação suficientemente global, para os fins deste documento serão abordadas somente medições de características dimensionais e geométricas em máquinas de medição por coordenadas (do tipo pór-

tico) de uso industrial, operadas no modo discreto de apalpação e sem utilizar recursos como mesas rotativas.

Em função do domínio de aplicação definido, tolerâncias de forma (retitude, planeza, circularidade e cilindridade), perfil (de uma linha e de uma superfície) e batimento circular e total (axial e radial), que idealmente exigem uma amostragem suficientemente densa para uma avaliação consistente, não serão diretamente tratadas neste documento. Entretanto, demonstrar-se-á nos capítulos restantes que a metodologia desenvolvida para a concepção dos *balanços de incerteza característicos* pode ser estendida, com mínimo esforço, a alguns destes últimos casos.

4.2.2 Condições e simplificações

Antes de iniciar a descrição dos *balanços de incerteza característicos*, é importante que estejam transparentes as premissas, de caráter conceitual, sob as quais eles estão fundamentados e que asseguram a validade das estimativas de incerteza:

- a. As estimativas de incerteza geradas pelos *balanços de incerteza característicos* referem-se idealmente ao resultado corrigido de uma medição, embora possam também se referir ao resultado não corrigido, caso sejam contemplados pelos componentes de incerteza os respectivos efeitos sistemáticos conhecidos.
- b. Os dados usados para avaliar os componentes de incerteza, os quais constituem os *balanços de incerteza característicos*, caracterizam de forma apropriada as grandezas de influência. Por exemplo, condiciona-se o uso da especificação de erro máximo admissível (conforme ISO 10360-2) ao seu efetivo atendimento pela CMM sob análise.

Ademais, embora o plano de verificação geométrica adotado defina regras bastante consistentes para a avaliação de características GPS, no contexto dos *balanços de incerteza característicos*, em função de aspectos técnico-operacionais, é importante que sejam enunciadas algumas condições limitantes:

- a. No tocante à estratégia de amostragem, considera-se (e recomenda-se) o uso de uma distribuição (aproximadamente) uniforme dos pontos ao longo/redor da superfície integral de cada elemento geométrico de interesse.

- b. No tocante à operação de associação (ajuste) de um elemento geométrico ideal aos pontos amostrados, adota-se como critério padrão o método (de ajuste) por mínimos quadrados, justificado pelas seguintes constatações:
- i. o método dos mínimos quadrados é o critério de ajuste mais adequado para prover resultados estatisticamente confiáveis quando se emprega uma quantidade limitada de pontos;
 - ii. outros algoritmos de ajuste exigem uma alta densidade de pontos para assegurar resultados estáveis e até mesmo confiáveis e representativos (adquirir muitos pontos no modo discreto é usualmente proibitivo);
 - iii. alguns documentos preliminares (recentes) dos grupos de trabalho do ISO/TC-213 [138-140] têm apresentado diferentes formas de se avaliar tamanho e estabelecer sistemas de referência, considerando inclusive o uso do método dos mínimos quadrados.

Com relação à interação da estratégia de amostragem com os desvios de forma de cada elemento geométrico da peça, contribuição para a incerteza esta difícil de ser caracterizada sem uma investigação experimental bem delineada, condiciona-se a formação dos *balanços de incerteza característicos* aos seguintes aspectos:

- c. Para o critério padrão de ajuste adotado, a menos que o metrologista industrial realize experimentos com peças reais, a interação da estratégia de amostragem com as imperfeições da superfície da peça não é efetivamente considerada nos *balanços de incerteza característicos* (caso poucos pontos sejam medidos). Os efeitos inter-relacionados são avaliados de modo independente, i.e., estimam-se as incertezas padrão associadas aos efeitos puramente aleatórios da apalpação e aos desvios de forma, as quais são então combinadas no sentido GUM.
- d. Os efeitos puramente aleatórios associados ao processo de apalpação afetam, de forma distinta, os parâmetros que descrevem os elementos geométricos ideais obtidos por mínimos quadrados ou por outros critérios (mínima zona e mínimo ou máximo elemento). Uma vez que o método dos mínimos quadrados calcula os parâmetros com base na média dos pontos, o desvio padrão dos parâmetros tende a zero à medida que o número de pontos cresce. O mesmo raciocínio, entretanto, não se aplica aos outros critérios, pois os elementos geométricos ideais são definidos a partir de alguns poucos pontos extremos.

- e. Sempre que um plano de verificação emular integralmente um *operador perfeito da verificação*, p.ex., amostragem de muitos pontos e uso de critérios de ajuste tipo mínimo/máximo elemento (princípio de Taylor), o componente de incerteza associado à interação da estratégia de amostragem com os erros de forma da peça torna-se irrelevante. Subsiste, contudo, a contribuição puramente aleatória do processo de apalpação, que afeta de forma integral os pontos extremos que definem os parâmetros que representam os elementos geométricos substitutos.

Dentro do domínio de aplicação definido, normalmente algumas contribuições para a incerteza não influenciam significativamente a medição (ou podem ser desprezadas caso boas práticas da medição sejam observadas), não sendo, por isso, incluídas na constituição dos *balanços de incerteza característicos*, a saber:

- a. Em aplicações industriais, os erros de escala e esquadro são os mais influentes nas medições com máquinas do tipo pórtico, sendo relativamente irrelevante o efeito dos demais erros de geometria da máquina, i.e., erros de retitude e erros de rotação [39,97,141], os quais não são explicitamente considerados.
- b. Visto que os efeitos sistemáticos do processo de apalpação, em especial aqueles relacionados ao padrão lobular de resposta, podem ser suficientemente atenuados caso atenção especial seja dada à estratégia de qualificação da(s) ponta(s) de medição, ou assumem magnitudes desprezíveis em alguns em sistemas de apalpação modernos, ignoram-se os componentes de incerteza a eles associados.
- c. Quando usando pontas de medição em posições não-verticais, e.g., indexada, assume-se que, no processo de qualificação das pontas de medição, a esfera de qualificação ocupe uma posição vertical similar à altura do elemento geométrico de interesse; desse modo, reduz-se a influência do erro de rolagem do eixo vertical na medição [142].
- d. Efeitos resultantes da não observância de boas práticas da medição, tais como: limpeza da peça e das pontas de medição, estabilização térmica da peça; não são considerados nas análises de incerteza.
- e. Componentes de incerteza associados ao software de medição e avaliação são desprezados na preparação dos *balanços de incerteza característicos*, embora desvios relevantes tenham sido reportados por alguns pesquisadores [143-145].

4.2.3 Os balanços de incerteza característicos sob escrutínio

Dentro do escopo de atuação definido para os *balanços de incerteza característicos*, destacam-se as tolerâncias de posição, que representa a forma de toleranciamento (geométrico) mais utilizada na prática industrial [40], perpendicularidade, paralelismo e os elementos geométricos dimensionáveis. Em função das diversas configurações possíveis para cada tipo de tolerância, optou-se por expor a metodologia concebida na forma de exemplos comumente encontrados na prática industrial. Isso porque se considera ser plausível, i.e., exigir mínimas ponderações, a extensão dos conceitos a outras configurações não diretamente abordadas.

Estes são os exemplos discutidos em detalhes nesta subseção: posição de um eixo com respeito a um sistema de referência e perpendicularidade de um eixo com respeito a um plano de referência. Para o exemplo da característica GPS tipo posição, consideram-se os dois níveis seqüenciais de conhecimento definidos anteriormente, e faz-se ponderações caso outras informações estivessem disponíveis (denominado nível N). Para a tolerância de perpendicularidade, aborda-se apenas o segundo nível de conhecimento. São ainda incluídas reflexões sobre como tratar os casos “paralelismo de um eixo com respeito a um plano de referência” e “diâmetro de um cilindro”.

4.2.3.1 Posição de uma linha com respeito a um sistema referencial

O primeiro exemplo de balanço de incerteza característico refere-se a uma tolerância de posição de uma linha (eixo de um furo cilíndrico) com respeito a um sistema de referência formado por três planos mutuamente ortogonais, como ilustrado na figura 4.2. Neste caso, o eixo do elemento tolerado (i.e., linha mediana extraída) deve estar contido em uma zona de tolerância cilíndrica de diâmetro $t = 2 \text{ mm}$, cujo eixo é fixado pelas cotas básicas – dimensões teoricamente exatas, $|ted_2| = |ted_3| = 85 \text{ mm}$, com respeito aos planos de referência primário, secundário e terciário¹⁸ (figura 4.3).

Um plano de verificação consistente com as regras sugeridas pela ISO/TS 17450-1, em uma CMM, deveria contemplar, de alguma forma, as seguintes operações (vide o anexo A para a definição dos termos específicos, indicados em *itálico*):

¹⁸ Para os fins deste documento, adotou-se a seguinte convenção: (a) plano de referência primário coincide com (define) um plano hipotético XY; (b) plano secundário, com um plano hipotético XZ; (c) plano terciário, com um plano hipotético YZ.

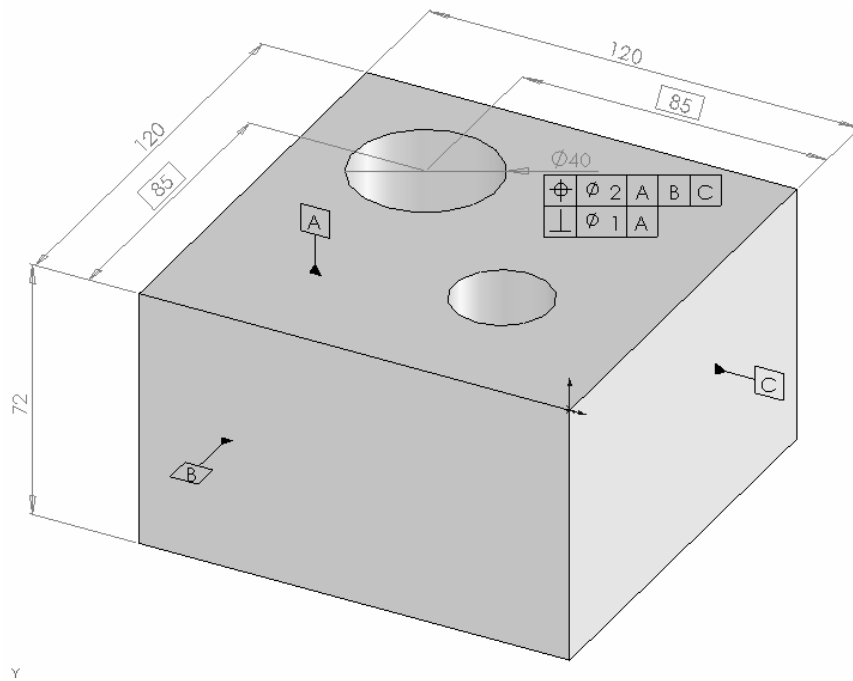


Figura 4.2: Desenho representativo da peça e definição das características geométricas discutidas nos exemplos das subseções 4.2.3.1 e 4.2.3.2.

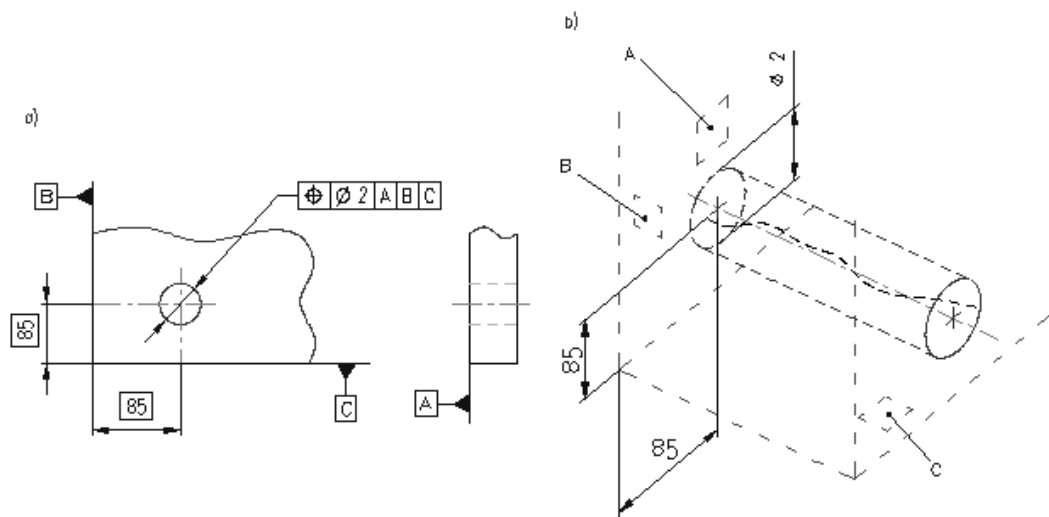


Figura 4.3: Interpretação de uma tolerância de posição de uma linha (eixo de um furo cilíndrico) com respeito a um sistema de referência composto por três planos mutuamente ortogonais: a) vistas frontal e lateral, b) zona de tolerância cilíndrica (adaptada de [40]).

a. Com relação ao elemento tolerado (eixo do furo cilíndrico):

- i. *extração* de um conjunto finito de pontos da superfície cilíndrica não-ideal (na forma de seções circulares);
- ii. *associação* de elementos geométricos ideais a cada seção circular;
- iii. *coleção* de todos os centros dos círculos ideais.

b. Com relação aos planos de referência:

- i. *extração* de um conjunto finito de pontos da superfície plana não-ideal;
 - ii. *associação* de um elemento geométrico ideal do tipo plano.
- c. O eixo da zona cilíndrica de tolerância é obtido a partir da *construção* de um elemento geométrico ideal (linha reta), respeitando as seguintes restrições:
- i. ser perpendicular ao plano primário (A);
 - ii. estar a uma distância $|ted_3| = 85$ mm do plano secundário (B);
 - iii. estar a uma distância $|ted_2| = 85$ mm do plano terciário (C).
- d. A avaliação da tolerância de posição envolve determinar a maior distância entre o centro de cada *elemento geométrico derivado associado* e o eixo (linha reta) construído, que não deve exceder a $t/2$.

Como efeito direto das operações envolvidas na avaliação da tolerância de posição, pode-se desvincular dois macrocomponentes de incerteza: (1) incerteza relacionada à posição do eixo da zona cilíndrica de tolerância e (2) incerteza relacionada à posição do centro de cada seção circular. De uma maneira geral, estes são os fatores de maior influência na medição dos elementos geométricos que constituem a característica GPS e, por conseguinte, a sua avaliação: erros de escala/esquadro (inerentes à CMM ou induzidos pela temperatura), efeitos aleatórios do sistema de apalpação e desvios de forma dos elementos geométricos da peça.

a) Nível 1: conhecimento elementar do processo de medição

Tendo sido apresentado o plano de verificação padrão e as grandezas de influência potencialmente mais relevantes, resta, para a avaliação da incerteza, amoldá-los ao nível de conhecimento correspondente, definido no início do capítulo. Para conferir um contexto à situação, supõe-se que a seleção de uma CMM por uma empresa baseie-se na capacidade potencial do processo de medição em avaliar a tolerância de posição em questão. Para atender a demanda, pleiteia-se a utilização de uma CMM com a seguinte especificação de erro máximo admissível para a medição de comprimentos:

$$MPE_E = \pm \left(A + \frac{L}{K} \right) = \pm \left(3,9 + \frac{L}{250} \right) \mu\text{m} \quad (4.1)$$

a qual pode ser realizada, segundo o fabricante, a partir da observância das seguintes condições [147]: (a) recurso de correção em tempo real dos erros induzidos termicamente na máquina e na peça, ativo; (b) temperatura nas imediações da máquina, i.e., temperaturas das escalas de medição e da própria peça, dentro do intervalo 16 °C a 26 °C; (c) gradientes espaciais de temperatura inferiores a 1 K/m, em ambas as direções vertical e horizontal, e temporais inferiores a 1 K/h e 5 K/d.

Com base somente nos números acima, contudo, pouco se pode dizer a respeito da capacidade potencial do processo de medição para o propósito definido. Sob a hipótese de cumprimento dos requisitos impostos pelo fabricante da máquina, é preciso ainda levar em conta fatores como a estratégia de amostragem e os desvios de forma dos elementos geométricos da peça, assim como as relações entre as diferentes contribuições para a incerteza.

Para os fins do exemplo, conjectura-se que o metrologista industrial planeje, para o referenciamento da peça, medir os pontos de referência (i.e., referenciamento 3-2-1), supostamente com desvios de forma desprezíveis frente à repetitividade do processo de apalpação, e as seções circulares do elemento geométrico tolerado com trinta pontos cada e, então, aplicar o método dos mínimos quadrados para computar as coordenadas dos centros de cada seção circular. A princípio, considera-se que todos os elementos da peça possam ser medidos sem indexar a ponta de medição. A avaliação propriamente dita da incerteza dá-se como segue.

Incerteza da posição do eixo da zona cilíndrica de tolerância

A posição da zona cilíndrica de tolerância pode ser basicamente afetada pelos erros de escala/esquadro da máquina e pelos efeitos aleatórios do apalpador. As respectivas incertezas padrão podem ser estimadas a partir das constantes da equação 4.1; as associadas aos efeitos aleatórios por uma fração da constante A , e as associadas aos efeitos sistemáticos pela fração restante desta e pela parcela L/K ¹⁹. Os coeficientes de sensibilidade e a incerteza da posição do eixo da zona cilíndrica de tolerância podem ser estimados seguindo o procedimento delineado na seqüência, sendo os parâmetros necessários para tanto sintetizados na tabela 4.2.

¹⁹ A justificativa ao uso de uma parcela da constante A para estimar os efeitos aleatórios do apalpador, está no fato de o valor conter também efeitos sistemáticos desconhecidos, v.g., histerese e pré-deslocamento [148].

Como durante a medição da característica de posição a máquina se desloca nas três direções no sistema de coordenadas definido pelo referenciamento correspondente, um vetor de erro no espaço tridimensional é gerado, embora sejam relevantes para os propósitos da avaliação apenas os dois componentes paralelos aos vetores normais dos planos de referência secundário e terciário. As incertezas padrão podem ser aproximadas da seguinte forma, considerando uma distribuição de probabilidade retangular para os possíveis erros de medição²⁰:

Tabela 4.2: Parâmetros necessários para estimar a incerteza da característica posição, com os respectivos valores para os fins do exemplo.

Parâmetro	Símbolo	Valor
<i>Especificação da Máquina</i>		
constante A (conforme equação 4.1)	A	3,9 µm
constante K (conforme equação 4.1)	K	250
<i>Amostragem do Plano Primário (plano)</i>		
comprimento na direção x (2)	l_{12}	110,0 mm
comprimento na direção y (3)	l_{13}	110,0 mm
número de pontos amostrados	n_1	3
<i>Amostragem do Plano Secundário (linha)</i>		
distância entre os pontos extremos da linha	l_{22}	110,0 mm
distância do centróide à origem em x (2)	do_{22}	-60,0 mm
cota básica na direção x (2)	ted_2	-85,0 mm
número de pontos amostrados	n_2	2
<i>Amostragem do Plano Terciário (ponto)</i>		
distância do ponto à origem em y (3)	do_{33}	115,0 mm
cota básica na direção y (3)	ted_3	85,0 mm
número de repetições	n_3	1
<i>Amostragem do Elemento Tolerado</i>		
altura do furo cilíndrico na direção z (1)	h	-55,0 mm
desvios de forma locais (e.g., rugosidade)	f	0,5 µm
número de pontos por seção circular	n	30

$$u_{en.em.i} = C_{en.em.i} \cdot \frac{\left(\frac{2}{3} \cdot A + \frac{L}{K} \right)}{\sqrt{3}}, \quad i = 2 \text{ e } 3 \quad (4.2)$$

²⁰ No apêndice B são listados todos os índices utilizados nas equações que seguem, junto, com seus respectivos significados.

com

$$L = \sqrt{ted_2^2 + ted_3^2 + h^2}$$

$$c_{en.em.i} = \cos \left[\arcsen \left(\frac{h}{L} \right) \right] \cdot \cos \left[\arcsen \left(\frac{ted_i}{\sqrt{ted_2^2 + ted_3^2}} \right) \right]$$

Dos efeitos aleatórios do apalpador durante a medição de cada plano de referência resulta uma miríade de planos possíveis, com diferentes centróides e inclinações. Na definição do plano primário, por não ser importante a posição do centróide do plano, pois ele provoca um deslocamento na direção perpendicular ao plano primário, apenas o efeito causado pela inclinação do plano precisa ser considerado. Conhecendo-se o desvio padrão dos pontos medidos normais à superfície, a incerteza da inclinação do plano pode ser estimada a partir da seguinte expressão, considerando uma distribuição de probabilidade retangular:

$$u_{en.ea.ip1.i} = c_{en.ea.ip1.i} \cdot \frac{A/3}{\sqrt{3}}, \quad i = 2 \text{ e } 3 \quad (4.3)$$

onde

$$c_{en.ea.ip1.i} = \frac{\sqrt{\frac{8}{n_1}}}{l_{1i}}$$

é um fator que relaciona o desvio padrão do parâmetro inclinação do plano com o desvio padrão dos pontos individuais (informações sobre a derivação desse e de outros fatores estão contidas no apêndice C). O efeito resultante das incertezas na posição do eixo da zona cilíndrica de tolerância pode ser determinado pela equação 4.4, pois a variação na origem do sistema de referência é de segunda ordem, e por isso, não considerada.

$$u_{en.ea.pe.i} = h \cdot u_{en.ea.ip1.i}, \quad i = 2 \text{ e } 3 \quad (4.4)$$

Ao contrário do plano primário, na presença de efeitos aleatórios, a posição do eixo da zona cilíndrica de tolerância depende do centróide e da inclinação dos outros dois planos de referência. Sendo, no exemplo em questão, o plano secundário construído a partir da reta que passa pelos dois pontos medidos e o terciário da interseção da

reta perpendicular ao plano secundário que contém o ponto medido; são parâmetros importantes para o problema o desvio padrão do centróide e da inclinação da reta e o desvio padrão do ponto medido, que podem ser estimados a partir das seguintes equações, considerando uma distribuição de probabilidade retangular:

$$u_{\text{en.ea.ip2.3}} = \frac{\sqrt{4/n_2}}{l_{22}} \cdot \frac{A/3}{\sqrt{3}} \quad (4.5)$$

$$u_{\text{en.ea.cp.i}} = \sqrt{\frac{1}{n_j}} \cdot \frac{A/3}{\sqrt{3}}, i \neq j \text{ e } i, j = 2 \text{ e } 3 \quad (4.6)$$

A determinação dos coeficientes de sensibilidade que descrevem como a posição do eixo da zona cilíndrica de tolerância varia com alterações nas grandezas de entrada acima definidas, por sua vez, pode ser feita com o auxílio do esquema da figura 4.4. Na condição ideal, i.e., inexistência de efeitos aleatórios, o mesmo ponto (círculo sem preenchimento) seria sempre alcançado. Na presença de efeitos aleatórios, as posições do centróide da reta ajustada e do ponto medido variam, e assim causam a variação da posição do eixo de tolerância (círculo com preenchimento sólido). As incertezas padrão nas direções paralelas aos vetores normais dos planos de referência secundário e terciário podem ser derivadas a partir da equação 4.6.

Restam, contudo, outros dois efeitos, absolutamente independentes dos anteriores, porém associados a uma mesma fonte: a inclinação da reta ajustada. Sob a influência de efeitos aleatórios, a orientação estabelecida pelo plano secundário pode variar, e provocar assim o deslocamento da origem e a rotação do sistema de coordenadas, como claramente ilustrado na figura 4.4 (retângulo com contorno pontilhado). Uma vez que para pequenas inclinações da reta ajustada se pode adotar a aproximação $\text{sen}(\alpha) = \alpha$, as incertezas padrão relacionadas à mudança da origem nas duas direções relevantes podem ser razoavelmente aproximadas pelas expressões:

$$u_{\text{en.ea.os.i}} = do_{jj} \cdot u_{\text{en.ea.ip2.3}}, i \neq j \text{ e } i, j = 2 \text{ e } 3 \quad (4.7)$$

e aquelas correspondentes à rotação do sistema de coordenadas pelas expressões:

$$u_{\text{en.ea.rs.i}} = ted_j \cdot u_{\text{en.ea.ip2.3}}, i \neq j \text{ e } i, j = 2 \text{ e } 3 \quad (4.8)$$

Uma vez que existe uma correlação significativa entre o deslocamento da origem e a

rotação do sistema de coordenadas, a incerteza final atribuída aos efeitos aleatórios do apalpador apenas, em conjunto com os respectivos planos de amostragem, pode ser razoavelmente aproximada pela equação:

$$u_{\text{en.ea.i}} = \sqrt{(u_{\text{en.ea.pe.i}})^2 + (u_{\text{en.ea.cp.i}})^2 + (u_{\text{en.ea.os.i}} - u_{\text{en.ea.rs.i}})^2}, \quad i = 2 \text{ e } 3 \quad (4.9)$$

e a incerteza da posição do eixo da zona cilíndrica de tolerância calculada a partir da combinação dos componentes referentes aos erros da máquina (equação 4.2) e aos erros aleatórios do apalpador (equação 4.9):

$$u_{\text{en.i}} = \sqrt{(u_{\text{en.em.i}})^2 + (u_{\text{en.ea.i}})^2}, \quad i = 2 \text{ e } 3 \quad (4.10)$$

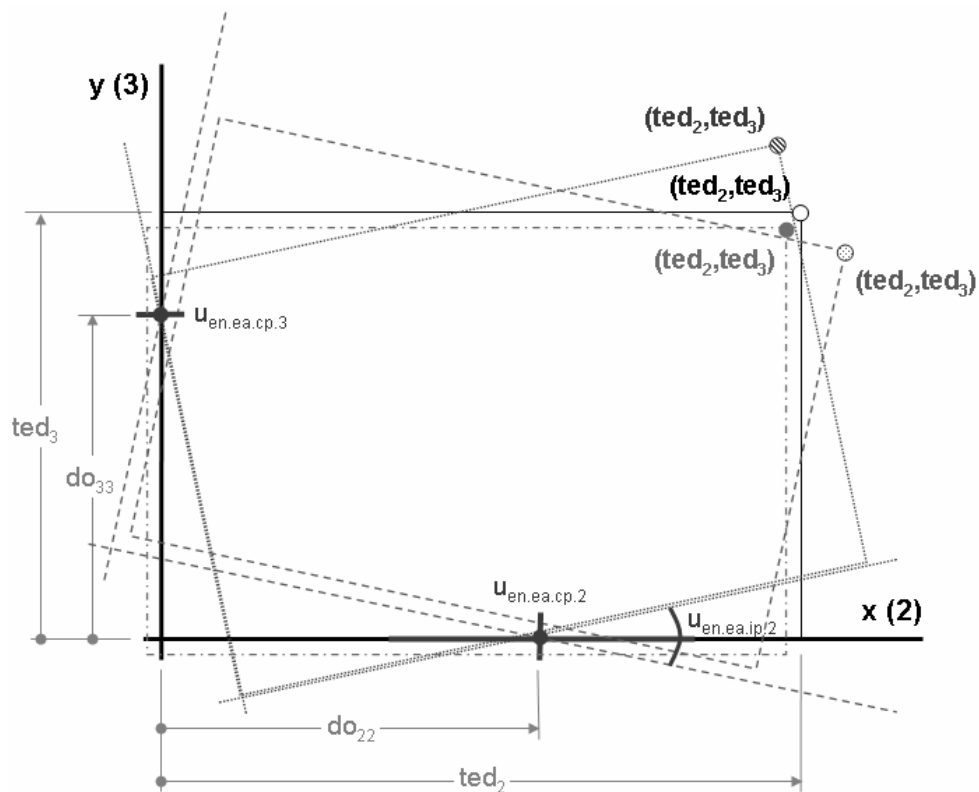


Figura 4.4: Posição do eixo de tolerância na ausência de efeitos aleatórios (círculo sem preenchimento) e na presença deles: somente no centróide da reta ajustada (círculo com preenchimento sólido), somente na inclinação da reta ajustada (círculo com linhas diagonais), e em todas as contribuições (círculo com pontos).

Incerteza da posição do centro de cada seção circular

Neste segundo macrocomponente da incerteza, as contribuições de maior relevância referem-se aos efeitos aleatórios do apalpador e aos desvios locais de forma do elemento geométrico tolerado. Em um nível elementar de informação, onde se espera que o conhecimento a respeito do segundo fator se apresente na forma de limites

máximos²¹, a incerteza padrão correspondente pode ser dada pela equação, considerando uma distribuição de probabilidade retangular de amplitude total f:

$$u_{pc.ef.i} = \frac{f}{\sqrt{12}}, i = 2 \text{ e } 3 \quad (4.11)$$

onde f expressa a magnitude dos desvios de forma do elemento geométrico tolerado (furo cilíndrico).

Com relação ao primeiro fator, i.e., efeitos aleatórios do apalpador, uma alternativa é estimá-los a partir de uma porção (metade) da parcela constante do erro máximo admissível especificado, de acordo com a equação 4.1. Com base nessa estimativa e no número de pontos amostrados por seção circular, pode-se computar a incerteza padrão pela equação seguinte, considerando uma distribuição de probabilidade retangular:

$$u_{pc.ea.i} = \sqrt{\frac{2}{n} \cdot \frac{A/3}{\sqrt{3}}}, i = 2 \text{ ou } 3 \quad (4.12)$$

e obter a incerteza da posição do centro de cada seção a partir da combinação dos dois componentes calculados com base nas equações 4.11 e 4.12:

$$u_{pc.i} = \sqrt{(u_{pc.ef.i})^2 + (u_{pc.ea.i})^2}, i = 2 \text{ e } 3 \quad (4.13)$$

Incerteza resultante

A incerteza total referente à avaliação de uma característica tipo posição, para cada componente no sistema de coordenadas da peça, dentro do contexto estabelecido, resulta da raiz quadrada positiva da soma das variâncias estimadas para os dois macrocomponentes da incerteza, como segue:

$$u_i = \sqrt{(u_{en.i})^2 + (u_{pc.i})^2}, i = 2 \text{ e } 3 \quad (4.14)$$

que pode ser ainda multiplicada por um fator de abrangência, nos preceitos do GUM, caso o propósito seja declarar uma incerteza expandida.

²¹ A estimativa da incerteza associada à posição das coordenadas do centro de cada seção circular poderia resultar de estudos específicos, como os reportados por Weckenmann e Knauer [149].

Como a incerteza padrão estimada pela equação 4.14 caracteriza os vetores de incerteza no sistema de coordenadas da peça, informação esta importante para, v.g., analisar ou realimentar um laço de controle do processo de fabricação, e não o vetor resultante que representa o valor da característica GPS, pode-se gerar uma estimativa razoável da incerteza associada a esse vetor com base equação 4.15, derivada analiticamente, sob a premissa de aleatoriedade e independência dos dois componentes de incerteza.

$$u_d = 2 \cdot \sqrt{u_2^2 + u_3^2} \quad (4.15)$$

b) Nível 2: conhecimento intermediário do processo de medição

Já com a máquina de medição por coordenadas nas instalações da empresa, e dada a criticidade do problema de medição – a mesma característica geométrica analisada no item anterior, o metrologista industrial pode considerar necessário aperfeiçoar aquela avaliação preliminar da incerteza de medição, tendo o leque de informações referentes ao nível secundário de conhecimento, conforme descrito na última seção do capítulo anterior.

As novas informações que compõem o nível secundário de conhecimento estão contidas na tabela 4.3, que complementa ou substitui aquelas explicitadas na tabela 4.2. Os valores indicados para os erros de posicionamento e perpendicularidade referem-se a um fator de correção linear, dependente do comprimento medido. Eles quantificam, portanto, efeitos sistemáticos conhecidos (mas não corrigidos), aos quais estão também associadas incertezas. A repetitividade do apalpador corresponde ao desvio padrão das medições do bloco padrão, e a faixa de variação da posição dos centros, ao desvio padrão resultante em cada coordenada.

Em virtude do novo conjunto de informações, tornam-se indispensáveis algumas modificações na preparação do balanço de incerteza em relação ao nível de conhecimento apresentado no item anterior. No que tange a estimativa do efeito aleatório do processo de apalpação, é preciso substituir o termo $\frac{A/3}{\sqrt{3}}$ pelos desvios padrão nas equações 4.3, 4.5 e 4.6:

$$u_{en.ea.ip1,i} = c_{en.ea.ip,i} \cdot r_1, \quad i = 2 \text{ e } 3 \quad (4.16)$$

$$u_{\text{en.ea.ip2.3}} = \frac{\sqrt{4/n_2}}{l_{22}} \cdot r_3 \quad (4.17)$$

$$u_{\text{en.ea.cp.i}} = \sqrt{\frac{1}{n_j}} \cdot r_i, i \neq j \text{ e } i, j = 2 \text{ e } 3 \quad (4.18)$$

Tabela 4.3: Parâmetros que complementam ou substituem aqueles informados na tabela 4.2, e que retratam o cenário “conhecimento intermediário do processo de medição”; os valores se referem ao exemplo hipotético, e os números entre parênteses às incertezas padrão para os fatores de escala e esquadro.

Parâmetro		Símbolo	Valor
<i>Erros de Geometria</i>			
erros de posicionamento (fatores de escala)	<i>no eixo x</i>	d_{xx}	4,1(0,7) $\mu\text{m/m}$
	<i>no eixo y</i>	d_{yy}	5,0(0,6) $\mu\text{m/m}$
	<i>no eixo z</i>	d_{zz}	1,4(0,6) $\mu\text{m/m}$
erros de perpendicularidade (fatores de esquadro)	<i>entre os eixos x-y</i>	d_{yx}	-12,8(1,2) $\mu\text{m/m}$
	<i>entre os eixos x-z</i>	d_{zx}	-11,6(0,7) $\mu\text{m/m}$
	<i>entre os eixos y-z</i>	d_{zy}	-7,1(0,7) $\mu\text{m/m}$
<i>Erros de Apalpação</i>			
repetitividade do apalpador (1σ)		r_1	0,10 μm
		r_2	0,40 μm
		r_3	0,40 μm
<i>Interação Estratégia-Peça</i>			
faixa de variação da posição dos centros (1σ)		s	0,13 μm

Com referência à medição dos centros das seções circulares do elemento geométrico tolerado, as equações 4.11 e 4.12 são substituídas pela equação abaixo, considerando uma distribuição normal e um nível da confiança de 68,27%:

$$u_{\text{pc.i}} = s, i = 2 \text{ e } 3 \quad (4.19)$$

Estimativa da incerteza associada aos erros geométricos

Resta ainda definir como introduzir as informações relativas aos erros geométricos individuais da máquina na composição da incerteza. Para tanto, pode-se recorrer ao tradicional modelo de corpo rígido²², de onde podem ser recuperadas e adaptadas

²² Como os componentes de retitude e rotação modulam os de perpendicularidade, a simplificação adotada pode ser considerada absolutamente coerente para o escopo dos *balanços de incerteza característicos*.

as seguintes expressões para os erros resultantes em cada coordenada, com respeito ao sistema universal de coordenadas [94]:

$$\begin{aligned} e_x &= x \cdot d_{xx} + y \cdot d_{yx} + z \cdot d_{zx} \\ e_y &= y \cdot d_{yy} + z \cdot d_{zy} \\ e_z &= z \cdot d_{zz} \end{aligned} \quad (4.20)$$

A partir da aplicação da lei de propagação da incerteza a cada uma das expressões acima, sob a hipótese de que os componentes de erro sejam independentes entre si, obtêm-se as incertezas associadas aos erros em cada coordenada [150-152]:

$$\begin{aligned} u_x &= \sqrt{(x \cdot u_{dxx})^2 + (y \cdot u_{dyx})^2 + (z \cdot u_{dzx})^2} \\ u_y &= \sqrt{(y \cdot u_{dyy})^2 + (z \cdot u_{dzy})^2} \\ u_z &= \sqrt{(z \cdot u_{dzz})^2} \end{aligned} \quad (4.21)$$

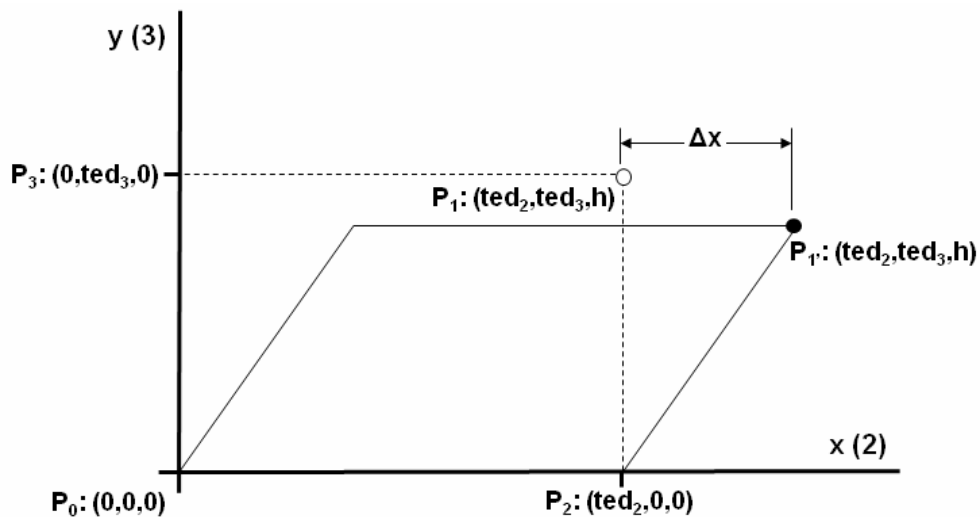


Figura 4.5: Posição do eixo de tolerância não influenciada por erros de esquadro da máquina (círculo sem preenchimento), e por eles influenciada (círculo com preenchimento), os quais provocam um desvio significativo Δx na direção normal ao plano terciário (projetado em y) e desprezível na direção normal ao plano secundário (projetado em x).

Apesar de as medições dos planos de referência e do elemento tolerado envolverem, invariavelmente, vários pontos, na prática a incerteza associada à característica sob análise pode ser razoavelmente aproximada caso os erros e as respectivas incertezas de alguns pontos elementares sejam conhecidos. Para a característica tipo posição sob análise, quatro são os pontos elementares: origem do sistema de referência da peça (P_0), ponto mais distante da origem (P_1), ponto referente à cota básica no plano secundário (P_2) e ponto referente à cota básica no plano terciário (P_3), indicados na figura 4.5.

Os efeitos sistemáticos conhecidos associados às coordenadas de cada um desses pontos podem ser avaliados a partir da direta aplicação das equações 4.20, e as incertezas correspondentes, da direta aplicação das equações 4.21. Os erros sistemáticos e as incertezas resultantes podem ser determinados conforme os passos descritos nos parágrafos seguintes.

Primeiramente, estimam-se os erros e as respectivas incertezas oriundos dos efeitos de escala da máquina, nas duas coordenadas de interesse, como segue:

$$\begin{aligned} e_{\text{escala.2}} &= e_{P1.\text{escala.2}} - e_{P3.\text{escala.2}} \\ e_{\text{escala.3}} &= e_{P1.\text{escala.3}} - e_{P2.\text{escala.3}} \end{aligned} \quad (4.22)$$

$$\begin{aligned} u_{\text{escala.2}}^2 &= u_{P1.\text{escala.2}}^2 - u_{P3.\text{escala.2}}^2 \\ u_{\text{escala.3}}^2 &= u_{P1.\text{escala.3}}^2 - u_{P2.\text{escala.3}}^2 \end{aligned} \quad (4.23)$$

Como resultado dos erros de esquadro da máquina, o(s) ponto(s) amostrado(s) para construir o plano terciário de referência pode(m) não coincidir com o plano efetivamente gerado (perpendicular ao plano secundário de referência). Assim, os erros sistemáticos e as incertezas provocados pela falta de perpendicularidade entre os eixos podem ser determinadas pelas seguintes equações:

$$\begin{aligned} e_{\text{esquadro.2}} &= e_{P1.\text{esquadro.2}} \\ e_{\text{esquadro.3}} &= e_{P1.\text{esquadro.3}} - e_{P2.\text{esquadro.3}} \end{aligned} \quad (4.24)$$

$$\begin{aligned} u_{\text{esquadro.2}}^2 &= u_{P1.\text{esquadro.2}}^2 \\ u_{\text{esquadro.3}}^2 &= u_{P1.\text{esquadro.3}}^2 - u_{P2.\text{esquadro.3}}^2 \end{aligned} \quad (4.25)$$

O erro sistemático resultante em cada coordenada de interesse provém da soma algébrica dos componentes de escala e esquadro:

$$e_{\text{en.em.i}} = e_{\text{escala.i}} + e_{\text{esquadro.i}} \quad (4.26)$$

e incerteza correspondente, da combinação das variâncias estimadas pelas equações 4.23 e 4.25, como segue, considerando uma distribuição normal e um nível da confiança de 68,27%:

$$u_{\text{en.em.i}} = \sqrt{u_{\text{escala.i}}^2 + u_{\text{esquadro.i}}^2}, \quad i = 2 \text{ e } 3 \quad (4.27)$$

No excepcional caso do referenciamento 3-2-1, ainda contribuem para a incerteza as posições do centróide da reta usada para definir o plano secundário e do ponto usado para definir a origem do sistema de coordenadas. Uma vez que ambos os efeitos tendem a reduzir o valor da incerteza em uma magnitude desprezível, as expressões definidas anteriormente são também consideradas suficientes e válidas para a situação analisada.

No exemplo em questão, por simplicidade, assumiu-se haver concordância entre os sistemas de coordenadas da máquina (universal) e da peça, i.e., eixo z da máquina coincidindo com a normal ao plano primário, eixo y da máquina coincidindo com a normal ao plano secundário e eixo x da máquina coincidindo com a normal ao plano terciário. Em muitos casos, contudo, pode ser necessário converter os sistemas de coordenadas, sendo usado para tanto transformações geométricas, conforme procedimento apresentado no apêndice D.

c) Nível N: ponderações sobre outros fatores de influência

Na prática industrial, muitas podem ser as outras possíveis fontes de informação que precisam ser consideradas na constituição de um balanço de incerteza. Em adição aos componentes de incerteza definidos nos itens anteriores, efeitos relacionados, p.ex., às temperaturas das escalas de medição e da peça, aos gradientes de temperatura no espaço e à repetitividade de posicionamento da ponta de medição (quando se usa um cabeçote indexador) podem ser relevantes para determinadas situações.

Em condições onde são efetuadas correções das temperaturas das escalas e da peça pelo próprio software da CMM, pode ser necessário considerar as incertezas referentes aos coeficientes de expansão térmica e aos sensores de temperatura. Vários tratamentos podem ser dados ao problema, um deles contido na equação 4.28, para o deslocamento (distância) em x apenas:

$$u_{dxx}^* = x \cdot \sqrt{(\alpha_p \cdot u_{tp})^2 + (\alpha_e \cdot u_{te})^2 + [(t_p - 20) \cdot u_{\alpha p}]^2 + [(t_e - 20) \cdot u_{\alpha e}]^2} \quad (4.28)$$

onde α_p e α_e denotam respectivamente os coeficientes de expansão térmica da peça e da escala x; t_p e t_e as temperaturas da peça e da escala x. O valor resultante deve ser adicionado quadraticamente à estimativa de u_{dxx} (equação 4.21). Para as outras duas coordenadas, a mesma abordagem pode ser adotada.

Noutras situações, e.g., quando não se efetuam correções de temperatura, podem ser utilizadas as seguintes expressões para estimar os efeitos referentes à temperatura [9]:

$$u_{en.ta.i} = c_{en.et.i} \cdot \frac{L \cdot (\alpha_p - \alpha_e) \cdot \Delta t_{ref}}{\sqrt{3}}, \quad i = 2 \text{ e } 3 \quad (4.29)$$

$$u_{en.td.i} = c_{en.et.i} \cdot \frac{L \cdot (\alpha_p + \alpha_e) \cdot \Delta t_{dif}}{\sqrt{3}}, \quad i = 2 \text{ e } 3 \quad (4.30)$$

com

$$L = \sqrt{ted_2^2 + ted_3^2 + h^2}$$

$$c_{en.et.i} = c_{en.em.i} = \cos \left[\arcsen \left(\frac{h}{L} \right) \right] \cdot \cos \left[\arcsen \left(\frac{ted_i}{\sqrt{ted_2^2 + ted_3^2}} \right) \right]$$

sendo Δt_{ref} a maior diferença esperada de temperatura frente à temperatura de referência e Δt_{dif} a maior diferença de temperatura entre escala e peça. Os valores estimados através das equações 4.29 e 4.30 podem ser combinados àqueles estimados a partir das equações 4.2 ou 4.27, conforme o cenário que se está inserido.

Para máquinas com portal móvel, os gradientes de temperatura afetam, em especial, a perpendicularidade no plano formado pelos eixos x e z. Um gradiente de temperatura $gradT_x$ na direção x provoca o arqueamento da coluna e coloca o eixo vertical z em um ângulo diferente daquele desejado, conforme esquema mostrado na figura 2.5. A incerteza para o erro de esquadro resulta da seguinte expressão [44,94,115]:

$$u_{dZX}^* = \alpha_{portal} \cdot h_{portal} \cdot gradT_x \quad (4.31)$$

onde α_{portal} denota o coeficiente de expansão térmica do material do portal da CMM, h_{portal} a altura do portal e $gradT_x$ o gradiente de temperatura ortogonal à coluna; que deve ser adicionada quadraticamente à estimativa de u_{dZX} (equação 4.21).

Com respeito à repetitividade de posicionamento da ponta, as especificações do fabricante do cabeçote indexador ou os resultados de testes como aqueles sugeridos na norma ISO 10360-5, podem servir o usuário com informações suficientes para estimar as incertezas. Para explicar o impacto das indexações, por sua vez, introduz-se o conceito de *coordenadas significantes*, definidas com base no fato de que as

indexações causam desvios posicionais significativos quando a apalpação se dá em direções normais à orientação da ponta (sempre que as pontas estejam aproximadamente alinhadas com os eixos do sistema de coordenadas da característica GPS).

O resultado de indexações realizadas entre as medições de elementos geométricos diferentes engendra variações tanto na definição da posição do eixo nominal de tolerância, por exemplo:

$$u_{\text{en,rp},i} = \frac{p}{\sqrt{3}}, \quad i = 2 \text{ ou } 3 \quad (4.32)$$

como na posição dos centros do elemento tolerado, e.g.:

$$u_{\text{pc,rp},i} = \frac{p}{\sqrt{3}}, \quad i = 2 \text{ ou } 3 \quad (4.33)$$

onde p representa uma estimativa da variação dos centros provocada pelas várias indexações. As incertezas padrão avaliadas por meio das equações 4.32 e 4.33 precisam ser então combinadas, respectivamente, às equações 4.10 e 4.13.

d) Apresentação (síntese) dos resultados

Os resultados da aplicação dos passos supracitados aos correspondentes cenários de conhecimento podem ser sintetizados em um balanço de incerteza, como ilustrado na tabela 4.4. Neste momento, somente os resultados referentes aos níveis 1 e 2 serão apresentados, os quais fazem uso das equações indicadas e dos valores informados nas tabelas 4.2 e 4.3. Exemplos de situações em que os efeitos presentes no nível N precisam ser considerados na avaliação da incerteza, serão discutidos no capítulo seguinte.

Na tabela 4.4 são informadas as incertezas referenciais, avaliadas a partir dos resultados das medições de uma peça calibrada, de acordo com o procedimento descrito na ISO/TS 15530-3. Para facilitar a comparação das informações, são também expostos na tabela 4.4 os componentes de incerteza (referentes aos efeitos) sistemáticos e os (referentes aos efeitos) aleatórios, obtidos a partir da aplicação da sistemática proposta. Para a estimação destes componentes, utilizam-se, respectivamente, as equações seguintes:

$$u_{cs,i} = u_{en,em,i} \quad (4.34)$$

$$u_{ca,i} = \sqrt{u_{en,ea,i}^2 + u_{pc,i}^2} \quad (4.35)$$

Tabela 4.4: Síntese dos resultados referentes aos níveis 1 e 2 de conhecimento para a característica posição, indicada na figura 4.2 (valores das incertezas em micrometros).

Componente	Símbolo	Equação	Incerteza Padrão			
			Nível 1		Nível 2	
			i = 2	i = 3	i = 2	i = 3
<i>Posição do Eixo Nominal</i>	u_{en}	4.10	1,54	1,44	0,45	0,33
erros de geometria sistemáticos	$e_{en,em}$	4.26	---	---	0,10	0,04
erros de geometria residuais	$u_{en,em}$	4.2 (4.27)	1,16	1,16	0,12	0,06
erros de apalpação	$u_{en,ea}$	4.9	1,01	0,85	0,44	0,32
inclinação do plano	$u_{en,ea,pe}$	4.4	0,61	0,61	0,08	0,08
origem do sistema	$u_{en,ea,os}$	4.7	1,11	0,58	0,59	0,31
rotação do sistema	$u_{en,ea,rs}$	4.8	0,82	0,82	0,44	0,44
centróide do plano	$u_{en,ea,cp}$	4.6	0,75	0,53	0,40	0,28
<i>Posição dos Centros</i>	u_{pc}	4.13 (4.19)	0,24	0,24	0,13	0,13
desvios de forma	$u_{pc,ef}$	4.11	0,14	0,14	---	---
plano de amostragem	$u_{pc,ea}$	4.12	0,19	0,19	---	---
<i>Incerteza Sistemática</i>	u_{cs}	4.34	1,16	1,16	0,12	0,06
<i>Incerteza Aleatória</i>	u_{ca}	4.35	1,04	0,88	0,46	0,35
<i>Tendência Estimada</i>	e	4.26	---	---	0,10	0,04
<i>Incerteza Resultante</i>	u	4.14	1,56	1,46	0,47	0,35
<i>Incerteza Expandida</i>		$U (k = 2,00)$	3,12	2,91	1,04	0,74
<i>Incerteza Referencial (conforme ISO/TS 15530-3)</i>						
tendência observada	$ b $		---		0,08	0,47
incerteza padrão da calibração	u_{cal}		---		1,02	0,88
desvio padrão das medições	u_p		---		0,44	0,33

Comparando os resultados dos níveis de conhecimento apresentados na tabela, ficam evidentes os maiores valores das respectivas incertezas padrão quando se utilizam informações de caráter mais geral. As divergências têm sua causa na natureza, em princípio, conservativa, para os fins de uma avaliação de incerteza, das especificações do fabricante. De fato, uma superestimação relativa é esperada sempre que as condições de instalação e uso do equipamento efetivamente atenderem os requi-

sitos impostos pelo fabricante, e pode ser interpretada como um reflexo direto do esforço empreendido na avaliação da incerteza.

Pode-se verificar em ambos os casos a eficácia no tratamento dos efeitos aleatórios, quando contrastado com os desvios padrão das medições (vide espaço da incerteza referencial). Por outra parte, pouco se pode concluir a respeito das contribuições sistemáticas, dada a significativa magnitude da incerteza da calibração para os fins da análise. Por essa razão, atenção especial será dada, no próximo capítulo, à questão da sensibilidade dos *balanços de incerteza característicos* aos efeitos sistemáticos.

4.2.3.2 Perpendicularidade de uma linha com respeito a um plano

Um outro tipo de tolerância geométrica tipicamente encontrado na prática industrial refere-se à perpendicularidade. Também na figura 4.2, é apresentado o caso de uma tolerância de perpendicularidade de uma linha reta (eixo de um cilindro) com respeito a um plano de referência (a figura 4.6 traz a interpretação da mesma). Para a sua verificação em uma CMM, um plano consistente com as regras descritas pela ISO/TS 17450-1 deveria considerar, de alguma forma, as seguintes operações:

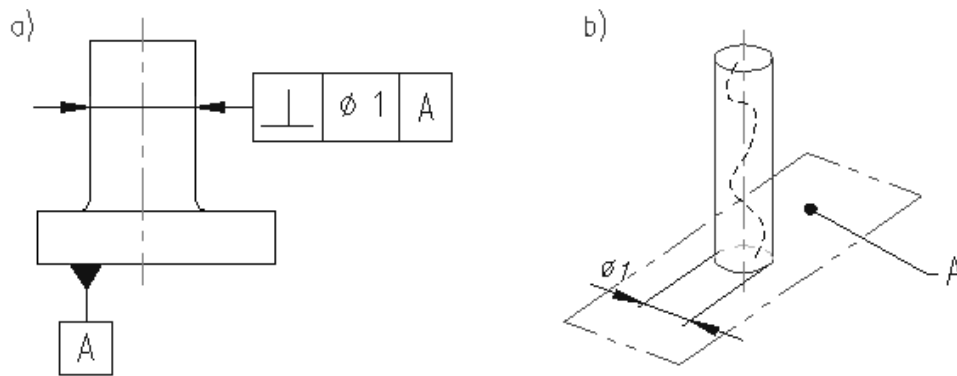


Figura 4.6: Interpretação de uma tolerância de perpendicularidade de uma linha reta com respeito a um plano de referência: a) desenho, b) zona de tolerância (adaptada de [40]).

- a. Com relação ao elemento tolerado (eixo do furo cilíndrico):
 - i. *extração* de um conjunto finito de pontos da superfície cilíndrica não-ideal (na forma de seções circulares);
 - ii. *associação* de elementos geométricos ideais a cada seção circular;
 - iii. *coleção* de todos os centros dos círculos ideais.

- b. Com relação ao plano de referência:
 - i. *extração* de um conjunto finito de pontos da superfície plana não-ideal;
 - ii. *associação* de um elemento geométrico ideal do tipo plano.
- c. O eixo da zona cilíndrica de tolerância é obtido através da *associação* de uma linha reta aos elementos geométricos colecionados, i.e., centros das seções circulares ideais (por definição, a linha reta deve ser perpendicular ao plano de referência).
- d. A avaliação da tolerância de perpendicularidade envolve determinar a maior distância entre o centro de cada elemento geométrico derivado associado e a linha reta construída, que não deve exceder a $t/2$.

Como efeito direto das operações envolvidas na avaliação de uma tolerância do tipo perpendicularidade, pode-se desvincular dois macrocomponentes de incerteza: (1) incerteza relacionada à definição da zona cilíndrica de tolerância, e (2) incerteza relacionada à posição relativa do centro de cada seção circular. De uma maneira geral, os fatores que mais influenciam a medição dos elementos geométricos que constituem a característica GPS são os seguintes: erros de esquadro (inerentes à máquina ou induzidos pela temperatura), efeitos aleatórios do apalpador de medição e erros de forma dos elementos geométricos da peça. Por outro lado, diversos níveis de conhecimento podem ser definidos, sendo um deles apresentado e discutido no item seguinte.

a) Nível 1: conhecimento intermediário do processo de medição

Para as discussões que seguem, resgatam-se as informações relevantes do cenário apresentado no nível 2 da subseção anterior, e inserem-se os parâmetros referentes à amostragem dos elementos de referência e tolerado da característica GPS, todos contidos na tabela 4.5. É interessante mencionar que a avaliação da incerteza associada a uma tolerância do tipo perpendicularidade pode ser entendida como um caso especial, e simplificado, de uma avaliação associada a uma tolerância do tipo posição. Isso por não ser necessário, para uma avaliação da perpendicularidade, considerar qualquer tipo de erro de posição, e.g., erros de escala da máquina e erros posicionais causados pela indexação das pontas, nem definir a origem do sistema de coordenadas da peça.

Incerteza relacionada à definição da zona cilíndrica de tolerância

A definição da zona cilíndrica de tolerância pode ser afetada pelos erros de esquadro da CMM e pelos efeitos aleatórios do apalpador. Durante a medição do plano de referência, vários planos com diferentes inclinações podem ser construídos, que fazem inclinar também o eixo de tolerância. Conhecendo o desvio padrão dos pontos medidos, a incerteza da inclinação do plano pode ser estimada como segue:

$$u_{en.ea.i} = c_{en.ea.i} \cdot r_1, i = 2 \text{ e } 3 \quad (4.36)$$

onde

$$c_{en.ea.i} = \frac{\sqrt{\frac{12}{n_1}}}{l_{ji}}$$

é um fator que relaciona o desvio padrão do parâmetro inclinação do plano com o desvio padrão dos pontos individuais (mais informações no apêndice C).

Tabela 4.5: Parâmetros que retratam o cenário para a avaliação da incerteza de uma tolerância de perpendicularidade; os números entre parênteses referem-se às incertezas padrão para os fatores de esquadro.

Parâmetro		Símbolo	Valor
<i>Erros de Geometria</i>			
erros de perpendicularidade (fatores de esquadro)	entre os eixos x-y	d_{yx}	-12,8(1,2) $\mu\text{m/m}$
	entre os eixos x-z	d_{zx}	-11,6(0,7) $\mu\text{m/m}$
	entre os eixos y-z	d_{zy}	-7,1(0,7) $\mu\text{m/m}$
<i>Amostragem do Plano Primário</i>			
comprimento na direção x		L_{12}	110 mm
comprimento na direção y		L_{13}	110 mm
número de pontos amostrados		n_1	36
repetitividade do apalpador na direção desejada		r_1	0,10 μm
<i>Amostragem do Elemento Tolerado</i>			
altura do furo cilíndrico na direção z		h	-55 mm
repetitividade na direção radial		s	0,13 μm

A influência dos erros de perpendicularidade da máquina pode ser também estimada considerando os componentes relevantes do modelo de corpo rígido, conforme mostrado nas equações 4.20 e 4.21. Assim como no caso da característica tipo posição,

as medições do plano de referência e do elemento tolerado envolvem vários pontos, porém o erro sistemático e a respectiva incerteza podem ser razoavelmente estimados caso sejam conhecidos os erros (e as incertezas) de alguns pontos elementares, a saber: interseção do eixo de tolerância com o plano de referência (P_0) e ponto extremo na direção do eixo de tolerância (P_1). Sempre que não houver concordância entre os sistemas de coordenadas da máquina e da peça, outros dois pontos são requeridos para determinar a inclinação do eixo da região de tolerância, identificados na figura 4.7 por P_2 e P_3 .

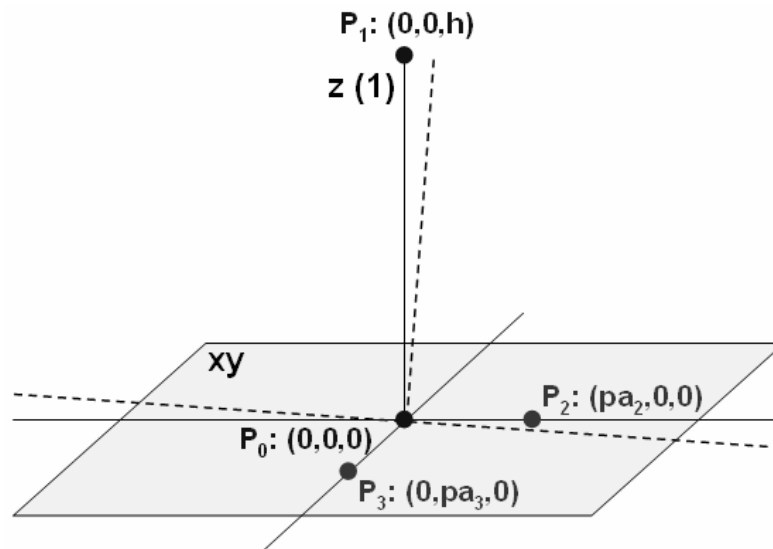


Figura 4.7: Ilustração dos quatro pontos necessários para determinar a incerteza resultante dos erros de esquadro da máquina no caso de uma tolerância de perpendicularidade de um eixo com respeito a um plano de referência.

Os efeitos sistemáticos conhecidos associados às coordenadas de cada um desses pontos podem ser avaliados a partir da direta aplicação da equação 4.20, e as incertezas correspondentes, da direta aplicação da equação 4.21. Os erros sistemáticos e as incertezas resultantes podem ser determinados pelas seguintes expressões:

$$e_{\text{en.em.2}} = e_{P1.\text{esquadro.2}} + \frac{e_{P2.\text{esquadro.1}}}{pa_2/h} \quad (4.37)$$

$$e_{\text{en.em.3}} = e_{P1.\text{esquadro.3}} + \frac{e_{P3.\text{esquadro.1}}}{pa_3/h}$$

$$u_{\text{en.em.2}}^2 = u_{P1.\text{esquadro.2}}^2 + \frac{u_{P2.\text{esquadro.1}}^2}{(pa_2/h)^2} \quad (4.38)$$

$$u_{\text{en.em.3}}^2 = u_{P1.\text{esquadro.3}}^2 + \frac{u_{P3.\text{esquadro.1}}^2}{(pa_3/h)^2}$$

onde o primeiro termo de cada equação assume o seu valor máximo, e o segundo termo assume seu valor mínimo (zero), quando coincidirem os sistemas de coordenadas da máquina e da peça; e tem-se essa lógica invertida quando, por exemplo, o eixo da zona de tolerância estiver alinhado com o eixo x da CMM. Mais informações sobre esse tópico são fornecidas no apêndice D.

A incerteza do eixo da zona cilíndrica de tolerância é determinada a partir da soma das variâncias relacionadas ao componente de geometria da máquina e aos efeitos aleatórios do apalpador na medição do plano de referência, como segue:

$$u_{en,i} = \sqrt{(u_{en.em,i})^2 + (u_{en.ea,i})^2}, \quad i = 2 \text{ e } 3 \quad (4.39)$$

Incerteza associada ao centro de cada seção circular

O efeito da interação entre a estratégia de medição e o padrão de desvios de forma de cada seção circular sobre a posição dos centros, estimado através de um estudo de repetitividade (e/ou reprodutibilidade, dependendo da situação), pode ter sua incerteza aproximada a partir da equação abaixo, considerando uma distribuição normal e um nível da confiança de 68,27%:

$$u_{vc,ea,i} = s, \quad i = 2 \text{ e } 3 \quad (4.40)$$

Caso indexações da ponta sejam realizadas durante a medição do elemento geométrico tolerado (componente não incluído na síntese dos resultados a seguir), a repetitividade de posicionamento da ponta passa a contribuir para a incerteza da posição relativa dos centros. Com base nas especificações do fabricante do cabeçote indexador, os limites de variação p podem ser usados para determinar a incerteza padrão correspondente, em cada coordenada, pela seguinte equação, considerando uma distribuição de probabilidade retangular:

$$u_{vc,rp,i} = \frac{p}{\sqrt{3}}, \quad i = 2 \text{ ou } 3 \quad (4.41)$$

A incerteza associada ao centro de cada seção circular, por sua vez, provém da raiz quadrada positiva da soma quadrática dos componentes de incerteza calculados por meio das duas equações anteriores:

$$u_{vc,i} = \sqrt{u_{vc,ea,i}^2 + u_{vc,rp,i}^2}, \quad i = 2 \text{ e } 3 \quad (4.42)$$

Incerteza resultante

A incerteza padrão combinada do ponto extremo resulta da raiz quadrada positiva da soma das variâncias estimadas para os dois macrocomponentes da incerteza, como segue:

$$u_i = \sqrt{u_{en,i}^2 + u_{vc,i}^2}, i = 2 \text{ e } 3 \quad (4.43)$$

a qual pode ser ainda multiplicada por um fator de abrangência k , dentro dos ideais do GUM, caso o propósito seja declarar uma incerteza expandida.

Como a incerteza padrão estimada pela equação 4.43 caracteriza os vetores de incerteza no sistema de coordenadas da peça, e não a distância entre os dois pontos que efetivamente definem o valor da perpendicularidade do eixo tolerado [142], o seguinte tratamento é necessário para avaliar a “incerteza da diferença” entre os pontos extremos:

$$u_{d,i} = \sqrt{u_{en,i}^2 + 2 \cdot u_{vc,i}^2} \quad (4.44)$$

onde o primeiro termo considera a dependência estatística relacionada à grandeza “eixo nominal”, e o segundo termo, a independência relacionada à grandeza “variação do centro”.

A incerteza do vetor da distância entre os pontos extremos pode ser razoavelmente aproximada a partir da raiz quadrada positiva da soma das variâncias (quadrado das respectivas incertezas padrão) relacionadas à cada coordenada, estimadas com base na equação 4.45, como segue:

$$u_d = \sqrt{u_{d,2}^2 + u_{d,3}^2} \quad (4.45)$$

e as estimativas dos erros sistemáticos conhecidos associadas de forma semelhante, a saber:

$$e_d = \sqrt{e_{en.em,2}^2 + e_{en.em,3}^2} \quad (4.46)$$

b) Apresentação (síntese) dos resultados

Os resultados da aplicação dos passos supracitados ao cenário sob discussão po-

dem ser sintetizados em um balanço de incerteza, como ilustrado na tabela 4.6 (como mencionado anteriormente, o componente referente à indexação da ponta não foi incorporado na análise). Nela são informadas as incertezas referenciais, obtidas a partir dos resultados das medições de uma peça calibrada, de acordo com o método descrito na ISO/TS 15530-3. Para facilitar a comparação das informações, são também expostos os componentes de incerteza (referentes aos efeitos) sistemáticos e os (referentes aos efeitos) aleatórios, obtidos a partir do emprego da sistemática proposta. Para estimá-las, utilizam-se, respectivamente, as duas expressões mostradas na seqüência:

$$U_{cs,i} = U_{en,em,i} \quad (4.47)$$

$$U_{ca,i} = \sqrt{U_{en,ea,i}^2 + U_{vc,i}^2} \quad (4.48)$$

Tabela 4.6: Balanço de incerteza para a característica tipo perpendicularidade, indicada na figura 4.2, dentro do cenário avaliado (valores das incertezas em micrometros).

Componente	Símbolo	Equação	Incerteza Padrão	
			i = 2	i = 3
<i>Orientação do Eixo Nominal</i>	U_{en}	4.39	0,05	0,05
erros de geometria sistemáticos	$e_{en,em}$	4.37	0,64	0,39
erros de geometria residuais	$U_{en,em}$	4.38	0,04	0,04
erros de apalpação	$U_{en,ea}$	4.36	0,03	0,03
<i>Posição Relativa dos Centros</i>	U_{vc}	4.42	0,13	0,13
interação peça-estratégia	$U_{vc,ea}$	4.40	0,13	0,13
<i>Incerteza Sistemática</i>	U_{cs}	4.47	0,04	0,04
<i>Incerteza Aleatória</i>	U_{ca}	4.48	0,13	0,13
<i>Tendência Estimada</i>	e	4.37	0,64	0,39
<i>Incerteza Resultante</i>	U	4.43	0,14	0,14
<i>Incerteza Expandida</i>	$U (k = 2,00)$		0,92	0,67
<i>Incerteza da Diferença</i>	u_d	4.44	0,19	0,19
<i>Incerteza Referencial da Diferença (conforme ISO/TS 15530-3)</i>				
tendência observada	$ b $	---	2,49	1,39
incerteza padrão da calibração	U_{cal}	---	0,60	0,63
desvio padrão (diferença)	u_p	---	0,17	0,17
desvio padrão (extremo)	$u_{p'}$	---	0,13	0,13

O fato de serem empregadas informações suficientemente específicas para a avaliação da incerteza permite uma aproximação razoável ante o valor referencial, quando considerados os componentes aleatórios. Isto pode ser evidenciado ao serem comparados tanto os valores da linha “incerteza aleatória” com os da linha “desvio padrão (extremo)”, como os valores da linha “incerteza da diferença” com os da linha “desvio padrão (diferença)”. Novamente, porém, pouco se pode concluir a respeito das contribuições sistemáticas, em função da significativa magnitude da incerteza da calibração.

4.2.3.3 Paralelismo de uma linha com respeito a um plano

Ao contrário das duas características discutidas anteriormente, a avaliação de uma tolerância de paralelismo de um eixo com respeito a um plano de referência não sofre a influência dos componentes de erro de escala e esquadro da CMM, nem o efeito da temperatura, sempre que esta se comporta de forma homogênea. Sobram, assim, os efeitos aleatórios do apalpador de medição na definição do plano de referência e na medição do elemento geométrico tolerado e a interação destes com os erros de forma da superfície de referência.

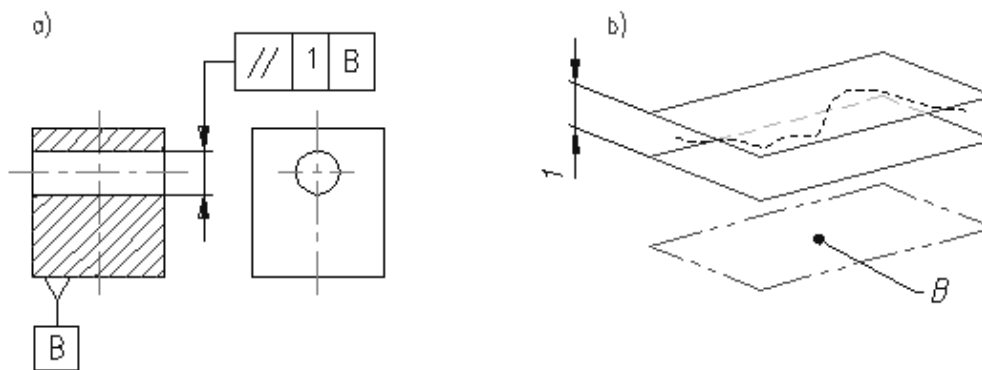


Figura 4.8: Esquemático de uma tolerância de paralelismo de uma linha reta com relação a um plano de referência: a) desenho, b) zona de tolerância (adaptada de [40]).

A incerteza associada à avaliação de uma tolerância como a exemplificada na figura 4.8 pode ser estimada aplicando um raciocínio muito similar ao apresentado para a tolerância de perpendicularidade (subseção anterior), e por isso não detalhado aqui. Inclusive, pode ser também necessário considerar a variação referente à indexação da ponta de medição quando duas ou mais orientações são utilizadas para medir um mesmo elemento geométrico.

4.2.3.4 Diâmetro de um cilindro (ou de uma seção circular)

O fato de um elemento geométrico dimensionável relacionar-se a um único elemento geométrico, e de estar ele razoavelmente fundamentado no atinente à avaliação da incerteza de medição, pouco espaço será dedicado ao problema neste documento. De fato, entende-se que dois são os quadros possíveis: o metrologista industrial não possui a CMM à sua disposição (ele deseja delimitar o processo de medição), ou o metrologista industrial a possui e é importante progredir na direção do conhecimento.

Em situações onde a exatidão requerida à estimativa da incerteza de medição puder ser satisfeita a partir de um modelo simplificado da medição e de informações menos específicas: e.g., especificações do equipamento; os procedimentos reportados por Hernla [80] aplicam-se suficientemente bem. Por outra parte, para aquelas situações que exigem um nível de conhecimento mais apurado da incerteza de medição, pode-se recorrer ao método por substituição, seja empregando um artefato calibrado (e.g., anel [eixo] cilíndrico) que se assemelhe à característica sendo avaliada [73] ou diretamente uma peça calibrada, no contexto da ISO/TS 15530-3.

Cabe ressaltar, porém, que é também possível avaliar a incerteza na medição de um diâmetro a partir das estimativas das incertezas dos componentes de erro de escala e esquadro da máquina. Por sua vez, como vários pontos são determinantes para avaliar o diâmetro de um elemento (e.g., pelo menos todos aqueles distribuídos em torno de uma seção circular), o desenvolvimento matemático torna-se menos trivial e certamente pouco convidativo aos olhos do metrologista industrial.

4.3 A abordagem puramente experimental

Dentro do esquema apresentado na figura 4.1, aplicações mais críticas requerem o provimento de estimativas de incerteza suficientemente mais exatas. Em medições de produção, em virtude do intrincado sistema de causas do erro de medição, é possível atender o requisito acima por meio de experimentos bem desenhados. Uma alternativa em princípio apropriada refere-se ao método experimental descrito na ISO/TS 15530-3 e comentado na subseção 3.2.1 deste documento.

Contudo, o método proposto na especificação técnica peca ao não ponderar de ma-

neira apropriada o fato de as características dimensionais e geométricas definidas na ISO 1101 e ASME Y14.5M aplicarem-se ao(s) elemento(s) geométrico(s) integral(is). Em outras palavras, na presença de erros de forma, medições com um número limitado de pontos resultam numa realização imperfeita da definição do mensurando, i.e., incerteza do método nos termos da ISO/TS 17450-2, ignorada pelo procedimento da ISO/TS 15530-3. Por sinal, a única consideração feita diz respeito à validade da incerteza declarada no certificado de calibração da peça para a estratégia adotada nas medições de rotina, uma vez que existe um forte vínculo entre o método experimental descrito na especificação técnica e a VCMM, como inclusive ilustrado na figura 3.5.

Para uma realização adequada do *modelo de integração da incerteza* sugerido, portanto, é importante que sejam tratados os seguintes pontos diretamente associados à questão acima: (1) calibração da(s) peça(s) de referência; (2) execução das medições da(s) peça(s) calibrada(s). Com relação ao primeiro ponto, sempre que o elemento sob escrutínio concernir a incerteza de uma determinada característica GPS, a calibração da peça precisa refletir, dentro do possível, o intento do projetista – deve-se preferir uma estratégia de medição de referência [153]. Isso normalmente implica a amostragem de um número suficientemente grande de pontos e o uso de critérios apropriados para o ajuste de elementos associados.

No que tange as medições da peça calibrada e o posterior processamento estatístico dos dados pelo metrologista industrial, é importante que sejam distinguidas algumas possíveis situações práticas, a saber:

- O metrologista industrial tem em mãos uma única peça calibrada, a qual representa suficientemente bem todas as demais no concernente aos erros de forma. Após efetuar (pelo menos) 20 medições da peça calibrada com a estratégia de medição e avaliação comumente empregada (sob condições que reflitam todos os estados máquina-ambiente esperados), a tendência das medições (com respeito ao valor de referência para uma determinada característica) e o desvio padrão das observações individuais podem ser razoavelmente utilizados para compor a estimativa da incerteza (junto com a incerteza padrão associada à calibração da característica GPS da peça).
- Similar à conjuntura anterior, o metrologista industrial tem em seu domínio uma única peça calibrada, porém são esperados desvios entre as peças no concer-

nente ao coeficiente de expansão térmica e à rugosidade local. Ambos os efeitos (sistemáticos desconhecidos) podem ser, em princípio, avaliados com base em um conhecimento prévio e as incertezas padrão combinadas de forma adequada aos termos mencionados no item anterior. Outra possibilidade seria avaliá-los experimentalmente, bastando que outras peças, não-calibradas, fossem introduzidas na análise.

- Uma conjuntura mais difusa, embora absolutamente provável, refere-se a situações onde, dada a instabilidade dos padrões de forma observados em peças de produção, mais de uma peça calibrada precise ser utilizada para a avaliação da incerteza; por exemplo, um mesmo produto provém de dois ou mais centros de usinagem, que geram padrões de forma distintos. A instabilidade dos padrões de forma poderia ser verificada em máquinas dedicadas de medição de forma, embora não sejam raros os casos em que uma avaliação com instrumentos de medição simples pudesse ser considerada suficiente para confirmar a hipótese.

O método proposto na ISO/TS 15530-3 tem aplicação direta somente à primeira conjuntura, desde que estratégias consistentes tenham sido adotadas na calibração das características da peça de interesse. Nas outras duas situações, por sua vez, lacunas estão presentes, particularmente associadas aos cálculos da tendência média e da repetitividade das medições, pois não é possível assumir cegamente a consistência estatística de ambos os parâmetros. Isso porque, para qualquer estratégia de medição diferente daquela que represente um *operador perfeito da verificação*, os parâmetros podem assumir valores estatisticamente distintos se a magnitude dos erros de forma ou mesmo seu padrão geométrico não se mantiverem constantes entre as peças.

Com base nos argumentos de Wheeler e Lyday [154], pode-se dizer que as tendências observadas para cada peça podem ser sintetizadas numa mesma média apenas quando se pode mostrar que as diferenças entre as tendências individuais estão aquém dos limites impostos pela repetitividade, a qual também abrange a variação amostral. Quando essa condição é atendida, pode-se utilizar a média das tendências observadas para cada peça como um estimador do erro sistemático do processo de medição (a computação do desvio padrão merece um tratamento similar).

Uma alternativa simples e rápida para checar a consistência das estimativas da tendência e da incerteza padrão, dentro do contexto em discussão, consiste na utiliza-

ção de gráficos de controle convencionais, como inclusive mostrado em dois artigos apresentados pelo autor deste documento [155-156]. As duas subseções seguintes introduzem a abordagem proposta, as quais se relacionam, respectivamente, com as duas últimas possíveis situações praticas mencionadas acima.

4.3.1 Inserção de peças não-calibradas ao método experimental

Sempre que o metrologista industrial se depara com situações onde uma única peça pode representar suficientemente bem as demais, embora sejam esperados desvios com relação ao coeficiente de expansão térmica e à rugosidade local, a inserção de peças não-calibradas ao procedimento pode se prestar para uma avaliação estatística dos componentes de incerteza. Os exemplos contidos no documento VDI/VDE 2617-8 exprimem o caso em discussão, onde três peças não-calibradas são também medidas no contexto do método experimental.

De acordo com o documento em pauta, a partir das medições da peça calibrada, pode-se estimar a tendência para cada característica dimensional e geométrica; e das medições de todas as (quatro) peças, pode-se calcular o desvio padrão da repetitividade como sendo a média dos (quatro) desvios padrão estimados (o anexo B traz as informações relevantes do exemplo da VDI/VDE 2617-8). A legitimidade de ambas as estimativas resultantes, por sua vez, depende da consistência das estimativas individuais, a qual pode ser evidenciada por meio de um gráfico de controle dos desvios padrão.

As quatro variâncias estimadas (referência ao anexo B), quando agrupadas segundo a equação 4.49:

$$\bar{s}^2 = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m s_j^2 \quad (4.49)$$

onde m denota o número de peças usadas no experimento, produzem uma variância média $\bar{s}^2 = 6,2 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^2$ e, conseqüentemente, um desvio padrão $\bar{s} = 7,9 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$. Os limites de controle superior e inferior são, então, calculados respectivamente pelas equações:

$$UCL_s = B_8 \cdot \sqrt{\bar{s}^2} \quad (4.50)$$

$$LCL_s = B_7 \cdot \sqrt{s^2} \quad (4.51)$$

onde B_7 e B_8 são constantes que dependem do tamanho do subgrupo n [157]. Para um subgrupo de tamanho $n = 20$ (medições em cada peça), $B_7 = 0,51$ e $B_8 = 1,48$. Substituindo os respectivos valores nas equações 4.50 e 4.51, obtêm-se os limites de controle inferior $LCL_s = 4,0 \cdot 10^{-4}$ mm e superior $UCL_s = 11,6 \cdot 10^{-4}$ mm. O gráfico de controle resultante é mostrado na figura 4.9, que claramente exhibe um valor aquém do limite de controle inferior.

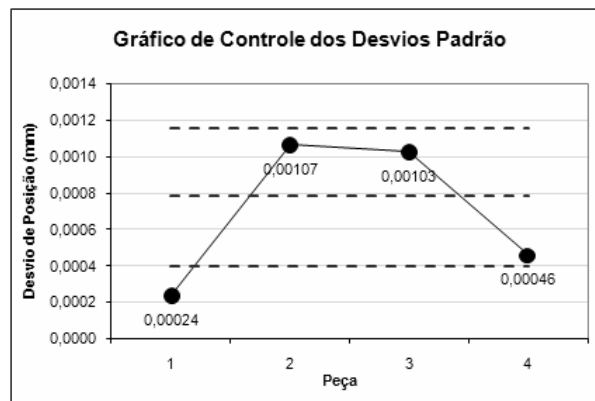


Figura 4.9: Gráficos de controle dos desvios padrão das medições – característica posição do eixo de um furo cilíndrico – da peça calibrada (1) e de três não-calibradas (2-4), sendo evidente a presença de uma potencial inconsistência nas medições.

A presença de um (ou mais) ponto(s) fora da região demarcada pelos limites de controle indica, em geral, potenciais inconsistências no processo de medição que, no caso sob análise, poderiam estar associadas à variação entre peças do coeficiente de expansão térmica ou da rugosidade local. Caso o experimento tivesse sido planejado para ser sensível a esses dois fatores, o desvio padrão médio estimado não os representaria de forma apropriada. O gráfico da figura 4.9 ilustra claramente que o desvio padrão das medições da peça calibrada (o primeiro ponto) é consideravelmente inferior aos demais. Logo, a incerteza associada aos efeitos do coeficiente de expansão térmica e à rugosidade local deveria ser estimada como a média dos desvios padrão relativos às três peças não-calibradas somente²³ (o desvio padrão da média das medições da peça calibrada poderia ser usado para estimar a parcela da incerteza associada à tendência observada).

²³ A exclusão do desvio padrão relativo à primeira peça implicaria um maior desvio padrão médio e a redução da “região de controle”; i.e., o ponto referente à quarta peça ficaria fora dos limites de controle. Para compor a incerteza, dever-se-ia estimar o desvio padrão médio com uma das seguintes alternativas: (a) utilizando os dois pontos restantes, que expressam o conhecimento existente do processo de medição; (b) aumentando a quantidade de peças na análise; (c) atuando no processo de fabricação, a fim de reduzir a variação existente.

Ainda mais grave que a inconsistência estatística acima, porém, está a percepção de que, no exemplo da diretriz alemã, as medições das três peças não-calibradas terem sido feitas para avaliar a influência da interação entre a estratégia de amostragem e o padrão de forma do cilindro de interesse. É absolutamente incompatível o uso da tendência observada para uma única peça calibrada para um conjunto de peças, quando os padrões de erro de forma não são suficientemente estáveis entre peças e as estratégias de calibração e medição não são semelhantes. Nesses casos, o procedimento experimental delineado na subseção seguinte deveria ser adotado.

4.3.2 Processamento estatístico para mais de uma peça calibrada

Em situações onde se observa uma instabilidade dos padrões de forma das peças, é interessante que mais de uma peça seja calibrada para os fins do procedimento experimental, ainda mais em aplicações que requerem maior exatidão da estimativa da incerteza (conforme esquema da figura 4.1). Se esse for o caso, um processamento estatístico adicional faz-se necessário, o qual será detalhado a seguir na forma de um exemplo, referente à avaliação da incerteza associada à medição do diâmetro de um furo cilíndrico de um cárter de compressor de ar (figura 4.10).

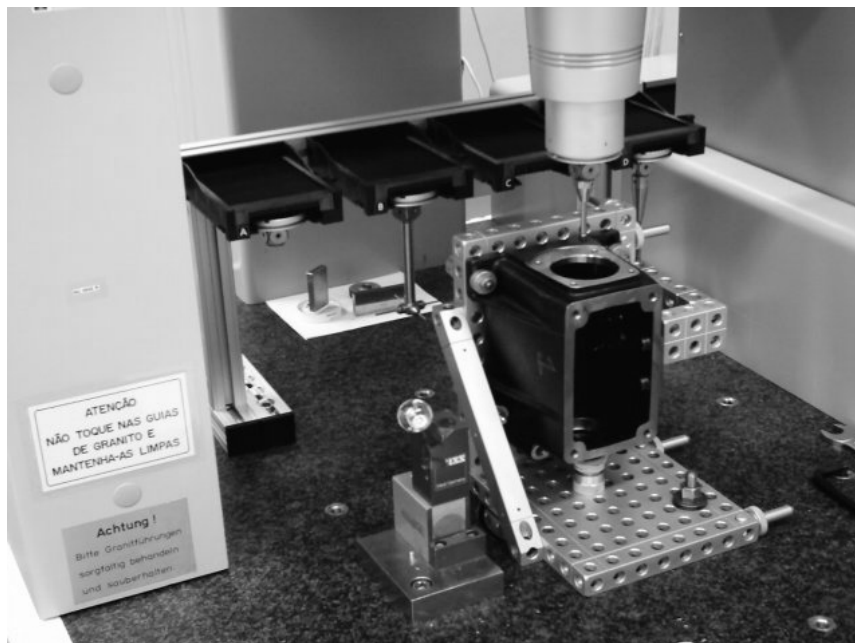


Figura 4.10: Ilustração da calibração das peças em uma CMM de referência de acordo com o procedimento proposto na ISO/TS 15530-2.

Com o propósito de mapear as contribuições provenientes de variações geométricas da característica de interesse, cinco peças foram retiradas ao acaso da linha de pro-

dução. Essas peças foram calibradas em uma CMM de referência²⁴ com base no procedimento descrito na ISO/TS 15530-2. A característica de interesse de cada peça foi medida com 36 pontos igualmente espaçados ao redor de uma seção transversal, sendo ajustado o maior círculo inscrito aos pontos. Os valores encontrados e as incertezas correspondentes são apresentadas na parte superior da tabela 4.7.

Tabela 4.7: Resultado da calibração dos diâmetros das peças e sumário das medições de acordo com a técnica descrita na ISO/TS 15530-3 (valores em milímetros).

		Peça A	Peça B	Peça C	Peça D	Peça E
Valor Calibrado, x_{cal}:		65,0151	65,0092	65,0099	64,9883	65,0108
Incerteza, U_{cal}:		0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Medição	1	65,0179	65,0160	65,0133	65,0035	65,0169
	2	65,0191	65,0155	65,0141	65,0021	65,0182
	3	65,0181	65,0154	65,0116	65,0019	65,0160
Tendência, b:		0,0033	0,0064	0,0031	0,0142	0,0062
Amplitude, R:		0,0012	0,0006	0,0025	0,0016	0,0022
Componente de Incerteza				Símbolo	Incerteza Padrão	
<i>Incerteza do valor calibrado</i>				U_{cal}	0,0010 mm	
<i>Incerteza do procedimento de medição</i>				u_p	0,0009 mm	
<i>Incerteza relativa às propriedades da peça</i>				u_w	0,0000 mm	
<i>Tendência (erro sistemático)</i>				b	0,0066 mm	
<i>Incerteza expandida ($k=2$)</i>				U	0,0094 mm	

Posteriormente, as mesmas peças foram medidas numa CMM de uso industrial, no escopo da ISO/TS 15530-3, usando uma estratégia de amostragem simplificada (sete pontos) e o critério de mínimos quadrados para ajustar um círculo aos pontos. Essa escolha não apenas reflete o fato desse critério matemático ser o de uso mais difundido, mas também porque não se aconselha a aplicação de critérios baseados em pontos extremos quando se amostra uma quantidade reduzida de pontos²⁵.

Cada uma das peças calibradas foi medida três vezes, sendo o efeito da interação entre o padrão geométrico das peças e a estratégia de medição parcialmente consi-

²⁴ CMM Zeiss ZMC 550 com apalpador medidor e software UMESS, instalada em um ambiente com temperatura mantida em $20,0 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar em $50\% \pm 10\%$.

²⁵ Os critérios baseados em pontos extremos são altamente sensíveis a pontos espúrios, e a estabilidade da aproximação do algoritmo fica comprometida caso seja amostrado um número reduzido de pontos [158-160].

derado pela alteração da posição dos pontos medidos com relação às referências físicas da peça. Isso implica a aleatorização do efeito em questão, o qual seria puramente sistemático caso fosse mantida fixa a posição relativa dos pontos apalpados. A partir das informações geradas pela calibração das peças e pela aplicação do procedimento experimental, a incerteza de medição pode ser calculada de acordo com a equação 3.1. Os valores das medições das peças calibradas, os parâmetros estatísticos calculados (tendências e amplitudes) e o balanço de incerteza resultante são mostrados na tabela 4.7.

Uma vez que a incerteza padrão u_p foi calculada a partir do agrupamento dos desvios padrão das medições de cada peça, assume-se que efeitos intrínsecos às peças tenham sido mapeados e incorporados nesse componente, sendo atribuído o valor zero à incerteza padrão u_w . Considerando que não seja razoável corrigir a tendência observada, esta é adicionada à incerteza expandida, despontando como o fator predominante, em virtude dos critérios matemáticos distintos utilizados para ajustar um círculo ideal aos pontos amostrados nas estratégias de calibração e medição.

O valor estimado para a incerteza de medição deveria representar a faixa dos erros potenciais esperados para a tarefa de medição caracterizada pelo procedimento experimental. Assim, em princípio, esse valor poderia ser usado para indicar a qualidade do processo de medição avaliado. Entretanto, o procedimento original proposto pela ISO/TS 15530-3 deixa a desejar ao negligenciar que a interação entre a característica sendo medida e a estratégia de medição simplificada pode comprometer a quantificação dos componentes individuais da incerteza de medição, sejam eles provenientes de efeitos sistemáticos ou aleatórios.

Como já argumentado, gráficos de controle podem ser usados para verificar como se comporta a interação entre a característica e a estratégia de medição. Um pequeno esforço extra para calcular alguns pares de limites de controle pode propiciar um conhecimento não alcançável com o procedimento original. As estimativas das tendências e das amplitudes de cada peça, essenciais para computar a incerteza segundo o procedimento ISO/TS 15530-3, podem ser inseridas em gráficos de controle característicos.

O gráfico para as amplitudes das medições de cada peça é elaborado com base na média das amplitudes das m peças:

$$\bar{R} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m R_j \quad (4.52)$$

e nos limites de controle calculados pelas equações:

$$UCL_R = D_4 \cdot \bar{R} \quad (4.53)$$

$$LCL_R = D_3 \cdot \bar{R} \quad (4.54)$$

onde D_3 e D_4 são constantes que dependem do tamanho do subgrupo n [157]. Para um subgrupo de tamanho $n = 3$, $D_3 = 0$ e $D_4 = 2,574$. A partir dos valores indicados na tabela 4.7, os parâmetros calculados são os seguintes: $\bar{R} = 0,0016$ mm, $LCL_R = 0$ e $UCL_R = 0,0042$ mm. O gráfico de amplitudes resultante é apresentado na parte inferior da figura 4.11. O limite de controle superior não foi violado, dando a entender que a amplitude média calculada pode ser considerada uma estimativa consistente da repetitividade do processo de medição sob análise. Feita essa constatação, a incerteza padrão relativa ao procedimento de medição u_p pode ser estimada por:

$$u_p = \frac{\bar{R}}{d_2^*} \quad (4.55)$$

onde d_2^* é uma constante estatística que depende do tamanho do subgrupo n e do número de peças m contidas no experimento [157]. Para $n = 3$ e $m = 5$, $d_2^* = 1,793$ e $u_p = 0,93$ μm , coincidentemente idêntico ao valor informado na tabela 4.7 (de forma geral, diferenças mínimas são esperadas entre esses dois valores).

O outro termo de interesse refere-se à tendência das medições. Os passos a serem seguidos para a construção do gráfico de controle das tendências são similares aos do gráfico anterior. A média das m tendências e os limites de controle superior e inferior são determinados pelas seguintes expressões:

$$\bar{b} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m b_j \quad (4.56)$$

$$UCL_b = \bar{b} + A_2 \cdot \bar{R} \quad (4.57)$$

$$LCL_b = \bar{b} - A_2 \cdot \bar{R} \quad (4.58)$$

onde A_2 é uma constante que depende do tamanho do subgrupo n [157]. Para um subgrupo de tamanho $n = 3$, $A_2 = 1,023$. A partir dos valores indicados na tabela 4.7, os parâmetros são estes: $\bar{b} = 0,0066$ mm, $LCL_b = 0,0050$ mm e $UCL_b = 0,0083$ mm.

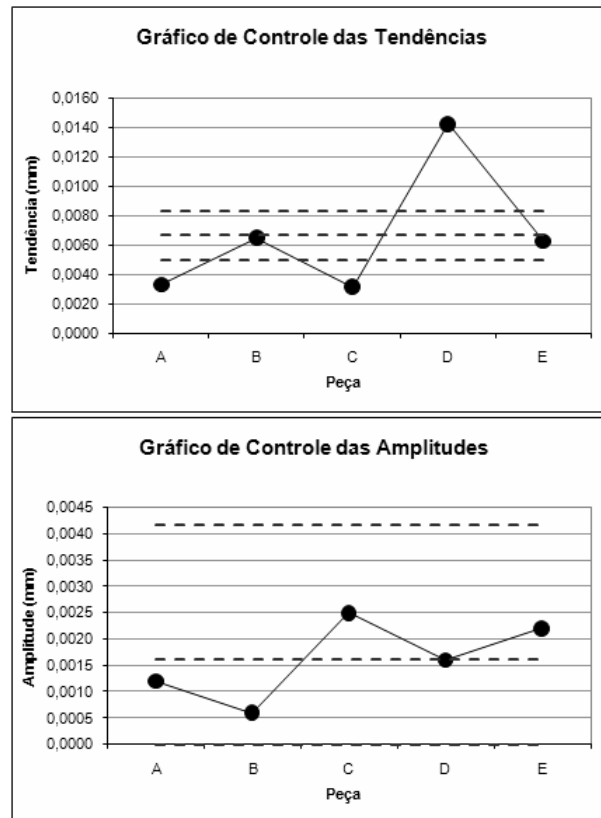


Figura 4.11: Gráfico de controle das tendências (superior) e das amplitudes (inferior) para os dados do exemplo “diâmetro de um furo cilíndrico de um cárter de compressor de ar”; o gráfico inferior não mostra ponto algum além do limite superior; o gráfico superior, por sua vez, exibe pontos fora da região definida pelos limites de controle.

O gráfico das tendências observadas é apresentado na parte superior da figura 4.11. Duas constatações importantes podem ser feitas a partir desse gráfico. A primeira é que a linha de tendência zero não está contida na faixa estabelecida pelos limites de controle, confirmando que existe uma tendência estatisticamente significativa. A segunda é que os limites de controle foram ultrapassados em três das cinco estimativas, o que indica que as tendências individuais são significativamente diferentes da média e que a média das tendências pode não constituir a melhor estimativa para esse efeito.

O fato de existir uma tendência estatisticamente significativa deve-se basicamente aos diferentes critérios de ajuste utilizados durante a calibração e a medição. Certamente, porém, o maior problema reside no comportamento inconsistente das tendências calculadas para cada peça, sendo interessante conhecer melhor o processo

de medição. Para tanto, buscou-se caracterizar o padrão geométrico do diâmetro de interesse de cada peça. Os desvios de circularidade foram medidos em uma máquina de medição de forma Mahr MMQ 40, e os padrões de erro de forma obtidos são ilustrados na figura 4.12 (com filtro gaussiano de 15 UPR). Ficam evidentes diferenças entre as peças tanto no formato do padrão geométrico como na magnitude dos desvios (nota: as escalas dos gráficos individuais podem não coincidirem).

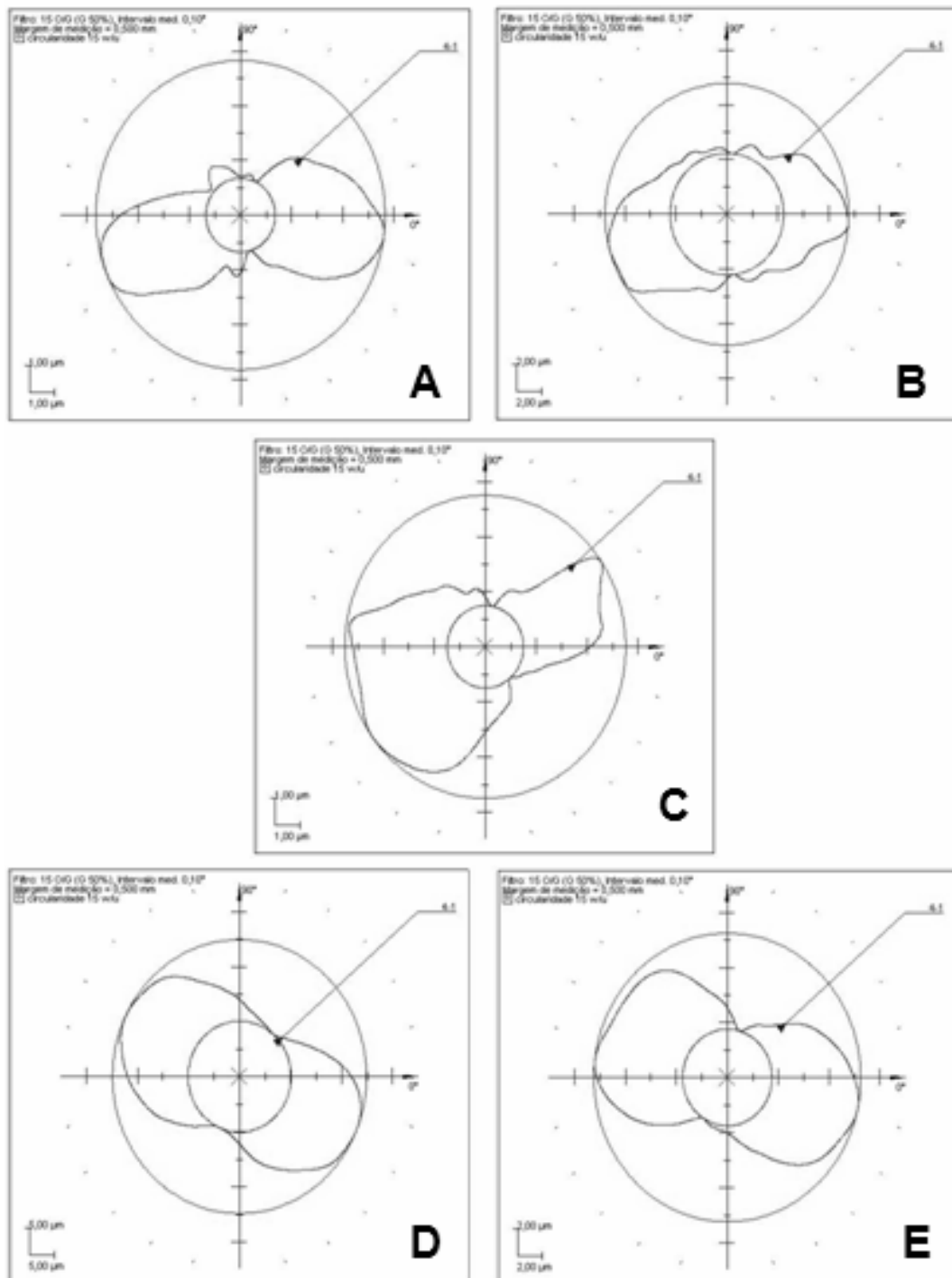


Figura 4.12: Padrão de circularidade de uma seção circular do furo das peças utilizadas no experimento (filtro de circularidade gaussiano – 15 UPR).

O erro de forma da peça D é consideravelmente superior àquele observado para as outras peças. O ponto representativo da peça D, que está além dos limites no gráfico das tendências, contempla exatamente essa discrepância. Duas ações poderiam ser tomadas para tratar o problema: a primeira envolveria atuar sobre o processo de fabricação, procurando minimizar a variação entre peças; a segunda seria adotar uma estratégia de medição com maior densidade de pontos, para atenuar o efeito causado pela interação entre o padrão geométrico das peças e o número de pontos amostrados.

Entretanto, nem sempre tais soluções são técnica ou economicamente viáveis. Se esse for o caso, supondo que significativas diferenças entre peças subsistam, não é conveniente adotar o equacionamento formalizado pela ISO/TS 15530-3 para a incerteza expandida, pois o valor estimado para ela pode não abranger uma fração razoável da distribuição de valores que poderiam ser atribuídos ao mensurando. Dessa maneira, a rastreabilidade das medições poderia ficar comprometida e decisões equivocadas nos mais diversos cunhos poderiam ser tomadas.

Para contornar o problema, propõe-se aqui um tratamento alternativo para os casos em que os erros sistemáticos apresentam comportamentos significativamente distintos. Deve-se, contudo, salientar que essa alternativa é recomendada apenas quando não for possível agir diretamente na raiz do problema. O tratamento é baseado numa recomendação contida no guia do NIST/SEMATECH [161], para situações onde uma tendência significativa, porém inconsistente, existe. Nesse caso, uma correção de valor zero deve ser empregada e a incerteza padrão referente à tendência média u_b deve ser reportada como um componente de incerteza tipo A, da seguinte forma:

$$u_b = \frac{\max(|b_i|)}{\sqrt{3}} \quad (4.59)$$

a qual assume que os valores de tendência estão uniformemente distribuídos (distribuição de probabilidade retangular) entre $-\max(|b_i|)$ e $+\max(|b_i|)$, sendo, portanto, uma suposição, em princípio, conservativa. Para essas situações, então, pode-se modificar a equação para a incerteza originalmente contida na ISO/TS 15530-3 para:

$$U = k \cdot \sqrt{u_{\text{cal}}^2 + u_p^2 + u_w^2 + u_b^2} \quad (4.60)$$

Para o exemplo “diâmetro de um furo cilíndrico de um cárter de compressor de ar”,

uma vez que as tendências apresentaram um comportamento inconsistente e assumindo-se que não seja conveniente operar nas causas raízes, o balanço de incertezas consistente com o tratamento alternativo é mostrado na tabela 4.8. Confrontando as incertezas expandidas estimadas pelo procedimento padrão e pela modificação sugerida, fica evidente que o procedimento alternativo produz um intervalo mais abrangente de valores possíveis para o mensurando que aquele estimado com o procedimento original. Isso se deve à introdução de um componente de incerteza que busca incorporar o desconhecimento existente sobre os efeitos sistemáticos

Tabela 4.8: Balanço de incertezas para a característica “diâmetro de um furo cilíndrico de um cárter de compressor de ar”, considerando o procedimento sugerido para situações onde uma tendência significativa e inconsistente existe.

Componente de Incerteza	Símbolo	Incerteza Padrão
<i>Incerteza do valor calibrado</i>	U_{cal}	0,0010 mm
<i>Incerteza do procedimento de medição</i>	u_p	0,0009 mm
<i>Incerteza relativa às propriedades da peça</i>	u_w	0,0000 mm
<i>Incerteza relativa à tendência inconsistente</i>	u_b	0,0082 mm
<i>Incerteza expandida ($k=2$)</i>	U	0,0166 mm

Em suma, o procedimento da ISO/TS 15530-3, para casos similares ao discutido, proverá valores de incertezas não-representativos para o processo de medição sendo investigado. Uma consequência ainda mais embaraçosa está atrelada ao valor da tendência calculada que, sendo inconsistente, não deveria ser corrigida ou adicionada à incerteza expandida, a fim de não motivar impressões erradas sobre os resultados medidos. A virtual superestimação da incerteza de medição com a alternativa sugerida é o preço que se paga pelo desconhecimento dos efeitos sistemáticos, decorrente do sistema de causas não muito bem caracterizado.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS DA APLICAÇÃO DOS ELEMENTOS CONSTITUINTES DO MODELO DE INTEGRAÇÃO

Os capítulos anteriores trouxeram, além da descrição conceitual do *modelo de integração da incerteza*, os subsídios necessários para a sua utilização, de forma direta ou indireta, pelos metrologistas industriais. Embora resultados de experimentos reais tenham sido incluídos no delineamento dos elementos que constituem o modelo de integração, considera-se ter sido insuficiente o tratamento feito para fins de avaliação da credibilidade e mesmo validação das distintas soluções possíveis.

Para tanto, as seções seguintes deste capítulo trazem outros exemplos de aplicação das abordagens contempladas pelo *modelo de integração da incerteza*. Da comparação dos resultados do cenário de referência, i.e., avaliação puramente experimental da incerteza usando peças calibradas, com os demais cenários, podem ser feitas ilações sobre o quão representativas podem efetivamente ser as estimativas geradas pelos *balanços de incerteza característicos* e o quanto eles efetivamente agregam ao metrologista industrial. Como resultado da aplicação do conceito a outras situações práticas, algumas reflexões pertinentes com respeito à aplicação do *modelo de integração da incerteza*, são também apresentadas ao fim deste capítulo.

5.1 Estudos de caso #1: sensibilidade aos efeitos aleatórios

Para demonstrar a eficiência dos *balanços de incerteza característicos* em considerar as contribuições aleatórias para a incerteza de medição, são apresentados na fi-

gura 5.1 os resultados da comparação das estimativas por eles geradas com as obtidas experimentalmente, para a característica perpendicularidade da mesma peça tomada como exemplo no capítulo anterior quando da descrição dos *balanços de incerteza característicos* (os valores usados para estimar as respectivas incertezas são aqueles contidos na equação 4.1 e na tabela 4.5).

Três são os planos de amostragem ilustrados no gráfico, sob a seguinte notação: AA-EE.i, onde AA denota o número de pontos tomados no plano de referência, EE o número de pontos tomados no elemento tolerado, e i a coordenada no sistema peça; e três são os níveis de informação considerados para a preparação dos *balanços de incerteza característicos*: (a) nível 1, elementar: dados fornecidos pelo fabricante da máquina; (b) nível 2, intermediário: dados obtidos por experimentos específicos; (c) nível 2, intermediário corrigido: dados do nível 2, mas corrigidos os fatores definidos no apêndice C (nota: no caso 36-30.i, o fator de correção é mínimo). Em todas as situações, são também mostrados os valores referenciais, obtidos experimentalmente.

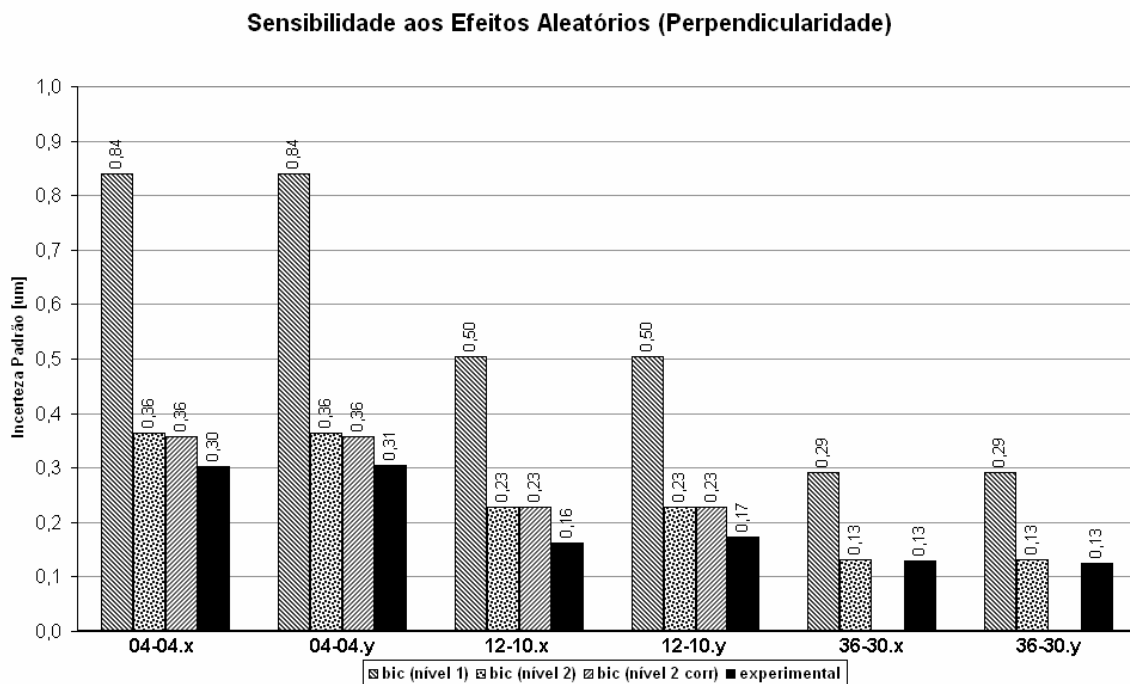


Figura 5.1: Valores das incertezas padrão associadas aos efeitos aleatórios gerados pelos *balanços de incerteza característicos* para os dois níveis de conhecimento e obtidos experimentalmente (valores em micrometros).

Do gráfico da figura 5.1 pode-se observar a sensibilidade dos *balanços de incerteza característicos* aos efeitos de distintas estratégias de amostragem dos elementos de referência e tolerado. As estimativas demasiadamente conservativas produzidas pelo nível primário devem-se ao uso de informações genéricas para determinar os va-

lores limites das contribuições aleatórias do apalpador de medição. Quando usadas informações mais específicas, verifica-se uma melhoria significativa na concordância com os valores experimentalmente obtidos. O fato de ter-se apalpado o elemento de referência na direção vertical, de variação pouco relevante ante aquela verificada na medição do elemento tolerado (vide tabela 4.5), explica a diferença desprezível entre os casos sem e com correção dos fatores trazidos no apêndice C.

Parte das ponderações acima, relativas a uma característica do tipo perpendicularidade, podem ser estendidas a uma característica do tipo posição, como se pode observar no gráfico da figura 5.2. São elas: a sensibilidade às diferentes estratégias de amostragem, a superestimação quando utilizando informações genéricas e a boa concordância das estimativas geradas com informações suficientemente específicas com os valores referenciais. A notação dos planos de amostragem dá-se da seguinte forma: AA-BB-CC-EE.i, onde AA denota o número de pontos tomados na referência primária, BB na secundária, CC na terciária, EE no elemento tolerado, e i a coordenada no sistema peça. No caso da característica posição, percebe-se ainda a divergência entre os casos sem e com correção dos fatores de sensibilidade (observação: no caso 03-02-01-30.i, a correção não é necessária, e no caso 36-36-36-30.i, o fator de correção é mínimo e desconsiderado).

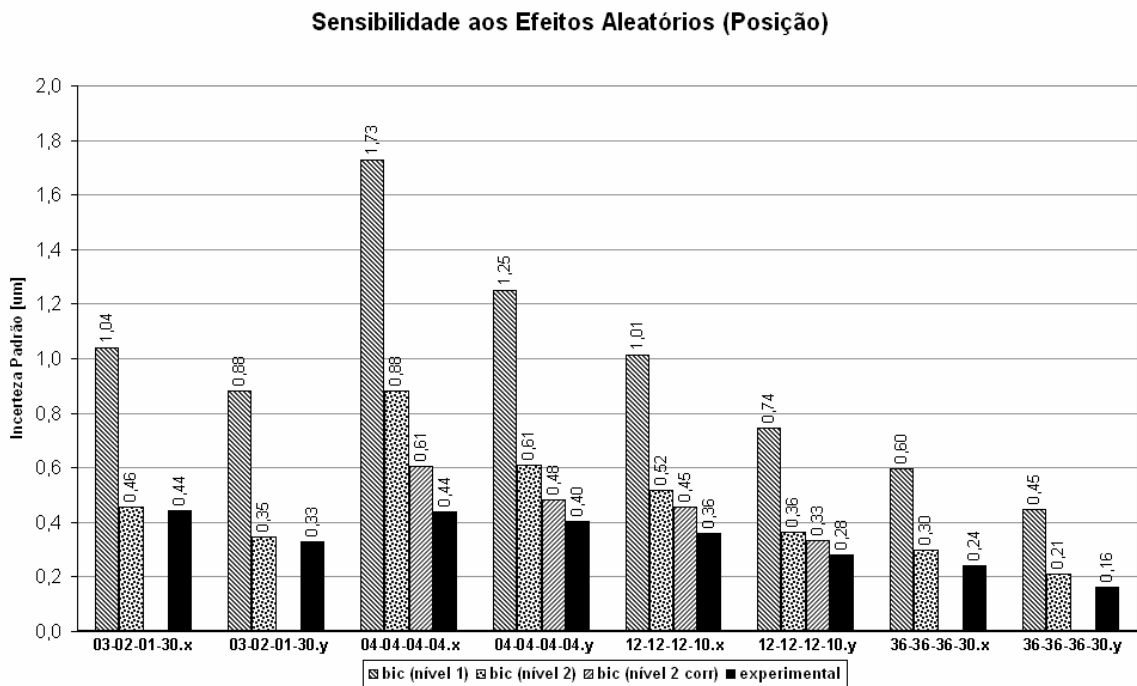


Figura 5.2: Valores das incertezas padrão associadas aos efeitos aleatórios geradas pelos *balanços de incerteza característicos* para dois níveis de conhecimento e obtidas experimentalmente (valores em micrometros).

Das duas situações descritas é possível inferir que, a partir da sistemática delineada no capítulo anterior podem ser produzidas estimativas fidedignas das respectivas incertezas padrão, sempre que informações suficientemente específicas sejam utilizadas para compô-las. A menor exatidão das estimativas, observada nas situações em que se utilizam informações menos específicas, por sua vez, não nulifica, dentro do *modelo de integração da incerteza*, o esforço por ora empreendido. Isto porque a estimativa gerada reflete o nível de conhecimento existente, a qual pode ser adequada para as etapas iniciais do processo de realização do produto e da medição, ou pode indicar a necessidade de informações mais detalhadas por parte do fabricante da CMM, para dar maior consistência, e.g., ao processo de seleção de uma máquina.

5.2 Estudos de caso #2: sensibilidade aos efeitos sistemáticos

Nos casos discutidos ao longo da seção 4.2, conclusões não puderam ser tiradas a respeito da capacidade dos *balanços de incerteza característicos* em tratar os efeitos sistemáticos, consequência da elevada incerteza da calibração da peça para os fins da comparação concernente. Para contornar o problema, tornou-se necessária uma análise alternativa, sendo os resultados e as ponderações a ela relacionados discutidas ao longo desta seção.

Visto ser tecnicamente inviável diminuir a incerteza da calibração, a abordagem aqui adotada embasa-se na sensibilização diferenciada dos efeitos sistemáticos. Para a característica perpendicularidade, a peça foi medida em quatro orientações distintas, incrementadas por 90°. Os valores de referência foram estabelecidos a partir da calibração da característica GPS com base no método proposto pela ISO/TS 15530-2. As tendências avaliadas experimentalmente são marcadas por quadrados na figura 5.3, junto com a incerteza expandida associada ao valor de referência.

Pelos círculos são representadas as incertezas associadas aos efeitos sistemáticos, particularmente os erros de geometria da CMM, geradas pelos *balanços de incerteza característicos* no nível primário de conhecimento. Sendo genéricas as informações usadas para a composição da incerteza (conforme equação 4.1), a incerteza assume valores idênticos em todos os casos, independente da orientação da peça. Verifica-se também que o intervalo que contempla o valor da tendência está contido (em alguns casos, marginalmente) na região delimitada pela incerteza.

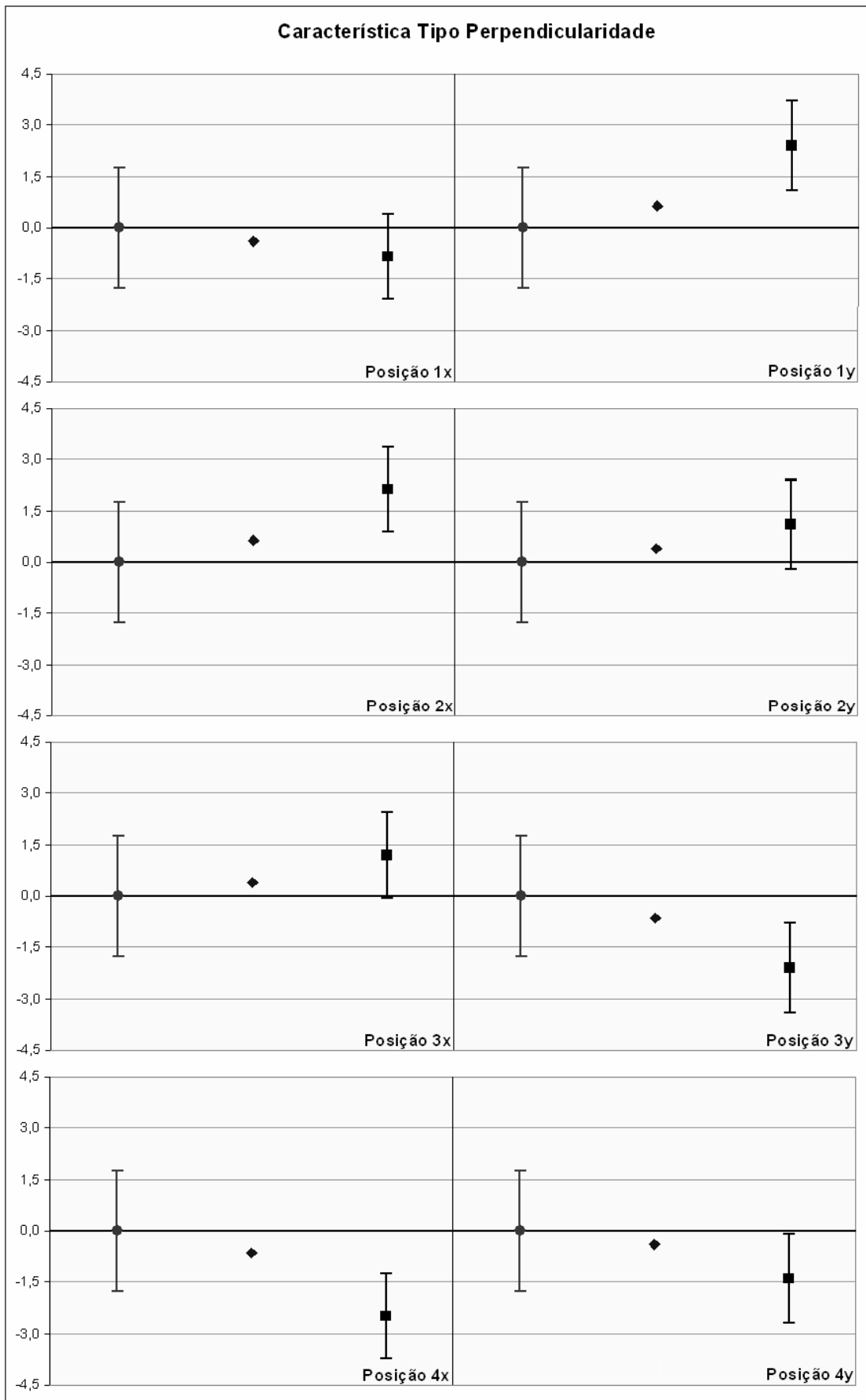


Figura 5.3: Tendências e as respectivas incertezas (associadas aos efeitos sistemáticos) para a característica perpendicularidade nos níveis de conhecimento primário (círculo) e intermediário (losango), e no cenário de referência (quadrado) – valores em micrometros.

No nível intermediário de conhecimento, por sua vez, apesar de as tendências estimadas pelos *balanços de incerteza característicos* correspondentes, marcadas por losangos, acompanharem as estimativas de referência, em algumas situações a subestimação é patente. Os motivos estão relacionados ao não atendimento de uma das condições definidas na subseção 4.2.2, i.e., o fato de a magnitude de alguns dos erros de rotação não ser desprezível frente aos erros de esquadro (a saber: rotação em torno de z ao deslocar-se em x, e rotação em torno de y ao deslocar-se em z). Para melhorar a estimativa da incerteza, podem ser empregados os resíduos vinculados aos fatores de esquadro, os quais contemplam os efeitos não contabilizados pelas incertezas padrão informadas na tabela 4.5.

Os resíduos dos fatores de esquadro podem ser avaliados repetindo o procedimento comum sob diferentes condições, e.g., diferentes posições no volume de medição da máquina, diferentes dias, etc. Estas novas informações podem ser entendidas como parte de um nível de conhecimento mais avançado do processo de medição. O gráfico da figura 5.4 ilustra a resposta dos *balanços de incerteza característicos* quando essas novas informações, indispensáveis para o equipamento utilizado nas análises, são acrescentadas. Para todos os arranjos estudados, as estimativas dos erros sistemáticos superpõem o valor de referência, mostrando a adequação da metodologia sempre que estejam suficientemente bem caracterizadas as grandezas de entrada.

Para a característica posição discutida na subseção 4.2.3.1, os valores referenciais foram também obtidos a partir da calibração da característica GPS com base no método proposto pela ISO/TS 15530-2. De forma idêntica ao caso anterior, as tendências foram avaliadas experimental e analiticamente em quatro orientações distintas. Já considerando os resíduos que acompanham os fatores de escala e esquadro, conforme discussão anterior, podem ser estimadas as respectivas incertezas, que acompanham as tendências analiticamente calculadas, exibidas na figura 5.5.

Para os níveis de conhecimento primário e intermediário, são igualmente válidas as ponderações feitas no caso anterior. Há uma correlação satisfatória entre o intervalo de incerteza associado ao valor de referência e aqueles definidos pelos *balanços de incerteza característicos* em ambas as situações. Cabe destacar também que o fato de o teste da ISO 10360-2 para estimar o erro em medições de comprimento retratar suficientemente bem a tarefa de medição sob escrutínio, contribui de forma decisiva para os resultados alcançados.

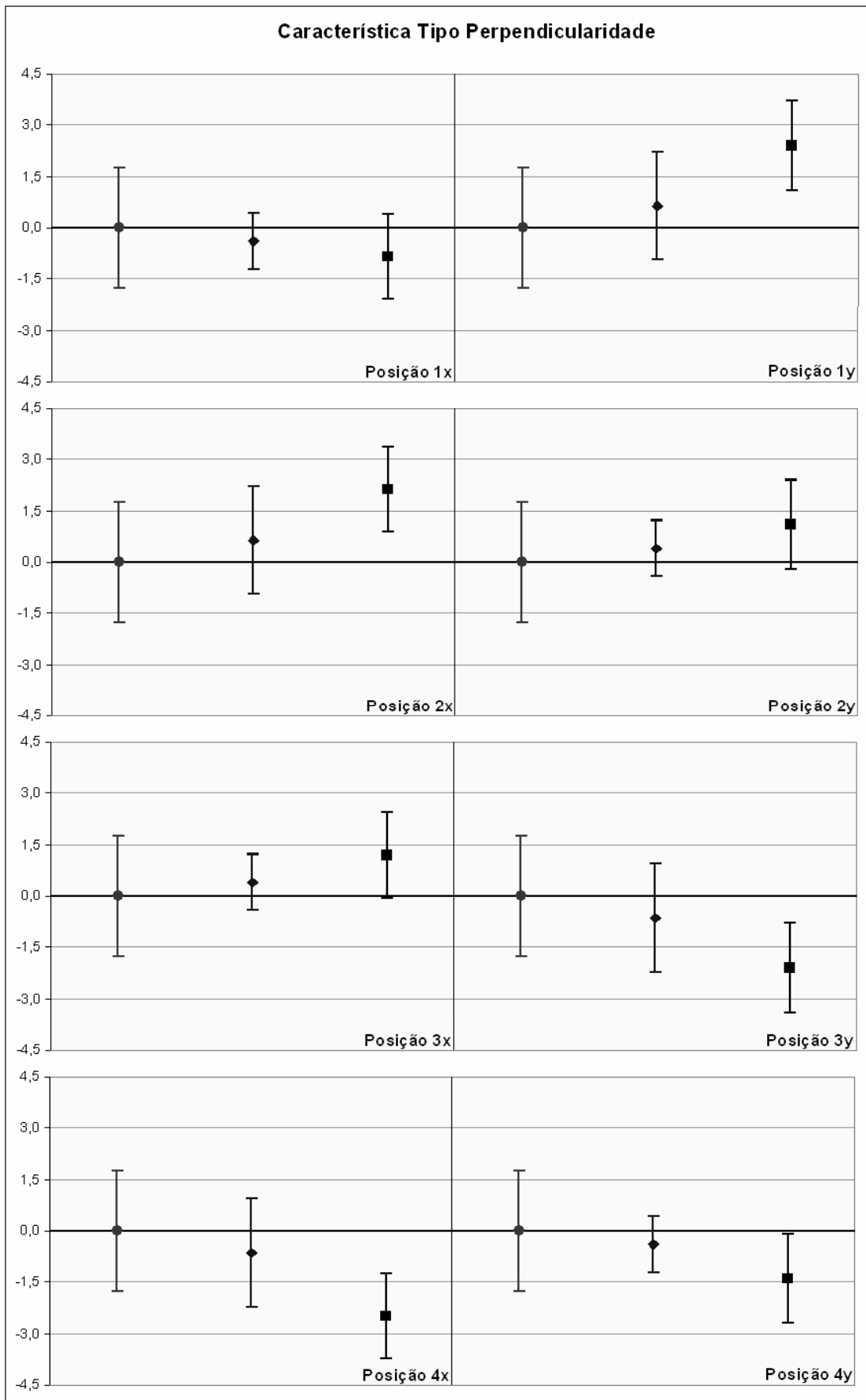


Figura 5.4: Reprodução do gráfico da figura 5.3, porém com as incertezas estimadas, para o nível de conhecimento intermediário, com base nos resíduos que também englobam os efeitos associados aos erros de rotação (valores em micrometros).

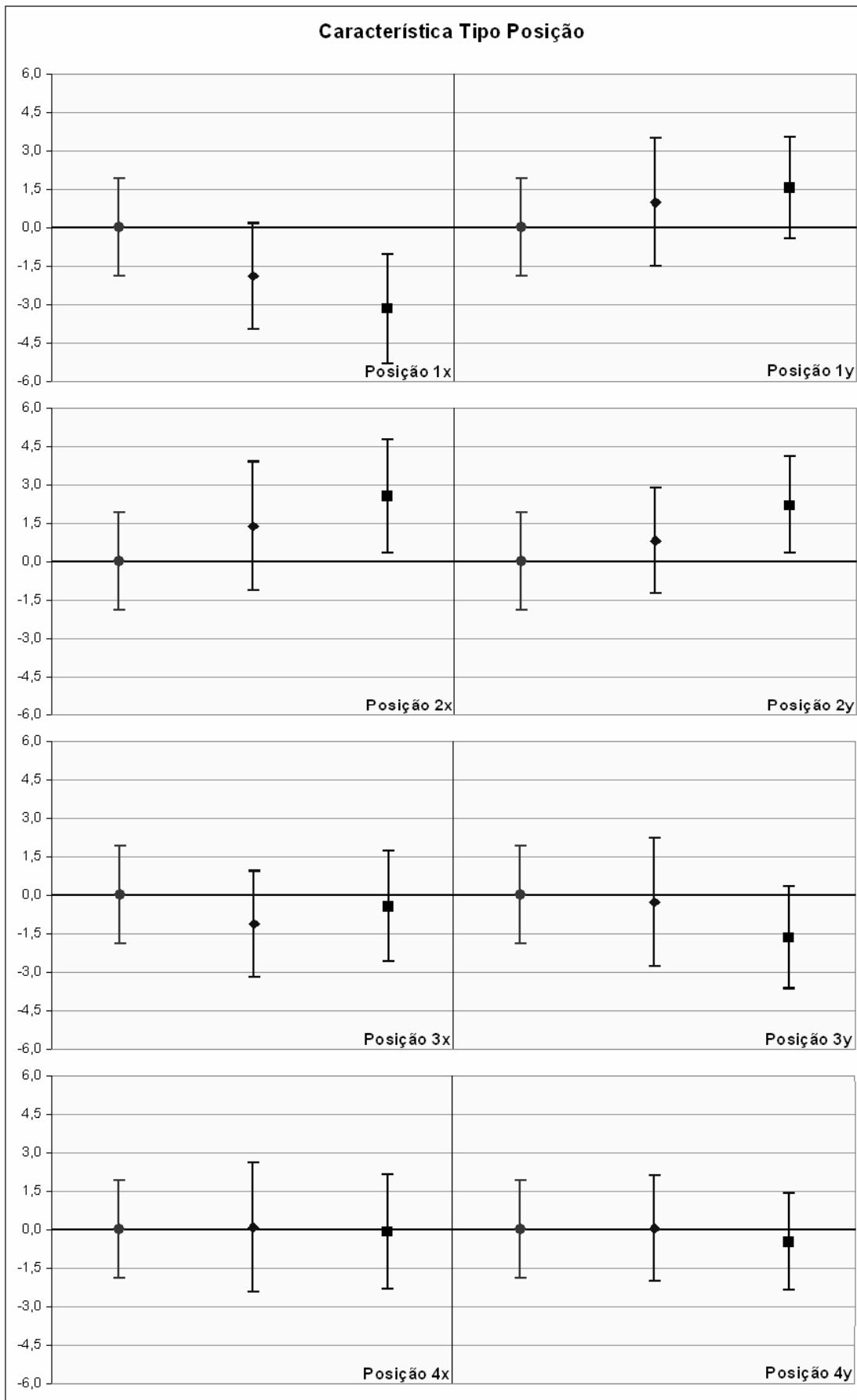


Figura 5.5: Tendências e as respectivas incertezas (associadas aos efeitos sistemáticos) para a característica posição nos níveis de conhecimento primário (círculo) e intermediário (losango), e no cenário de referência (quadrado) – valores em micrometros.

5.3 O modelo de integração da incerteza no contexto industrial

Os exemplos de aplicação apresentados nesta seção referem-se a duas características GPS de uma carcaça de direção (figura A.1 [apêndice A]): (a) posição do eixo de um furo com respeito a um sistema de referência (GPS.101, figura A.2); (b) posição do eixo de um furo com respeito a um sistema de referência (GPS.102, figura A.2). Três cenários de avaliação diferenciados, no que tange a especificidade das informações e o propósito da avaliação, são debatidos para ambas as características:

- a. Nível primário de conhecimento: refere-se a uma avaliação preliminar da incerteza com as informações por ora disponíveis, i.e., especificações da CMM e do sistema de apalpação, e comportamento esperado do local de medição.
- b. Nível intermediário de conhecimento: refere-se a uma avaliação da incerteza baseada em informações mais específicas sobre o processo de medição, oriundas de testes para avaliar os erros geométricos da máquina e a repetitividade de apalpação e indexação sob condições particulares.
- c. Abordagem puramente experimental: refere-se à avaliação da incerteza a partir de repetidas medições de uma peça de referência, i.e., aquela cujos valores das características GPS sejam conhecidos de antemão (vide seções 3.2 e 4.3 para mais informações).

Este último cenário, que dentro do *modelo de integração da incerteza* denota o nível mais alto de conhecimento no relativo à estimativa da incerteza, pelo menos para os exemplos definidos, destina-se somente à provisão das respectivas estimativas referenciais das incertezas. Com relação aos outros dois cenários, as informações contidas no capítulo anterior podem ser consideradas, a princípio, suficientes para a composição dos *balanços de incerteza característicos*. Estes dependem da apropriada realização das seguintes tarefas:

- a. definição de um plano de verificação para cada característica GPS;
- b. identificação dos fatores de influência (e das respectivas estimativas);
- c. parametrização de cada característica GPS;
- d. compilação das informações dentro dos balanços de incerteza correspondentes.

Os planos de verificação, consistentes com as regras contidas na ISO/TS 17450-1, para as duas características GPS sob análise são descritos na tabela 5.1. Em adição às operações básicas necessárias para avaliar as respectivas características, são também explicitadas a estratégia de amostragem e a ponta de medição utilizada na medição de cada elemento geométrico.

Tabela 5.1: Descrição dos planos de verificação para as duas características GPS sob análise, incluindo a ponta de medição definida para amostrar cada elemento geométrico.

Característica GPS.101
Posição do Eixo de um Furo com Respeito a um Sistema de Referência
<i>Referência Primária</i>
Medição do plano com três pontos ($n_1 = 3$), localizados nas regiões indicadas (distribuição aproximadamente circular), e associação de um elemento geométrico tipo plano (ponta 1, direção vertical).
<i>Referência Secundária</i>
Medição do plano com dez pontos distribuídos de maneira aproximadamente circular ($n_2 = 10$), e associação de um plano ideal pelo método dos mínimos quadrados (ponta 2, direção horizontal em x).
<i>Referência Terciária</i>
Medição do furo cilíndrico com quinze pontos ($n_3 = 15$), três seções circulares com cinco pontos uniformemente distribuídos cada, e derivação do eixo do elemento geométrico associado (ponta 2, direção horizontal em x).
<i>Elemento Tolerado</i>
Medição de três seções circulares com cinco pontos uniformemente distribuídos cada ($n = 5$), e derivação dos centros dos respectivos círculos avaliados pelo método dos mínimos quadrados (ponta 1, direção vertical).
Característica GPS.102
Posição do Eixo de um Furo com Respeito a um Sistema de Referência
<i>Referência Primária</i>
Medição do plano com três pontos ($n_1 = 3$), localizados nas regiões indicadas (distribuição aproximadamente circular), e associação de um elemento geométrico tipo plano (ponta 1, direção vertical).
<i>Referência Secundária</i>
Medição do plano com dez pontos distribuídos de maneira aproximadamente circular ($n_2 = 10$), e associação de um plano ideal pelo método dos mínimos quadrados (ponta 2, direção horizontal em x).
<i>Referência Terciária</i>
Medição do furo cilíndrico com quinze pontos ($n_3 = 15$), três seções circulares com cinco pontos uniformemente distribuídos cada, e derivação do eixo do elemento geométrico associado (ponta 1, direção vertical).
<i>Elemento Tolerado</i>
Medição de três seções circulares com cinco pontos uniformemente distribuídos cada ($n = 5$), e derivação dos centros dos respectivos círculos avaliados pelo método dos mínimos quadrados (ponta 1, direção vertical).

As contribuições para a incerteza em princípio mais relevantes podem ser extraídas da subseção 4.2.3.1 ou do conteúdo da matriz mostrada na tabela 3.1. Para ambas as características GPS, consideram-se estes fatores de influência: erros de escala e esquadro da CMM, efeitos da apalpação na medição dos elementos de referência e tolerado (inclusive relacionados à indexação das pontas de medição) e variações da temperatura (assume-se que correções não sejam efetuadas). As informações contidas na tabela 5.2 podem então ser consideradas suficientes para a avaliação da incerteza nos níveis de conhecimento designados para a composição dos *balanços de incerteza característicos*.

Tabela 5.2: Conjunto das informações consideradas suficientes para avaliar a incerteza de medição dentro dos dois primeiros cenários estabelecidos.

Parâmetro		Símbolo	Valor
<i>Especificações do Equipamento</i>			
constante A (conforme ISO 10360-1)		A	3,9 μm
constante K (conforme ISO 10360-1)		K	250
indexação (relativa ao comprimento da haste)		p	0,008 $\mu\text{m}/\text{mm}$
<i>Especificações do Laboratório (Ambiente)</i>			
desvio máximo da temperatura referencial		Δt_{ref}	0,3 K
diferença de temperatura escalas-peça		Δt_{dif}	0,5 K
coeficiente de expansão térmica da peça		α_p	$11,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
coeficiente de expansão térmica das escalas		α_e	$7,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Nível Primário de Conhecimento			
<i>Erros de Geometria</i>			
erro de posicionamento (fatores de escala)	no eixo x	d_{xx}	4,1(0,7) $\mu\text{m}/\text{m}$
	no eixo y	d_{yy}	5,0(0,6) $\mu\text{m}/\text{m}$
	no eixo z	d_{zz}	1,4(0,6) $\mu\text{m}/\text{m}$
erros de perpendicularidade (fatores de esquadro)	entre os eixos x-y	d_{yx}	-12,8(1,2) $\mu\text{m}/\text{m}$
	entre os eixos x-z	d_{zx}	-11,6(0,7) $\mu\text{m}/\text{m}$
	entre os eixos y-z	d_{zy}	-7,1(0,7) $\mu\text{m}/\text{m}$
<i>Erros de Apalpação</i>			
repetitividade do apalpador (direção horizontal, 1σ)		r_x, r_y	0,35 μm
repetitividade do apalpador (direção vertical, 1σ)		r_z	0,10 μm
repetitividade de indexação da ponta (1σ)		p	0,20 μm
<i>Interação Estratégia-Elemento Tolerado</i>			
faixa de variação da posição dos centros (1σ)		s	0,28 μm
Nível Intermediário de Conhecimento			

Tabela 5.3: Parâmetros relacionados às características GPS.101-2, tendo como base o desenho da figura A.2, necessários para estimar os vários componentes de incerteza.

Parametrização		
Característica Posição GPS.101		
<i>Amostragem da Referência Primária (plano)</i>		
comprimento na direção x	l_{12}	120,0 mm
comprimento na direção y	l_{13}	120,0 mm
<i>Amostragem da Referência Secundária (plano)</i>		
comprimento na direção x	l_{22}	90,0 mm
comprimento na direção z	l_{21}	90,0 mm
distância do centróide à origem em x	do_{22}	0,0 mm
distância do centróide à origem em z	do_{21}	0,0 mm
cota básica na direção x	ted_2	61,7 mm
<i>Amostragem da Referência Terciária (linha)</i>		
distância entre os pontos extremos da linha	l_{33}	35,0 mm
distância do centróide à origem em y	do_{33}	17,5 mm
cota básica na direção y	ted_3	75,3 mm
<i>Amostragem do Elemento Tolerado</i>		
altura do furo partindo do plano primário	h	40,0 mm
Parametrização		
Característica Posição GPS.102		
<i>Amostragem da Referência Primária (plano)</i>		
comprimento na direção x	l_{12}	120,0 mm
comprimento na direção y	l_{13}	120,0 mm
<i>Amostragem da Referência Secundária (plano)</i>		
comprimento na direção x	l_{22}	90,0 mm
comprimento na direção z	l_{21}	90,0 mm
distância do centróide à origem em x	do_{22}	0,0 mm
distância do centróide à origem em z	do_{21}	35,0 mm
cota básica na direção x	ted_2	117,1 mm
<i>Amostragem da Referência Terciária (linha)</i>		
distância entre os pontos extremos da linha	l_{33}	30,0 mm
distância do centróide à origem em y	do_{33}	15,0 mm
cota básica na direção y	ted_3	47,0 mm
<i>Amostragem do Elemento Tolerado</i>		
altura do furo partindo do plano primário	h	30,0 mm

No relativo à repetitividade de indexação das pontas, para a característica GPS.101, são consideradas *coordenadas significantes* apenas a coordenada x, na medição da

referência terciária, e as coordenadas x e y, na medição do elemento tolerado. Para a característica GPS.102, apesar de haver uma indexação da ponta para medir a referência secundária, não há um efeito de primeira ordem na medição, pois o plano secundário tem função de orientação apenas, e não localização. Se indexações fossem realizadas, e.g., entre as medições da referência terciária e do elemento tolerado, dever-se-ia então considerar a repetitividade de posicionamento da ponta.

Essencial também para a composição dos *balanços de incerteza característicos* é a completa parametrização das informações referentes às características GPS. A tabela 5.3 traz todas as informações necessárias para munir as equações definidas no capítulo 4 (ou possíveis derivações delas, conforme conteúdo dos apêndices correspondentes). Para tanto, assume-se haver concordância entre os sistemas de coordenadas da máquina e da peça, i.e., eixo z da máquina coincidindo com a normal ao plano primário, eixo y da máquina coincidindo com a normal ao plano secundário e eixo x da máquina coincidindo com a normal ao plano terciário.

Algo digno de nota neste momento é que os conteúdos das três tabelas referenciadas nos parágrafos anteriores deveriam resultar de atividades, em princípio, rotineiras, conduzidas pelo planejador da medição. Por conseguinte, pode-se interpretar ser a preparação propriamente dita dos *balanços de incerteza característicos*, seguindo os passos descritos no capítulo anterior, o único ônus realmente imposto ao metrologista industrial.

5.3.1 Os balanços de incerteza característicos resultantes

As estimativas das incertezas para as duas características GPS, dentro dos cenários definidos, resultantes da compilação das informações constantes nas tabelas 5.1-3, são dadas nas tabelas 5.4 e 5.5. Dos resultados por elas reportados, ratifica-se, no concernente aos efeitos aleatórios, a razoável concordância entre a incerteza estimada para o nível 2 e aquela observada experimentalmente, e a superestimação relativa da incerteza no nível 1, em virtude do teor pouco específico das informações utilizadas.

Em adição ao plano de medição descrito na tabela 5.1, para melhorar a análise dos efeitos sistemáticos, mediu-se a peça em outras duas orientações na mesa da CMM, giradas em $\pm 90^\circ$. Dos resultados obtidos pelos *balanços de incerteza característicos*

e pelo método experimental, para a característica GPS.102, verifica-se a superposição dos intervalos de incerteza em todas as situações (algumas marginalmente). Os casos marginais, por sua vez, não decorrem do emprego de informações genéricas, mas da não observância das especificações do equipamento (confirmada através de uma avaliação completa dos erros geométricos da CMM com uma placa de esferas).

Tabela 5.4: Balanço de incerteza para a característica GPS.102 indicada na figura A.2, dentro dos cenários A, nível primário de conhecimento, e B, nível intermediário de conhecimento (valores em micrometros).

Componente	Símbolo	Equação	Incerteza Padrão			
			Nível 1		Nível 2	
			i = 2	i = 3	i = 2	i = 3
<i>Posição do Eixo Nominal</i>	U_{en}	4.10	0,99	2,05	0,76	1,26
erros de geometria sistemáticos	$e_{en,em}$	4.23	---	---	0,97	0,16
erros de geometria residuais	$u_{en,em}$	4.2 (4.24)	0,65	1,63	0,65	0,96
erros de apalpação	$u_{en,ea}$	4.9	0,69	1,06	0,29	0,47
inclinação do plano	$u_{en,ea,pe}$	4.4	0,31	0,31	0,04	0,04
origem do sistema	$u_{en,ea,os}$	4.7	0,47	0,47	0,22	0,22
rotação do sistema	$u_{en,ea,rs}$	4.8	0,35	0,87	0,16	0,41
centróide do plano	$u_{en,ea,cp}$	4.6	0,19	0,19	0,09	0,09
temperatura de referência	$u_{en,ta}$	4.26	0,03	0,08	0,03	0,08
diferença de temperatura	$u_{en,td}$	4.27	0,26	0,65	0,26	0,65
<i>Posição dos Centros</i>	u_{pc}	4.13 (4.16)	0,47	0,47	0,28	0,28
plano de amostragem	$u_{pc,ea}$	4.12	0,47	0,47	0,28	0,28
<i>Incerteza Sistemática</i>	u_{cs}	4.31	0,70	1,75	0,70	1,16
<i>Incerteza Aleatória</i>	u_{ca}	4.32	0,84	1,16	0,41	0,55
<i>Tendência Estimada</i>	e	4.23	---	---	0,97	0,16
<i>Incerteza Resultante</i>	u	4.14	1,10	2,10	0,81	1,29
<i>Incerteza Expandida</i>	$U (k = 2,00)$		2,19	4,20	2,60	2,73
<i>Incerteza Referencial</i>						
tendência observada	$ b $		---		2,24	0,92
incerteza padrão da calibração	u_{cal}		---		0,69	0,66
desvio padrão das medições	u_p		---		0,32	0,46

Para a característica GPS.101, por se definir a origem do sistema de coordenadas como o ponto definido pela interseção do eixo do furo com o plano secundário, elementos estes medidos com a ponta na direção horizontal, tornam-se ainda mais re-

levantes as contribuições dos erros de rotação não desprezíveis da máquina. Estes, caso não sejam incluídos na avaliação da incerteza, podem provocar desvios significativos não assimilados pelos *balanços de incerteza característicos*. Quando considerados, inclusive para as situações mais críticas ilustradas na figura 5.7, observa-se uma superposição, no nível intermediário de conhecimento, dos intervalos de incerteza correspondentes.

Tabela 5.5: Balanço de incerteza para a característica GPS.101 indicada na figura A.2, nos casos A, nível primário de conhecimento, e B, nível intermediário de conhecimento (valores em micrometros).

Componente	Símbolo	Equação	Incerteza Padrão			
			Nível 1		Nível 2	
			i = 2	i = 3	i = 2	i = 3
<i>Posição do Eixo Nominal</i>	u_{en}	4.10	1,72	1,27	1,22	1,35
erros de geometria sistemáticos	$e_{en.em}$	4.23	---	---	0,94	0,77
erros de geometria residuais	$u_{en.em}$	4.2 (4.24)	1,25	1,02	1,07	1,28
erros de apalpação	$u_{en.ea}$	4.9	0,86	0,66	0,36	0,25
inclinação do plano	$u_{en.ea.pe}$	4.4	0,41	0,41	0,05	0,05
origem do sistema	$u_{en.ea.os}$	4.7	0,47	0,00	0,22	0,00
rotação do sistema	$u_{en.ea.rs}$	4.8	0,56	0,46	0,26	0,21
centróide do plano	$u_{en.ea.cp}$	4.6	0,19	0,24	0,09	0,11
temperatura de referência	$u_{en.ta}$	4.26	0,05	0,04	0,05	0,04
diferença de temperatura	$u_{en.td}$	4.27	0,42	0,34	0,42	0,34
indexação das pontas	$u_{en.rp}$	4.29	0,69	0,00	0,20	0,00
<i>Posição dos Centros</i>	u_{pc}	4.13 (4.16)	0,84	0,84	0,35	0,35
plano de amostragem	$u_{pc.ea}$	4.12	0,47	0,47	0,28	0,28
indexação das pontas	$u_{pc.rp}$	4.30	0,69	0,69	0,20	0,20
<i>Incerteza Sistemática</i>	u_{cs}	4.31	1,32	1,08	1,15	1,33
<i>Incerteza Aleatória</i>	u_{ca}	4.32	1,39	1,07	0,54	0,43
<i>Tendência Estimada</i>	e	4.23	---	---	0,94	0,44
<i>Incerteza Resultante</i>	u	4.14	1,92	1,52	1,27	1,40
<i>Incerteza Expandida</i>	$U (k = 2,00)$		3,83	3,04	3,48	3,57
<i>Incerteza Referencial</i>						
tendência observada	$ b $		---		1,17	4,23
incerteza padrão da calibração	u_{cal}		---		0,46	0,72
desvio padrão das medições	u_p		---		0,36	0,28

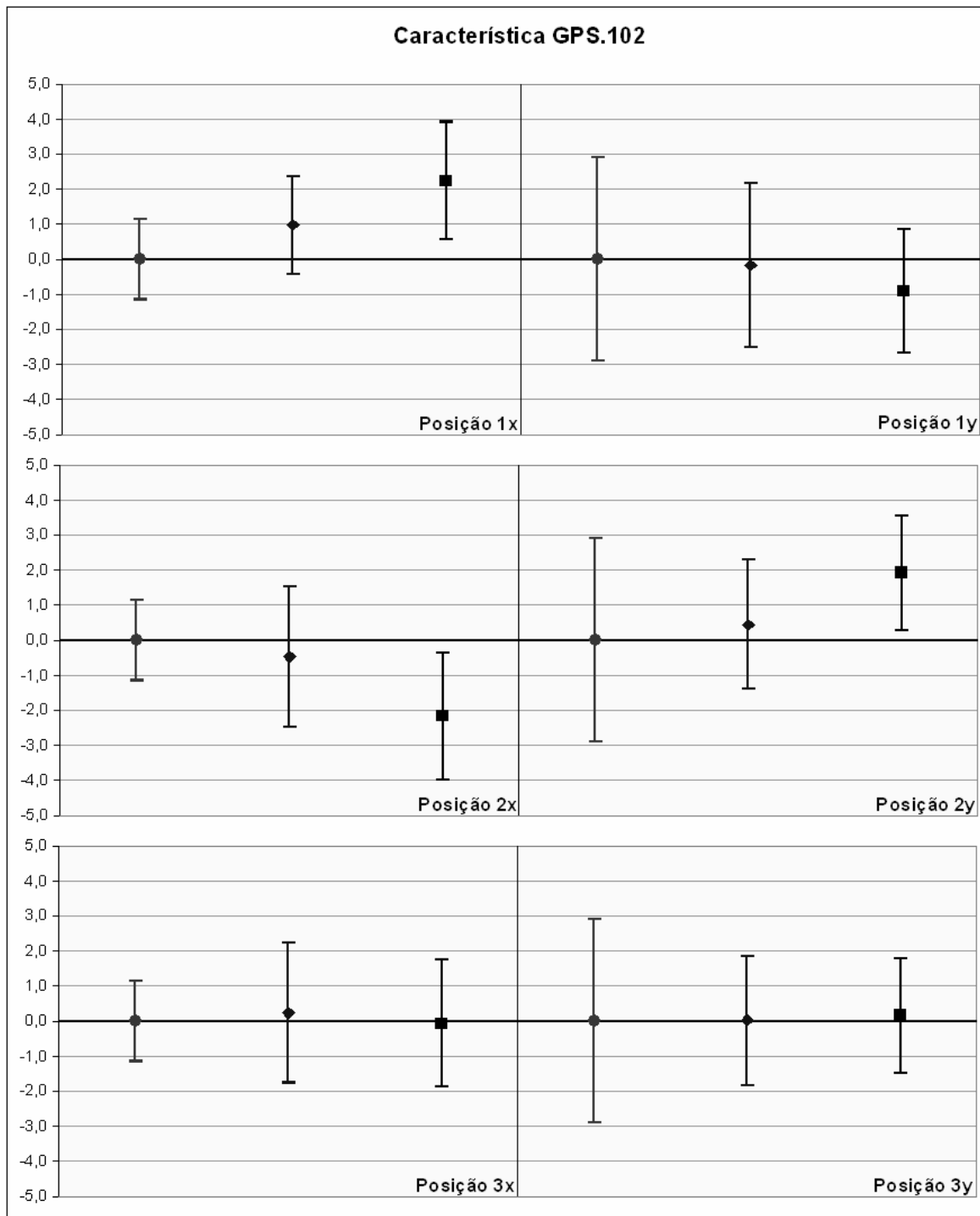


Figura 5.6: Tendências e as respectivas incertezas (associadas aos efeitos sistemáticos) para a característica GPS.102 nos níveis de conhecimento primário (círculo) e intermediário (losango), e no cenário de referência (quadrado) – valores em micrometros.

As várias situações apresentadas até aqui neste capítulo sinalizam a efetividade dos *balanços de incerteza característicos* para os propósitos do *modelo de integração da incerteza*. Para todos os casos avaliados, sempre que as informações que compõem um dado nível de conhecimento representam suficientemente bem uma determinada tarefa de medição, puderam ser observadas estimativas de incerteza coerentes, ante o método referencial, por parte dos *balanços de incerteza característicos*.

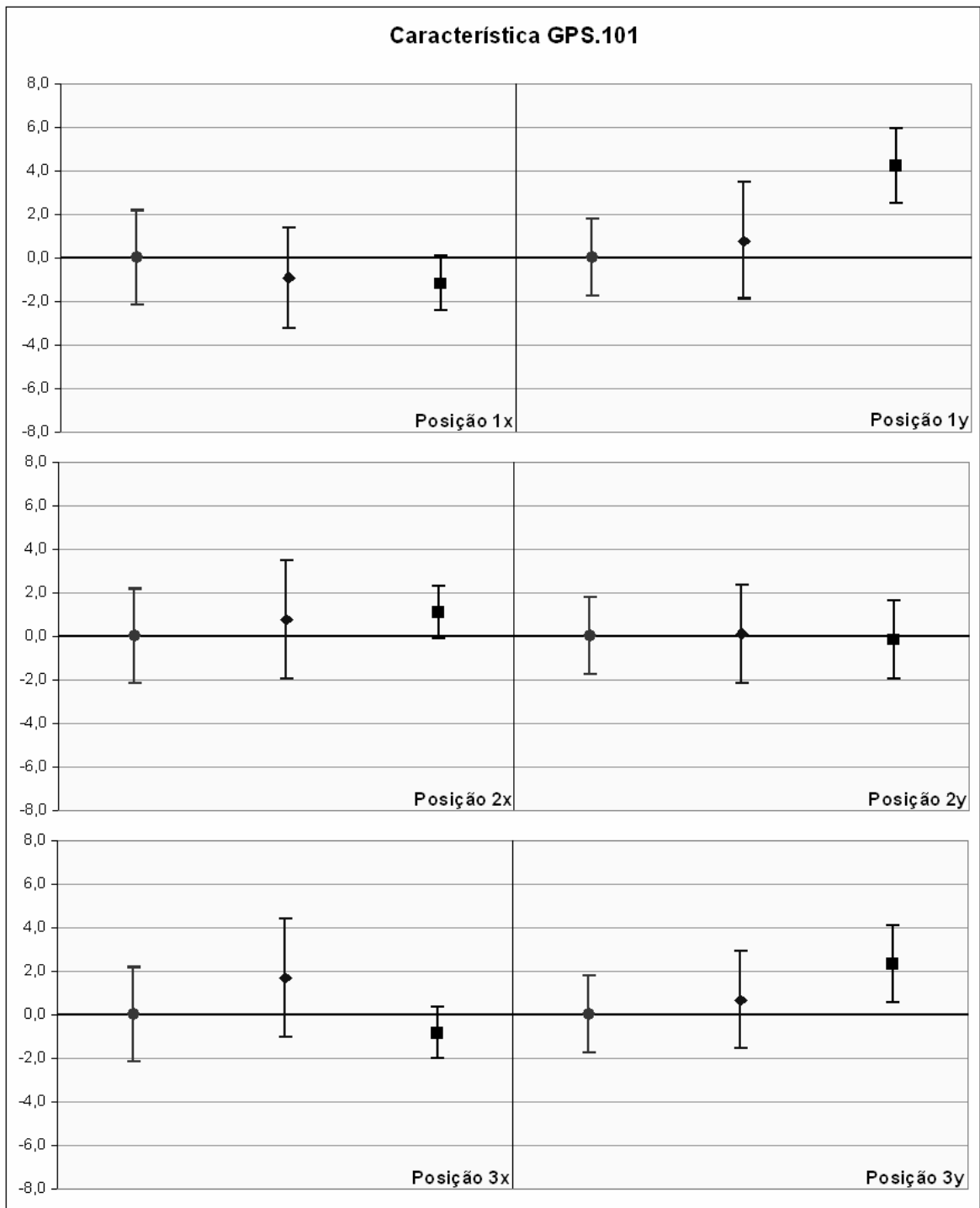


Figura 5.7: Tendências e as respectivas incertezas (associadas aos efeitos sistemáticos) para a característica GPS.101 nos níveis de conhecimento primário (círculo) e intermediário (losango), e no cenário de referência (quadrado) – valores em micrometros.

Por sua vez, violações das condições e simplificações definidas no capítulo anterior podem gerar estimativas de incerteza com baixa exatidão, indicando a necessidade, sempre levando em consideração os requisitos da aplicação, de avançar-se na direção do conhecimento. Exemplos em que as simplificações sugeridas poderiam causar estimativas otimistas da incerteza de medição foram apresentados, junto com alguns possíveis tratamentos que poderiam ser adotados para adequar o modelo ma-

temático da medição. Outra condição que pode ser violada na prática industrial refere-se àquela apresentada na subseção 4.2.2, i.e., o fato de a influência do erro de rolagem do eixo vertical não ser desprezível. O resultado de um ensaio de desempenho com ponta indexada, como o apresentado na texto da ASME B89.4.1, poderia ser usado para quantificar a magnitude desse fator de influência.

5.4 Sobre a premissa adotada: incerteza do método desprezível

Embora o exemplo discutido na seção anterior tenha sido suficientemente adequado para verificar a consistência dos *balanços de incerteza característicos*, da aplicação de parte do *modelo de integração da incerteza* a outras situações práticas, surgiram questões que precisam ser devidamente abordadas. Estas dizem respeito a uma das condições que cingem os *balanços de incerteza característicos*: a opção por um plano de verificação padrão e consistente com regras específicas.

Quando da concepção da sistemática proposta, tinha-se plena ciência de que ela se revelaria incapaz de valorar diretamente o componente de incerteza relativo ao método. Em princípio, isso não deveria constituir uma forte limitação à sistemática, dada a existência de documentos normativos que descrevem métodos de verificação para características GPS. Na maioria das situações práticas analisadas, entretanto, a incerteza do método despontava como o componente de incerteza dominante.

Para mensurar a diferença entre os métodos referencial e atual, as características de algumas peças cedidas por empresas foram avaliadas em uma CMM de referência, seguindo um plano de verificação compatível com as normas técnicas, e nas máquinas das respectivas empresas, seguindo as estratégias usuais de medição. Alguns dos resultados da comparação dos métodos são reportados na parte superior da figura 5.8. Os resultados se referem ao valor absoluto do erro normalizado, calculado, para cada característica, como segue:

$$E_n = \frac{|y_m - y_{ref}|}{\sqrt{U_m^2 + U_{ref}^2}} \quad (5.1)$$

onde y_m denota a média das medições realizadas na CMM da empresa, y_{ref} o valor referencial da característica, U_m a incerteza expandida associada ao valor atual (pro-

veniente do desvio padrão das medições) e U_{ref} a incerteza expandida associada ao valor referencial²⁶.

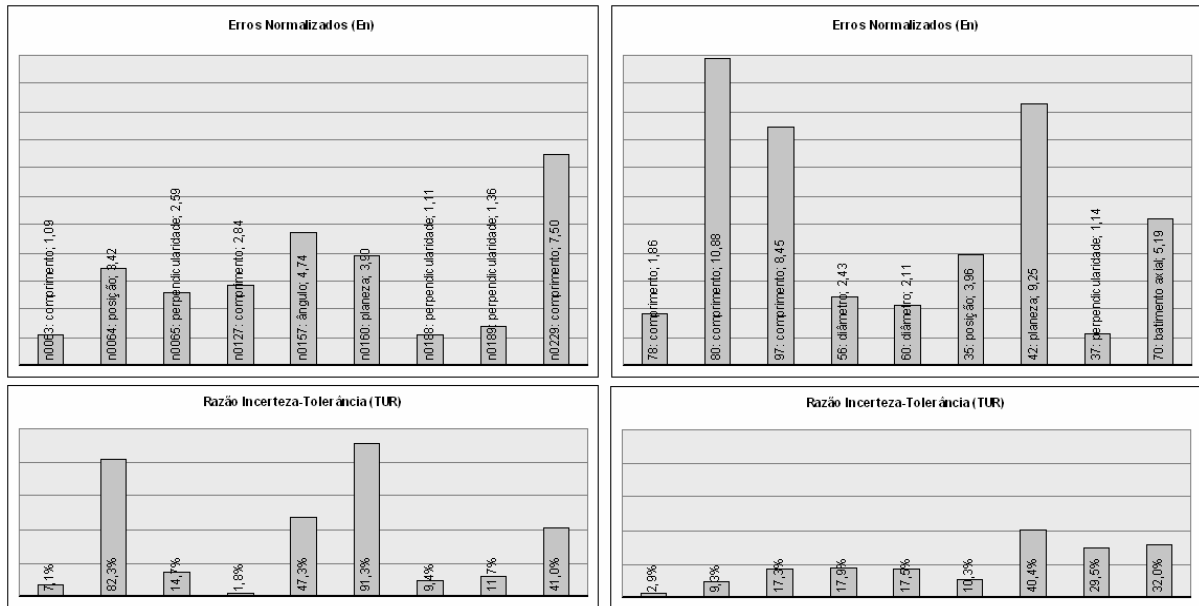


Figura 5.8: Erros normalizados absolutos para algumas características das peças de duas empresas (parte superior), os quais indicam uma forte divergência entre os métodos correto e simplificado; e o impacto na avaliação da conformidade (parte inferior).

Para todos os casos ilustrados, observam-se erros normalizados superiores ao valor limiar 1, indicando que as diferenças não podem ser explicadas apenas pelas incertezas consideradas. De fato, os números apenas confirmam um misto de descaso e desconhecimento por parte dos profissionais da metrologia industrial. As causas estão em estratégias de medição inapropriadas para avaliar as características GPS de peças geometricamente imperfeitas, tais como:

- avaliação da planeza de um elemento geométrico a partir da medição de quatro pontos aleatoriamente escolhidos;
- avaliação do diâmetro e da 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;

²⁶ Os resultados da comparação não exprimem apenas as divergências entre os métodos, pois incidem também, e.g., os erros geométricos das máquinas. Contudo, análises preliminares dos erros geométricos das máquinas evidenciaram a reduzida influência relativa deles.

e em incongruências que definitivamente deterioram a virtual solidez de um processo de medição por coordenadas, tais como:

- pouca importância dada ao processo de qualificação das pontas de medição;
- falta de discernimento quanto ao uso de múltiplas pontas e de longas hastes;
- falta de fluência na interpretação das informações dos desenhos técnicos;
- excessiva dependência das soluções oferecidas pelos softwares de avaliação.

O resultado efetivo das constatações acima torna-se ainda mais grave ao se verificar que, em muitos casos, os desvios tomam magnitudes significativas frente às respectivas tolerâncias das características (parte inferior da figura 5.8). Em algumas situações, inclusive, as medições de referência indicavam parâmetros GPS além dos limites especificados na documentação técnica do produto; parecer este, contudo, oposto àquele derivado das medições de rotina.

Como reflexo direto das questões apresentadas nesta seção, pode-se afirmar que as incertezas resultantes dos *balanços de incerteza característicos* podem não quantificar apropriadamente a qualidade de um determinado processo de medição, sempre que for significativa a parcela referente ao método. Isso, contudo, não põe em xeque o trabalho desenvolvido, mas sim reorienta o foco primário de atuação a problemas mais críticos, como o tratamento de vícios operacionais e mesmo gerenciais. O capítulo seguinte traz mais informações a respeito da temática “incerteza do método”.

CAPÍTULO 6

DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dois capítulos anteriores, que se dedicaram respectivamente à apresentação dos elementos constituintes e à aplicação total e parcial do *modelo de integração da incerteza* com o processo de realização do produto e da medição, deixaram, implícita ou explicitamente, algumas questões em aberto, relacionadas aos seguintes tópicos:

- relevância das incertezas da especificação e da correlação;
- tratamento da parcela da incerteza relativa ao método;
- seleção das técnicas dentro do *modelo de integração da incerteza*;
- vantagens e desvantagens do *modelo de integração da incerteza*.

os quais serão discutidos nas seções subseqüentes. Por fim, serão apresentadas algumas considerações a respeito do trabalho realizado e prognosticadas oportunidades futuras de atuação.

6.1 Considerações relativas à documentação técnica do produto

Conforme definido anteriormente, a incerteza da especificação refere-se à ambigüidade nos requisitos definidos pela especificação e a incerteza da correlação à imperfeita correspondência entre a especificação e a função pretendida da peça. Embora ambos os componentes não sejam resultado, em princípio pelo menos, de decisões do metrologista industrial, não estando, portanto, no escopo da metodologia descrita

nos capítulos anteriores, considera-se importante relatar algumas das situações verificadas durante a aplicação do *modelo de integração da incerteza*.

A primeira delas vai ao encontro da seguinte afirmação de Hetland [162]: “aproximadamente 80% dos desenhos não representam o atual intento do projeto”, i.e., apresentam uma incerteza da correlação não desprezível. Muitas das características dimensionais e geométricas especificadas nos desenhos das peças incluídas nas análises feitas no capítulo anterior exibiam especificações no mínimo discutíveis, fossem os problemas relacionados aos valores definidos e/ou à própria representatividade da tolerância.

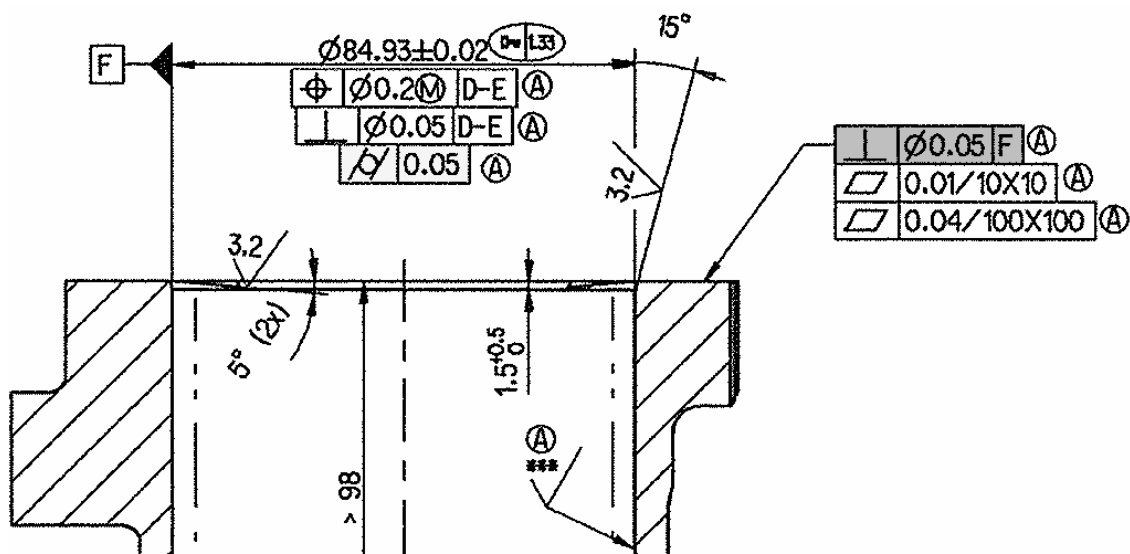


Figura 6.1: Excerto do desenho técnico dum produto que traz casos potenciais de incerteza da correlação (realçados em cinza claro – cilindridade, e escuro – orientação).

Duas situações típicas podem ser observadas no excerto do desenho técnico de um produto mostrado na figura 6.1. Realçado em cinza claro, tem-se uma especificação de cilindridade com valor superior ao intervalo de tolerância definido para o diâmetro do furo; em cinza escuro, uma especificação de perpendicularidade de um eixo (salientada pelo símbolo de diâmetro) aplicado a um plano. Uma outra situação comumente observada refere-se ao refinamento de uma tolerância de posição com uma tolerância de orientação (p.ex., perpendicularidade) e uma tolerância de forma (p.ex., retitude), onde não se atende um dos princípios fundamentais do toleranciamento: que as tolerâncias de forma precisam ser inferiores às de orientação, e que as tolerâncias de orientação precisam ser inferiores às tolerâncias de localização; a fim de realmente adicionar algum requisito às especificações do produto [163].

A segunda constatação refere-se aos vários casos evidenciados de incerteza da es-

pecificação (ambigüidade) em desenhos técnicos. Na figura 6.2, verificam-se especificações dimensionais em situações onde o mais apropriado seria adotar tolerâncias geométricas de posição (identificadas com losangos), e definições de diâmetros que se tornam ambíguas sempre que os elementos geométricos da peça exibem desvios de forma não desprezíveis (identificadas com quadrados). É ainda contestável a definição de uma concentricidade (em cinza escuro), por ser mais adequada, inclusive para os fins da posterior verificação, uma tolerância de posição.

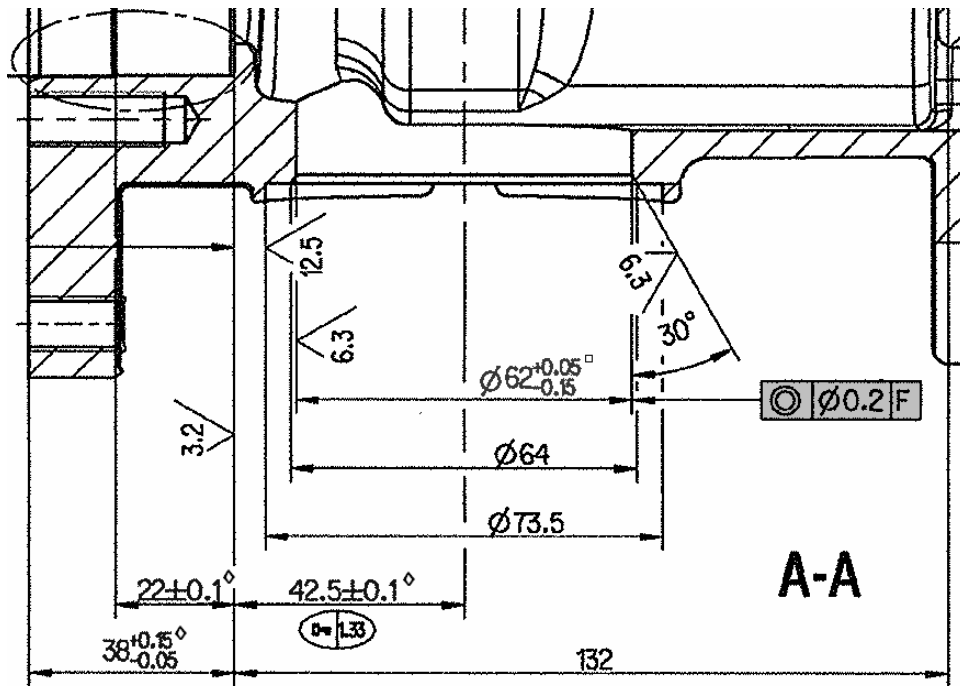


Figura 6.2: Excerto do desenho técnico de um produto que traz casos potenciais de incerteza da especificação.

Por sua vez, cabe salientar que uma porção dos problemas identificados acima não resultam necessariamente de equívocos por parte do projetista, mas da incapacidade de as linguagens atuais de dimensionamento e toleranciamento geométrico tratarem alguns aspectos. Os futuros desenvolvimentos do ISO/TC-213 tendem a mitigar esses problemas, desde que atenção muito especial seja também dada à capacitação de profissionais.

6.2 Considerações relativas à incerteza do método

No que concerne o metrologista industrial, a incerteza do método desponta como um ponto de extrema relevância na composição da incerteza de medição. Embora a e-

xistência de ambigüidades nos desenhos técnicos contribua de alguma forma para decisões equivocadas por parte do metrologista industrial, os resultados introduzidos na seção 5.4 evidenciam uma natureza mais abrangente ao problema. Por sinal, em muitos casos, a seguinte indagação vem à tona: “por que as medições são realmente executadas?”.

A presença de erros que podem ser classificados como grosseiros, demonstra que a problemática da avaliação da incerteza, tópico do trabalho desenvolvido, assume um papel em geral secundário²⁷, sendo de primeira importância o foco em programas de capacitação de pessoal em metrologia por coordenadas. Têm-se observado algumas iniciativas nessa direção, como os programas internacionais AUKOM²⁸ e EUKOM²⁹, que podem conduzir a um estado ideal onde a divergência entre métodos resulte de ações propositais do metrologista industrial, e não do puro desconhecimento.

Deixando de lado a questão dos erros grosseiros, até porque o próprio GUM declara que “medidas de incerteza não são projetadas para levar em conta tais erros”, o *modelo de integração da incerteza* proposto trata o problema em seu nível de conhecimento mais avançado, supostamente aquele em que a incerteza do método pode ter maior impacto. Para as técnicas puramente experimentais, a opção por uma *calibração de referência*, seguida de uma *calibração de transferência*, i.e., replicando a estratégia de medição do usuário, porém sob condições que permitem reduzir a incerteza da execução; permite quantificar individualmente as incertezas do método e da execução.

Por fim, entende-se que os experimentos com peças de produção, dentro do escopo de calibração, despontam como a alternativa mais conveniente, embora esteja inerente a ela um custo mais elevado, que deve ser ponderado com base nas variáveis que definem o diagrama da figura 6.3. Em aplicações críticas, o conhecimento da incerteza do método torna-se essencial inclusive para direcionar esforços de melhoria do processo de medição. Outra forma de quantificá-la, embora fora do escopo definido para este projeto de tese, seria a constituição de complexos algoritmos de simu-

²⁷ A mesma consideração pode ser estendida às soluções comerciais VCMM e PUNDIT/CMM, que também desconsideram a problemática da incerteza do método.

²⁸ Manufacturer-Neutral Training in Coordinate Metrology (Programa Independente de Formação de Pessoal em Metrologia por Coordenadas) [164].

²⁹ European Training in Coordinate Metrology (Programa Europeu de Formação de Pessoal em Metrologia por Coordenadas) [165].

lação [166], os quais trazem, por seu turno, desvantagens com respeito ao tempo de simulação e à própria validade dos modelos matemáticos adotados para os distintos componentes de incerteza.

6.3 Seleção das técnicas no modelo de integração da incerteza

A característica principal do *modelo de integração da incerteza* refere-se à aplicação de diferentes técnicas de avaliação da incerteza, selecionadas com base em alguns parâmetros/elementos (vide figura 6.3). A definição de critérios unívocos, capazes de expressar de forma quantitativa as informações do esquema citado, por consequência, poderia agregar considerável valor ao trabalho apresentado.

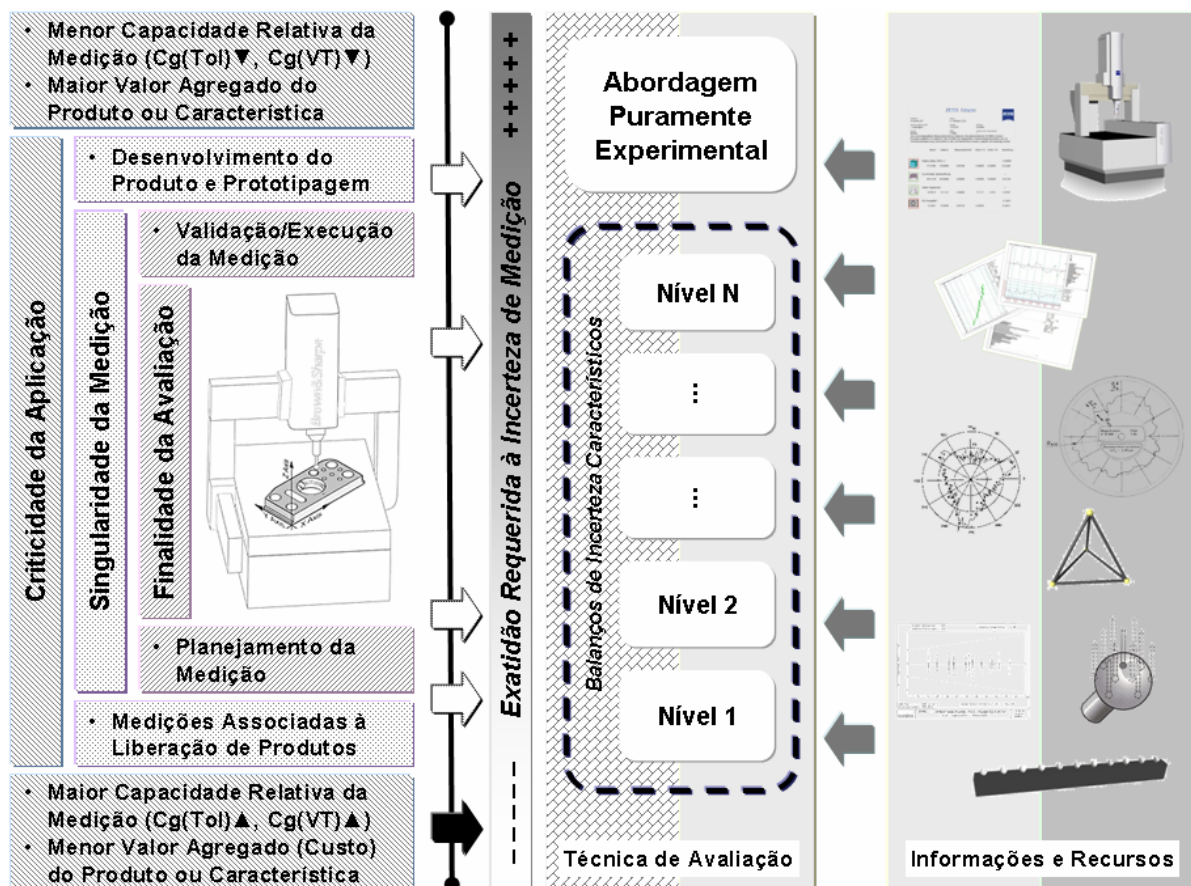


Figura 6.3: Exatidão requerida à incerteza de medição em função dos fatores finalidade da avaliação, criticidade da aplicação e singularidade da medição (as particularidades da tarefa de medição determinam a posição da seta sobre a guia e, por consequente, o grau de exatidão para a incerteza de medição).

Por outro lado, entende-se que o parâmetro criticidade da aplicação depende, como mínimo, de alguns fatores determinísticos, como a capacidade do processo de fabricação e o valor intrínseco do produto, e outros flutuantes, como as disponibilidades

financeiras e as perspectivas de mercado. Em princípio, portanto, poder-se-ia fazer uso, e.g., de uma matriz de Kepner-Tregoe para reunir, e devidamente ponderar, ao menos, os fatores levantados; e algum critério de decisão poderia ser gerado quando combinado com os outros dois elementos caracterizados exibidos na figura 6.3: finalidade da avaliação e singularidade da medição.

No entanto, a criticidade da aplicação e, por conseguinte, a exatidão requerida à estimativa da incerteza de medição, relaciona-se ainda com a capacidade relativa do processo de medição. Em outros termos, a composição de um critério sólido de decisão estaria intimamente vinculada ao conhecimento *a priori* (da melhor estimativa) da *incerteza verdadeira* ou mesmo da credibilidade de uma determinada estimativa da incerteza, constituindo uma forma de referência circular. Assim, considera-se que o esquema da figura 6.3 representa apenas uma tentativa em expressar de forma qualitativa as variáveis que fomentam a definição da técnica mais adequada para avaliar a incerteza, sendo de certa forma subjetiva a sua efetiva escolha.

6.4 Análise crítica do modelo de integração da incerteza

Durante a constituição do *modelo de integração da incerteza*, tendo a matriz de escores da tabela 4.1 como base, buscou-se atender, a partir da opção pelos *balanços de incerteza característicos*, as propriedades adaptabilidade, autonomia e transparência, as quais podem ser entendidas como naturais ao método de avaliação da incerteza explicitado no GUM clássico. A introdução de uma sistemática concisa para a formação dos balanços de incerteza, por sua vez, trouxe consigo outro aspecto relevante: a economicidade. Todos os balanços de incerteza apresentados não exigiram recursos além daqueles contidos em planilhas eletrônicas prontamente disponíveis nas empresas, e não há empecilho algum em fazer uso de recursos de acesso remoto.

Embora o domínio de aplicação tenha sido convenientemente ajustado para o propósito deste documento, a extensão dos conceitos a outros tipos de características GPS, e.g., tolerâncias de perfil usadas para controlar posição e batimento circular na direção axial, pode ser considerada trivial. Em qualquer caso, porém, a técnica de avaliação da incerteza escolhida traz como potencial vantagem o fato de exigir que o metrologista industrial raciocine sobre o problema de medição, mesmo que os *ba-*

lanços de incerteza característicos sejam providos por terceiros, dada a relativa transparência da abordagem. Em outros termos, o metrologista industrial passa a ser potencialmente mais crítico com respeito às decisões pré-medição e pós-medição. A propósito, esse fato pode ser inclusive explorado por programas de capacitação de pessoal em metrologia por coordenadas.

Por outro lado, alguns fatores limitantes podem ser também atribuídos aos *balanços de incerteza característicos*: dificuldade de quantificar a incerteza do método efetivamente empregado pelo metrologista e dificuldade em lidar com elementos geométricos parciais. O primeiro fator já foi discutido na seção 6.2, e pode-se considerá-lo de segunda importância sempre que erros grosseiros não sejam cometidos pelo metrologista industrial. O segundo, por outro lado, impossibilita o uso direto das expressões apresentadas no apêndice C e dificulta sobremaneira a determinação dos coeficientes de sensibilidade associados aos parâmetros dos elementos geométricos em função da estratégia de amostragem. Por outro lado, experimentos podem ser realizados para estimá-los, sendo a combinação dos componentes de incerteza relativamente trivial.

Noutra vertente, é importante destacar que o metrologista industrial pode tirar proveito de métodos (de medição) por substituição para elementos geométricos dimensionáveis, em detrimento dos *balanços de incerteza característicos*, principalmente em situações onde se torna necessário a individualização dos componentes de erro de posicionamento e perpendicularidade da CMM.

Com respeito aos procedimentos experimentais inseridos no *modelo de integração da incerteza*, deixando de lado o fator limitante custo (já discutido), a possibilidade de serem desmembradas as incertezas do método e da execução garante ao método uma transparência dificilmente alcançada por outros meios, e subsidia o metrologista industrial nas ações de melhoria no processo de medição. Dentro dessa perspectiva, é importante que o relatório de calibração informe, além dos valores encontrados e as incertezas correspondentes, as estratégias de medição e avaliação das características GPS adotadas na calibração de referência e de transferência.

Embora nos exemplos demonstrados nos capítulos não se tenha considerado a posição da peça no volume da máquina, mas somente a orientação dela com respeito ao sistema de coordenadas da máquina, com ínfimas modificações no método poder-se-ia incluir essa variável. Entretanto, o nível de exatidão da incerteza permane-

ceria o mesmo a menos que fosse alterada a forma de consideração dos erros de escala da máquina (não mais como um fator linear). Assim, sempre que um fator linear não representar apropriadamente os erros de escala, o ideal é que um método alternativo seja empregado, e.g., uso de peças calibradas. Recomendação similar se aplica aos casos onde se suspeita que os erros de retitude e rotação da CMM assumem magnitudes não desprezíveis para o problema de medição.

6.5 Considerações finais

Dentre as várias temáticas que demandam iniciativas na metrologia por coordenadas clássica, merece especial destaque a introdução efetiva do conceito de incerteza de medição na rotina industrial, conforme cenário identificado nos primeiros capítulos deste documento. O *modelo de integração da incerteza* apresentado busca estimular o uso da incerteza de medição em distintas situações, e deve ser interpretado como uma compilação específica dos preceitos da ISO/TS 14253-2 e da ISO 10012.

A preferência pelas técnicas de avaliação da incerteza propostas no GUM clássico partiu do atendimento de um conjunto de requisitos considerados fundamentais para uma solução destinada ao meio industrial, embora seja necessário deixar claro que o uso de outras técnicas pode também ser ponderado. Contudo, às técnicas clássicas têm-se associado limitações as mais variadas, que orientaram o desenvolvimento de estratégias específicas.

Entende-se que a formalização de instruções para a preparação dos *balanços de incerteza característicos* constitui um dos aportes relevantes desta pesquisa. Testados em mensurandos de diferentes tipos, e sob níveis de conhecimento distintos, os resultados mostraram, em geral, razoável concordância com os valores referenciais. O uso do termo “razoável” deve ser entendido da seguinte maneira: estimativas de incerteza derivadas de níveis de conhecimento elementares normalmente possuem um grau de exatidão inferior, o que, por sua vez, não implica estimativas otimistas ou conservativas da incerteza; à medida que se avança na direção do conhecimento, as estimativas tendem a se aproximar do valor hipoteticamente verdadeiro da incerteza.

No concernente aos métodos experimentais, que possuem um caráter específico e, por conseguinte, um nível de exatidão da incerteza potencialmente mais elevado, as

estratégias propostas para contemplar os efeitos associados à realização imperfeita da definição do mensurando mostram-se simples e eficazes. Em medições críticas, o uso de peças calibradas poderia dar subsídios para diminuir a incerteza do método, componente dominante em muitas das situações práticas estudadas.

Por último, mas não menos importante, visionam-se oportunidades futuras de atuação na temática “avaliação da incerteza em medições por coordenadas”, a saber:

- promover o uso de especificações e testes de aceitação mais abrangentes, que também, e principalmente, beneficiem o metrologista industrial, e.g., fornecendo informações mais específicas e reveladoras, e não apenas os fabricantes;
- incentivar a boa prática das verificações periódicas (e suficientemente rápidas) das máquinas de medição por coordenadas, a fim de confirmar um estado previamente estabelecido;
- enfatizar os programas de formação de pessoal em medição por coordenadas, para que se possa extrair o máximo da tecnologia;
- criar uma cultura de venda de soluções em metrologia, e não somente de equipamentos de medição pelos fabricantes, i.e., por solução se entende a preocupação com fatores extrínsecos à máquina de medição por coordenadas;
- expandir os *balanços de incerteza característicos* para outros mensurandos não explorados neste trabalho, dentro ou fora do domínio de aplicação definido;
- inserir os *balanços de incerteza característicos* e as ferramentas desenvolvidas para a abordagem experimental em um aplicativo para uso pelos metrologistas industriais (de acesso remoto ou não).

REFERÊNCIAS

- [1] A. R. Sousa, C. A. Schneider, *Recomendações para uma Utilização Eficiente e Confiável da Tecnologia de Medição por Coordenadas*. Revista Máquinas & Metais, pp. 114-127, maio 2001.
- [2] ISO GUM, *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. Published Jointly by BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, Geneva, Switzerland, 1995.
- [3] AIAG, ASQ, *Advanced Product Quality Planning & Control Plan (APQP)*. Reference Manual, First Edition, Automotive Industry Action Group, Troy, MI, USA, 1995.
- [4] 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.
- [5] S. K. Kimothi, *The Uncertainty of Measurements – Physical and Chemical: Metrology Impact and Analysis*. ASQ Quality Press, Milwaukee, WI, USA, 2002.
- [6] AIAG, ASQ, *Measurement Systems Analysis (MSA)*. Reference Manual, Third Edition, Automotive Industry Action Group, Troy, MI, USA, 2002.
- [7] H. S. Nielsen, *Using the ISO "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements" to Determine Calibration Requirements*. NCSL Workshop and Symposium, Atlanta, GA, USA, July 1997.
- [8] ISO 10012:2003, *Measurement Management Systems – Requirements for Measurement Processes and Measuring Equipment*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [9] ISO/TS 14253-2:1999, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Inspection by Measurement of Workpieces and Measuring Equipment – Part 2: Guide to the Estimation of Uncertainty in GPS Measurement, in Calibration of Measuring Equipment and in Product Verification*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [10] ISO/TS 15530-3:2004, *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.
- [11] Draft ISO/TS 15530-2:2005, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Coordinate Measuring Machines (CMM): Techniques for Determining the Uncertainty of Measurement – Part 2: Use of Multiple Measurement Strategies in Calibration of Artefacts*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [12] Draft ISO/TS 15530-4:2005, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Coordinate Measuring Machines (CMM): Techniques for Determining the Uncertainty of Measurement – Part 4: Evaluating Task-Specific Measurement Uncertainty Using Simulation*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [13] Draft ISO/TS 15530-5:2002, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Coordinate Measuring*

Machines (CMM): Techniques for Determining the Uncertainty of Measurement – Part 5: Use of Expert Judgement, Sensitivity Analysis and Error Budgeting. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

- [14] NIST/SEMATECH, *e-Handbook of Statistical Methods*. Chapter 6, Section 1.1. Available from <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pmc/section1/pmc11.htm> [Accessed 12 February 2007].
- [15] T. Pfeifer, *Qualitätsmanagement: Strategien, Methoden, Techniken*. Carl Hanser Verlag München Wien, 1996.
- [16] P. B. Crosby, *Quality Is Free: The Art of Making Quality Certain*. McGraw-Hill Companies, New York, NY, USA, 1979.
- [17] J. Peters, *Metrology in Design and Manufacturing – Facts and Trends*. Annals of the CIRP, Keynote Paper, Vol. 26/2/1977, pp. 415-421.
- [18] H. Kunzmann, et al., *Productive Metrology: Adding Value to Manufacture*. Annals of the CIRP, Vol. 54/2/2005, pp. 691-704.
- [19] C. Dotson, R. Harlow, R. L. Thompson, *Coordinate Measuring Machines*. In: *Fundamentals of Dimensional Metrology*, Chapter 17, Published by Thomson Delmar Learning, Fourth Edition, August 2002.
- [20] W. Tandler, *The Impact of GD&T on CMM Based Assessment of Functional Product Quality versus Manufacturing Process Quality*. ACMC Annual General Meeting and Workshop, Ottawa, ON, Canada, June 2001.
- [21] C. J. Evans, R. J. Hocken, W. T. Estler, *Self-Calibration: Reversal, Redundancy, Error Separation and 'Absolute Testing'*. Annals of the CIRP, Keynote Paper, Vol. 45/2/1996, pp. 617-634.
- [22] S. Osawa, et al., *Multiple Orientation Technique for the Calibration of Cylindrical Workpieces on CMMs*. Precision Engineering, Vol. 29, No. 1, pp. 56-64, January 2005.
- [23] A. Weckenmann, et al., *Functionality-Oriented Evaluation and Sampling Strategy in Coordinate Metrology*. Precision Engineering, Vol. 17, No. 4, pp. 244-252, October 1995.
- [24] ISO 10360-1:2000, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Acceptance and Reverification Tests for Coordinate Measuring Machines (CMM) – Part 1: Vocabulary*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [25] Hexagon Metrology, *PMM-C Infinity – La Precisión Perfecta. ... A Medida*, No. 4, pp. 15-16, febrero 2007. Available from www.hexagon.es [Accessed 25 July 2007].
- [26] 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.
- [27] ASME B89.4.1:1997, *Methods for Performance Evaluation of Coordinate Measuring Machines*. The American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, USA.
- [28] VDI/VDE 2617-2.1:1986, *Genauigkeit von Koordinatenmeßgeräten; Kenngrößen und deren Prüfung; Meßaufgabenspezifische Meßunsicherheit; Längenmeßunsicherheit*. VDI-Verlag,

Düsseldorf, Deutschland.

- [29] M. Abbe, *Recent Developments of Mitutoyo in Coordinate Metrology, and the View about Future Trends in Its Development*. International Conference on Industrial Dimensional Metrology, Bilbao, Spain, April 2005.
- [30] Hexagon Metrology GmbH, *Die ISO 10360*. Available from <http://www.leitz-metrology.de> [Accessed 08 October 2007].
- [31] D. Hüser-Teuchert, et al., *Calibration of Coordinate Measuring Machines Based on Ball Plates*. Proceedings of the Thirteenth IMEKO World Congress, Vol. 3, pp. 1646-1651, Torino, Italy, 1994.
- [32] D. Flack, *CMM Measurement Strategies*. Measurement Good Practice Guide No. 41, July 2001.
- [33] J. G. Salsbury, *Performance of CMMs: Testing, Calibration, and Uncertainty*. Mitutoyo America Corporation, February 2001.
- [34] 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.
- [35] R. Hocken, et al., *Three Dimensional Metrology*. Annals of the CIRP, Keynote Paper, Vol. 26/2/1977, pp. 553-563
- [36] M. Zhang, *Eine Methodik zur Erfassung und Korrektur der Qualitätsfähigkeitsparameter von fertigungsintegrierten Koordinatenmeßgeräten*. Dissertation, RWTH Aachen, 1994.
- [37] P. Schellekens, et al., *Development of Methods for the Numerical Error Correction of Machine Tools*. Final Project Report, Publication No EUR 15377 EN of the Commission of the European Communities, Brussels-Luxembourg, 1993.
- [38] K. Busch, H. Kunzmann, F. Wäldele, *Calibration of Coordinate Measuring Machines*. Precision Engineering, Vol. 7, No. 3, pp. 139-144, July 1985.
- [39] E. Trapet, *Interim Checking of Coordinate Measuring Instruments – Responsibility of the User*. APMC Annual General Meeting and Workshop, Hamilton, ON, Canada, June 2005.
- [40] A. Weckenmann, et al., *Geometrical Product Specifications – Course for Technical Universities*. Warsaw University of Technology Printing House, 2001.
- [41] A. Weckenmann, M. Knauer, T. Killmaier, *Uncertainty of Coordinate Measurements on Sheet-Metal Parts in the Automotive Industry*. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 115, No. 1, pp. 9-13, August 2001.
- [42] W. Knapp, *Measurement Uncertainty on Coordinate Measuring Machines*. Proceedings of the Sixth ISMQC (International Symposium on Metrology and Quality Control), pp. 331-335, Vienna, Austria, September 1998.
- [43] Mitutoyo Sul Americana, *Condições Gerais de Fornecimento e Instalação: Beyond Crysta C 574/7106/9168*.
- [44] E. Trapet, F. Wäldele, *Koordinatenmeßgeräte in der Fertigung – Temperatureinflüsse und erreichbare Meßunsicherheit*. VDI-Berichte 751, pp. 209-227, 1989.

- [45] K. Busch, *Environmental Conditions and Their Effects on CMM Accuracy*. ACMC Annual General Meeting and Workshop, Oshawa, ON, Canada, September 1996.
- [46] J. G. Salsbury, *Uncertainty of the Coordinate Measurement Process Due to Unwanted Asperities*. Proceedings of ASPE Eleventh Annual Conference, American Society for Precision Engineering, Vol. 14, pp. 664-667, Monterey, CA, USA, November 1996.
- [47] R. P. Henke, et al., *Methods for Evaluation of Systematic Geometric Deviations in Machined Parts and Their Relationships to Process Variables*. Precision Engineering, Vol. 23, No. 4, pp. 273-292, October 1999.
- [48] ASME Y14.5M:1994, *Dimensioning and Tolerancing*. The American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, USA.
- [49] ISO 1101:2004, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Geometrical Tolerancing – Tolerances of Form, Orientation, Location and Run-out*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [50] K. D. Summerhays, et al., *Dimensional Inspection Techniques Specification – Planar Face and Datum Features with Addendum on Opposite Parallel Plane Features*. Final Report to CAM-I, October 1994.
- [51] K. D. Summerhays, et al., *Optimizing Discrete Point Sample Patterns and Measurement Data Analysis on Internal Cylindrical Surfaces with Systematic Form Deviations*. Precision Engineering, Vol. 26, No. 1, pp. 105-121, January 2002.
- [52] H. S. Nielsen, *CMMs and Proficiency Testing*. International Dimensional Workshop, Knoxville, TN, USA, May 2002.
- [53] 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.
- [54] C. W. Brown, *Dimensional Inspection Techniques for Sample-Point Measurement Technology*. Precision Engineering, Vol. 14, No. 2, pp. 110-111, April 1992.
- [55] A. J. Abackerli, B. P. Butler, M. G. Cox, *Optimum Probing Strategies: Determining and Using Underestimation Factors*. Workshop on Traceability of Coordinate Measuring Machines, Braunschweig, Germany, October 1997.
- [56] B. P. Butler, M. G. Cox, *Optimum Probing Strategies: Analysis of the GKN Technology Sphere Data*. Workshop on Traceability of Coordinate Measuring Machines, Braunschweig, Germany, October 1997.
- [57] D. A. Swyt, S. D. Phillips, J. W. Palmateer, *Developments at NIST on Traceability in Dimensional Measurements*. In: Recent Developments in Traceable Dimensional Measurements, Edited by J. E. Decker, N. Brown, Proceedings of SPIE, Vol. 4401, pp. 245-252, October 2001.
- [58] S. D. Phillips, *Measurement Uncertainty and Traceability Issues in National and International Measurements*. International Dimensional Workshop, Nashville, TN, USA, May 2003.
- [59] ISO VIM, *International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology*. Published Jointly

- by BIPM, IEC, FCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, Geneva, Switzerland, 1993.
- [60] JCGM/WG 2, *International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM)*. Third Edition, Document N318, Final Draft, August 2006.
- [61] S. D. Phillips, *Traceability, Calibration, and Measurement Uncertainty Issues Regarding Coordinate Measuring Machines and Other Complex Instruments*. APMC Annual General Meeting and Workshop, Niagara-on-the-lake, ON, Canada, June 2000.
- [62] B. Belanger, et al., *Traceability: An Evolving Concept*. In: *A Century of Excellence in Measurements, Standards, and Technology – A Chronicle of Selected NBS/NIST Publications 1901-2000*, Edited by D. R. Lide, NIST Special Publication 958, pp. 167-171, Gaithersburg, MD, USA, January 2001.
- [63] K. D. Sommer, M. Kochsiek, B. R. L. Siebert, *A Consideration of Correlation in Modelling and Uncertainty Evaluation of Measurements*. NCSL-I Workshop and Symposium, Salt Lake City, UT, USA, July 2004.
- [64] P. Stein, *Statistical Issues in Measurement*. ASQ Statistics Division Newsletter, Special Publication, July 2002.
- [65] K. D. Summerhays, et al., *A Versatile Tool for the Evaluation of CMM Task-Specific Measurement Uncertainty*. APMC Annual General Meeting and Workshop, Hamilton, ON, Canada, June 2005.
- [66] ISO/IEC 17025:2005, *General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [67] ISO 9001:2000, *Quality Management Systems – Requirements*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [68] 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.
- [69] ISO 14253-1:1998, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Inspection by Measurement of Workpieces and Measuring Equipment – Part 1: Decision Rules for Providing Conformance or Non-conformance with Specification*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [70] ASME B89.7.3.1:2001, *Guidelines for Decision Rules: Considering Measurement Uncertainty in Determining Conformance to Specifications*. The American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, USA.
- [71] S. D. Phillips, *Measurement Uncertainty, CMMs, and Standards: Today and the Future*. APMC Annual General Meeting and Workshop, Hamilton, ON, Canada, June 2005.
- [72] H. S. Nielsen, *ISO 14253-1 Decision Rules – Good or Bad?*. NCSL-I Workshop and Symposium, Charlotte, NC, USA, July 1999.
- [73] EAL-G17, *Coordinate Measuring Machine Calibration*. European Cooperation for Accreditation of Laboratories, January 1995.

- [74] JCGM/WG 1, *Evaluation of Measurement Data – Supplement 1 to the “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement” – Propagation of Distributions Using a Monte Carlo Method*. First Edition, Final Draft, September 2006.
- [75] H. J. Neumann, *Industrial Coordinate Metrology: Ten Years of Innovations*. Verlag Moderne Industrie, 2000.
- [76] H. Schwenke, et al., *Assessment of Uncertainties in Dimensional Metrology by Monte Carlo Simulation: Proposal of a Modular and Visual Software*. Annals of the CIRP, Vol. 49/1/2000, pp. 395-398.
- [77] N. Cross, *Uncertainties for CMMs: Showing You How*. INSPEX Exhibition, Birmingham, UK, September 2004.
- [78] J. G. Salsbury, *A Simplified Methodology for the Uncertainty Analysis of CMM Measurements*. SME Precision Metrology/Applying Imaging & Sensing, Technical Paper, pp. 1-22, Indianapolis, IN, USA, June 1995.
- [79] M. Hernla, *Messabweichungen einfach abschätzen*. QZ Qualität und Zuverlässigkeit, Vol. 45, No. 4, pp. 458-464, April 2000.
- [80] M. Hernla, *Mathematisch exakt anstatt empirisch vage*. Ergänzung zu QZ Qualität und Zuverlässigkeit, Vol. 46, No. 11, pp. 1-5, November 2001.
- [81] R. G. Wilhelm, R. Hocken, H. Schwenke, *Task Specific Uncertainty in Coordinate Measurement*. Annals of the CIRP, Keynote Paper, Vol. 50/2/2001, pp. 553-563.
- [82] W. Lotze, *Unsicherheit des Ausgleichskreises aus Koordinatenmessungen*. Feingerätetechnik, Vol. 32, No. 2, pp. 72-75, 1983.
- [83] W. Lotze, *Ausgleichskreis in der Koordinatenmeßtechnik*. Feingerätetechnik, Vol. 30, No. 12, pp. 538-542, 1981.
- [84] M. Hernla, *Aufgabenspezifische Unsicherheit von Koordinatenmessungen: Vergleich von Verfahren zur Meßunsicherheitsbestimmung*. Available from <http://www.dr-hernla.de> [Accessed 15 February 2007].
- [85] FIAT-GM Powertrain, *Evaluation of Measurement Systems Specification (EMS)*. Global Machinery and Equipment Specification Document, Version 10.6, July 2004.
- [86] E. P. Morse, *Artifact Selection and Its Role in CMM Evaluation*. International Dimensional Workshop, Knoxville, TN, USA, May 2002.
- [87] VDI/VDE 2617-8:2006, *Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten – Kenngrößen und deren Prüfung – Prüfprozesseignung von Messungen mit Koordinatenmessgeräten*. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, Germany.
- [88] M. Trenk, M. Franke, H. Schwenke, *The “Virtual CMM”, a Software Tool for Uncertainty Evaluation – Practical Application in an Accredited Calibration Lab*. Proceedings of ASPE Summer Topical Meeting, Uncertainty Analysis in Measurement & Design, Vol. 33, pp. 140-145, State College, PA, USA, June-July 2004.
- [89] A. Weckenmann, J. Lorz, *Monitoring Coordinate Measuring Machines by Calibrated Parts*.

- Journal of Physics: Conference Series 13, pp. 190-193, January 2005.
- [90] N. Wisla, P. Lang, *Practical Method of Measurement Process Evaluation and Measurement Task-Related Uncertainty Estimation in Coordinate Measurements Using Calibrated Workpieces According to the Guidelines of VDI/VDE 2617-8*. Seventh International Scientific Conference on Coordinate Measuring Technique, pp. 397-406, Bielsko-Biala, Poland, 2006.
- [91] A. L. de Oliveira, A. R. de Sousa, *Validação de Processos de Medição por Coordenadas em Operações de Controle da Qualidade*. Terceiro Congresso Brasileiro de Metrologia: Metrologia para a Vida, Recife, PE, Brasil, setembro 2003.
- [92] E. Savio, H. N. Hansen, L. de Chiffre, *Approaches to the Calibration of Freeform Artefacts on Coordinate Measuring Machines*. Annals of the CIRP, Vol. 51/1/2002, pp. 433-436.
- [93] E. Trapet, M. Calzada, *Uncertainty Analysis of Measurement with CMMs Using the Method of Multiple Measurement Strategies ("Method of Uncalibrated Objects")*. EASYTRAC Report, August 2003.
- [94] E. Trapet, 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.
- [95] S. Phillips, et al., *The Calculation of CMM Measurement Uncertainty Via the Method of Simulation by Constraints*. Proceedings of ASPE Twelfth Annual Conference, Vol. 16, pp. 443-446, Norfolk, VA, USA, October 1997.
- [96] A. Balsamo, et al., *Evaluation of CMM Uncertainty through Monte Carlo Simulations*. Annals of the CIRP, Vol. 48/1/1999, pp. 425-428.
- [97] H. Haitjema, et al., *Uncertainty Estimation by the Concept of Virtual Instruments*. Proceedings of SPIE, Recent Developments in Traceable Dimensional Measurements, Editors: J. E. Decker, N. Brown, Vol. 4401, pp. 147-157, October 2001.
- [98] H. Schwenke, *Abschätzung von Meßunsicherheiten durch Simulation an Beispielen aus der Fertigungsmeßtechnik*. Dissertation der Technischen Universität Chemnitz, PTB-F-36, Juli 1999.
- [99] K. D. Summerhays, Personal Electronic Communication. December 2005.
- [100] NIST/SEMATECH, *e-Handbook of Statistical Methods*. Chapter 6, Section 5.5. Available from <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pmc/section5/pmc55.htm> [Accessed 28 February 2007].
- [101] C. C. Bárcenas, P. M. Griffin, *Parametric-Based Determination of Cylindrical Variations in Geometric Tolerancing*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 122, No. 3, pp. 549-555, August 2000.
- [102] E. Trapet, F. Wäldele, U. Wiegand, *Coordinate Measuring Machines in the Calibration Chain*. In: Bulletin du Bureau National de Métrologie, No. 102, pp. 27-35, Paris, France, 1995.
- [103] E. Trapet, F. Wäldele, *The Virtual CMM Concept*. Euroconference "Advanced Mathematical Tools in Metrology", Oxford, Oxfordshire, UK, September 1995.
- [104] F. Härtig, et al., *Traceability of Coordinate Measurements According to the Virtual CMM*

- Concept*, Proceedings of the Fifth ISMQC (International Symposium on Metrology and Quality Control), pp. 245-254, Zaragoza, Spain, 1995.
- [105] F. Härtig, *How to Work with the Online Virtual CMM*. Workshop on Traceability of Coordinate Measuring Machines, Braunschweig, Germany, October 1997.
- [106] M. Franke, *Assessment of Uncertainties in Coordinate Metrology – Introducing the Virtual CMM Concept to Industry*. ACMC Annual General Meeting and Workshop, Ottawa, ON, Canada, June 2001.
- [107] F. Wäldele, H. Schwenke, *Automatische Bestimmung der Messunsicherheiten auf KMGs auf dem Weg in die industrielle Praxis*. Technisches Messen, Vol. 69, No. 12, pp. 550-557, Dezember 2002.
- [108] C. Keck, M. Franke, H. Schwenke, *Werkstückeinflüsse in der Koordinatenmesstechnik*. Technisches Messen, Vol. 71, No. 2, pp. 81-92, Februar 2004.
- [109] F. Wäldele, et al., *Simulationsverfahren für die Koordinatenmesstechnik*. IHK Braunschweig, November 2004.
- [110] F. Wäldele, C. Keck, H. Schwenke, *Coordinate Metrology – Evaluation of Task Specific Uncertainties by Simulation*. In: Journal of Metrology Society of India (MAPAN), Dimensional and Temperature Metrology, Vol. 20, No. 2, pp. 153-164, Apr-Jun 2005.
- [111] PTB, *Simulation Process for Precision Engineering Receives the Technology Transfer Prize*. Available from <http://www.ptb.de/en/publikationen/jahresberichte/jb2004/nachrdjahres/s31e.html> [Accessed 12 March 2007].
- [112] K. Takamasu, International Standard Development of Virtual CMM (Coordinate Measuring Machine). NEDO International Joint Research Project, Final Research Report, The University of Tokyo, Japan, May 2002.
- [113] Carl Zeiss, *Calypso Metrology Software*. User Guide, Revision Status 4.2, August 2005.
- [114] M. Franke, Personal Communication. June 2006.
- [115] PTB, *VCMM Nutzerhandbuch: Modelle, Parameter, Bedienung*. Version 5.0.1, November 2005.
- [116] E. Trapet, F. Wäldele, *Rückführbarkeit von Koordinatenmeßgeräten*. Abschlußbericht zum DFG Forschungsvorhaben TR 350/1-2 (Fortsetzungsantrag), 2000.
- [117] H. Kunzmann, E. Trapet, F. Wäldele, *A Uniform Concept for Calibration, Acceptance Test, and Periodic Inspection of Coordinate Measuring Machines Using Reference Objects*. Annals of the CIRP, Vol. 39/1/1990, pp. 561-564.
- [118] E. Trapet, F. Wäldele, *A Reference Object Based Method to Determine the Parametric Error Components of Coordinate Measuring Machines and Machine Tools*. Measurement, Vol. 9, No. 1, pp. 17-22, Jan-Mar 1991.
- [119] VDI/VDE 2617-7:2006, *Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten – Kenngrößen und deren Prüfung – Ermittlung der Unsicherheit von Messungen auf Koordinatenmessgeräten durch Simulation*. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, Germany.

- [120] A. Weckenmann, S. Beetz, *Determination of Measurement Strategy for Coordinate Measurements Supported by an Assistance System*. Seventh International Scientific Conference on Coordinate Measuring Technique, pp. 365-371, Bielsko-Biala, Poland, 2006.
- [121] K. Doytchinov, Personal Electronic Communication. January 2007.
- [122] H. N. Hansen, *Verification and Calibration of Coordinate Measuring Machines*. PhD Thesis, Department of Manufacturing Engineering, Technical University of Denmark, Publication No. M97.06, April 1997.
- [123] H. N. Hansen, *A Database System for Uncertainty Estimation in Coordinate Metrology*. Proceedings of the Sixth ISMQC (International Symposium on Metrology and Quality Control), pp. 215-220, Vienna, Austria, September 1998.
- [124] G. E. P. Box, N. R. Draper, *Empirical Model-Building and Response Surfaces*. John Wiley, New York, NY, USA, January 1987.
- [125] Renishaw plc, *TP200 Precision Touch-Trigger Probe System with Stylus Changer (Datasheet H-1000-2130-04-A)*. Available from <http://www.renishaw.com> [Accessed 24 July 2007].
- [126] ISO 10360-5:2000, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Acceptance and Reverification Tests for Coordinate Measuring Machines (CMM) – Part 5: CMMs Using Multiple-Stylus Probing Systems*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [127] 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.
- [128] BS6808-3:1989, *Coordinate Measuring Machines: Code of Practice*. British Standards Institute, London, UK.
- [129] Vorentwurf VDI/VDE 2617-11:2006, *Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten – Kenngrößen und deren Prüfung – Aufgabenspezifische Messunsicherheit von Koordinatenmessungen*. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, Germany.
- [130] ISO/TS 17450-1:2005, *Geometrical Product Specifications (GPS) – General Concepts – Part 1: Model for Geometrical Specification and Verification*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [131] ISO/TS 17450-2:2002, *Geometrical Product Specifications (GPS) – General Concepts – Part 2: Basic Tenets, Specifications, Operators and Uncertainties*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [132] H. S. Nielsen, *How Long Is a Piece of String? Some Overlooked Considerations for Uncertainty Estimation*. NCSL-I Workshop and Symposium, Toronto, ON, Canada, July 2000.
- [133] H. S. Nielsen, *Specifications, Operators and Uncertainties*. Proceedings of the Eighth CIRP International Seminar on Computer Aided Tolerancing, Charlotte, NC, USA, April 2003.
- [134] H. S. Nielsen, *New Concepts in Specifications, Operators and Uncertainties and Their Impact on Measurement and Instrumentation*. Measurement Science and Technology, Vol. 17, No. 3, pp. 541-544, March 2006.

- [135] J. Dovmark, *New Interesting Concepts from ISO/TC 213*. ACMC Annual General Meeting and Workshop, Ottawa, ON, Canada, June 2001.
- [136] J. Dovmark, *New Interesting Concepts from ISO/TC 213*. CMM Club Italia Seminar, Milan, Italy, September 2000.
- [137] K. Spence, *Technical Product Specification: A Real Solution to Real Industry Needs*. The Eighth Meeting of ISO/TC-213/WG-17, Charlotte, NC, USA, January 2006.
- [138] ISO/DIS 14405:2006, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Dimensional Tolerancing – Linear Sizes*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [139] Draft ISO 5459-3:2002, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Datums for Geometrical Tolerancing – Part 3: Establishment of datums and datum systems for the assessment of geometrical tolerances*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [140] ISO 14660-2:1999, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Geometrical Features – Part 2: Extracted Median Line of a Cylinder and a Cone, Extracted Median Surface, Local Size of an Extracted Feature*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [141] J. de Vicente y Oliva, A. M. Sánchez Pérez, *Requisitos de Trazabilidad en Metrología por Coordenadas*. 3er Congreso Español de Metrología, Zaragoza, Spain, mayo 2005.
- [142] K. Doytchinov, *Coordinate Measuring Machine Workshop Lecture Notes*. National Research Council Canada, Ottawa, ON, Canada, May 2004.
- [143] A. Weckenmann, M. Heinrichowski, *Problems with Software for Running Coordinate Measuring Machines: The Use of Virtual Volumetric Standards*. Precision Engineering, Vol. 7, No. 2, pp. 87-91, April 1985.
- [144] C. M. Shakarji, J. Raffaldi, *Should You Be Concerned with Software Measurement Uncertainty?*. International Dimensional Workshop, Nashville, TN, USA, May 2003.
- [145] C. M. Shakarji, A. Clement, *Reference Algorithms for Chebyshev and One-Sided Data Fitting for Coordinate Metrology*. Annals of the CIRP, Vol. 53/1/2004, pp. 439-442.
- [146] ISO 14660-1:1999, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Geometrical Features – Part 1: General Terms and Definitions*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [147] Mitutoyo Messgeräte GmbH, *Koordinatenmessgeräte: Crysta-Apex C (PR 1204 [4])*. Available from <http://www2.mitutoyo.de> [Accessed 23 July 2007].
- [148] M. Hernla, Personal Electronic Communication. February 2006.
- [149] A. Weckenmann, M. Knauer, *The Influence of Measurement Strategy on the Uncertainty of CMM-Measurements*. Annals of the CIRP, Vol. 47/1/1998, pp. 451-454.
- [150] A. B. Forbes, *Surface Fitting Taking into Account Uncertainty Structure in Coordinate Data*. Measurement Science and Technology, Vol. 17, pp. 553-558, 2006.
- [151] A. B. Forbes, *Uncertainty Evaluation Associated with Fitting Geometric Surfaces to Coordinate Data*, Metrologia, Vol. 43, pp. 282-290, 2006.

- [152] A. B. Forbes, Personal Electronic Communication. January 2007.
- [153] P. Bennich, *Planning Metrology in Advanced Product Quality Planning*. Seminário: A Medida da Qualidade e Produtividade, Fundação CERTI, Florianópolis, SC, Brasil, março 2003.
- [154] D. J. Wheeler, R. W. Lyday. *Evaluating the Measurement Process*. Second Edition, SPC Press, Knoxville, TN, USA, 1989.
- [155] C. R. Baldo, G. D. Donatelli, *Improvements in the Evaluation of the Measurement Uncertainty of CMMs using Calibrated Parts*. Proceedings of the Eighth ISMQC (International Symposium on Metrology and Quality Control), Erlangen, Germany, October 2004.
- [156] C. R. Baldo, G. D. Donatelli, *An Alternative Statistical Procedure to Estimate the Uncertainty of Coordinate Measurements Using Calibrated Workpieces*. ACMC Annual General Meeting and Workshop, Hamilton, ON, Canada, June 2005.
- [157] D. J. Wheeler, *Advanced Topics in Statistical Process Control: The Power of Shewhart's Charts*. SPC Press, Knoxville, TN, USA, 1995.
- [158] P. Swornowski, M. Rucki, *The Errors Occuring in the CMM Fitting Method*. Measurement Science Review, Journal of the Institute of Measurement Science, Slovak Academy of Sciences, Vol. 3, 2003.
- [159] B. Lawford, *Uncertainty Analysis and Quality Assurance for Coordinate Measuring System Software*. Master Thesis, Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, December 2003.
- [160] H. J. Neumann, *Single Point or Multiple Point Measurement?*. ACMC Annual General Meeting and Workshop, Ottawa, ON, Canada, June 2001
- [161] NIST/SEMATECH, *e-Handbook of Statistical Methods*. Chapter 2, Section 2.5. Available from <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/mpc/section5/mpc5331.htm> [Accessed 25 May 2007].
- [162] G. Hetland, Personal Communication. June 2005.
- [163] H. S. Nielsen, *Communicating Functional Requirements with GD&T*. International Dimensional Workshop, Nashville, TN, USA, May 2004.
- [164] F. Wäldele, *Manufacturer-neutral Training in Coordinate Metrology*. Seminar Coordinate Metrology, Cairo, Egypt, March 2004.
- [165] C. Keferstein, et al., *EUKOM – European Training for Coordinate Metrology*. Proceedings of the Eighth ISMQC (International Symposium on Metrology and Quality Control), Erlangen, Germany, October 2004.
- [166] C. R. Baldo, M. Franke, H. Schwenke, *The Role of Workpiece Form Deviations in the VCMM II: Proposal for Software Integration*. VCMM II Project Meeting, Turin, Italy, September 2006.
- [167] H. N. Hansen, L. de Chiffre, *An Industrial Comparison of Coordinate Measuring Machines in Scandinavia with Focus on Uncertainty Statements*. Precision Engineering, Vol. 23, No. 3, pp. 185-195, July 1999.
- [168] M. Hernla, *Aufgabenspezifische Messunsicherheit bei Koordinatenmessungen*. Technisches

Messen, Vol. 64, No. 7/8, pp. 286-293, 1997.

- [169] R. M. Barker, et al., *Discrete Modelling and Experimental Data Analysis*. Software Support for Metrology Best Practice Guide No. 4, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, UK, April 2004.
- [170] I. Lira, *Evaluating the Measurement Uncertainty: Fundamentals and Practical Guidance*. Series in Measurement Science and Technology, Institute of Physics Publishing, 2002.
- [171] W. Lotze, *Precision Length Measurement by Computer-Aided Coordinate Measurement*. Journal of Physics E: Scientific Instruments, Vol. 19, No. 7, pp. 495-501, July 1986.
- [172] T. Luhmann, et al., *Close Range Photogrammetry: Principles, Techniques and Applications*. Whittles Publishing, 2006.
- [173] A. B. Forbes, *Least-Squares Best-Fit Geometric Elements*. National Physical Laboratory Report DITC 140/89, Teddington, Middlesex, UK, April 1989.

APÊNDICE A

INTERCOMPARAÇÃO DE MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS DE USO INDUSTRIAL

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 [52] menciona os aspectos que precisam ser considerados na realização de testes de proficiência em medições por coordenadas; sem reportar, no entanto, resultados. Por sua vez, Hansen [122,123,167] apresenta os resultados de uma intercomparação de máquinas de medição por coordenadas conduzida nos países escandinavos. Para tanto, foram utilizados artefatos simples, p.ex., blocos padrão e anéis com erros de forma significativos, e outros geometricamente mais complexos, p.ex., porta-ferramenta de máquinas operatrizes; 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.

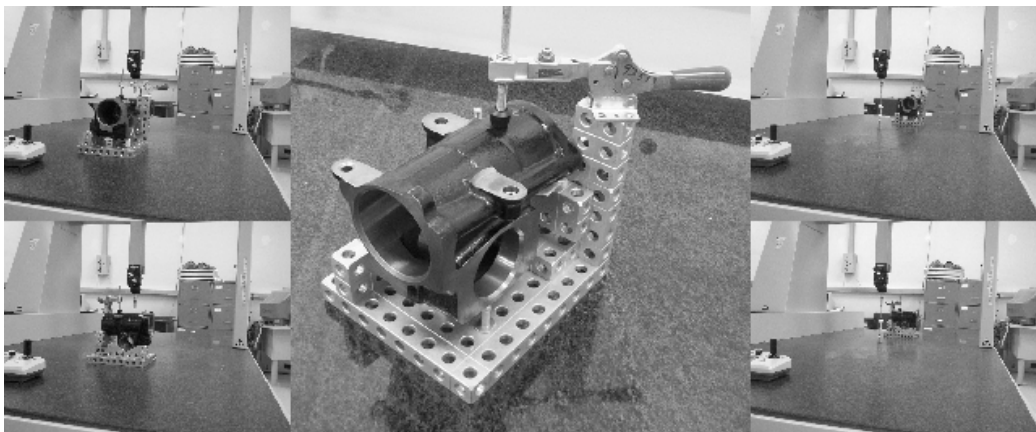


Figura A.1: Peça escolhida para a comparação de máquinas de medição por coordenadas (ao centro) e sua disposição no volume de medição (quadros periféricos).

No entanto, a partir dos resultados apresentados por Hansen, não é possível avaliar, de forma direta pelo menos, a influência dos erros inerentes à máquina de medição

por coordenadas ou induzidos pelo ambiente nas medições. Um estudo com distinto desígnio, i.e., investigar o comportamento de máquinas de medição por coordenadas de uso industrial na medição de um mesmo artefato sob condições dissimilares; foi elaborado e conduzido para tanto. Por condições dissimilares devem ser entendidas medições em diferentes posições/orientações do artefato na máquina e em distintos períodos do dia. 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 CMM; pode ser estimado com base na avaliação dos resultados das medições.

A fim de solicitar efeitos os mais diversos, associados à CMM e a sua interação com o ambiente, a definição da peça e do procedimento de medição assumem um papel de primeira importância. A peça escolhida, por possuir características dimensionais e geométricas de diferentes tipos, foi uma carcaça de direção em ferro fundido (centro da figura A.1). O procedimento de medição, por sua vez, baseou-se na medição da peça em quatro posições/orientações distintas, i.e., próxima/distante do zero máquina e alinhada com o eixo X/Y da máquina, como ilustrado nos quadros periféricos da figura A.1, em dois períodos diferentes do dia.

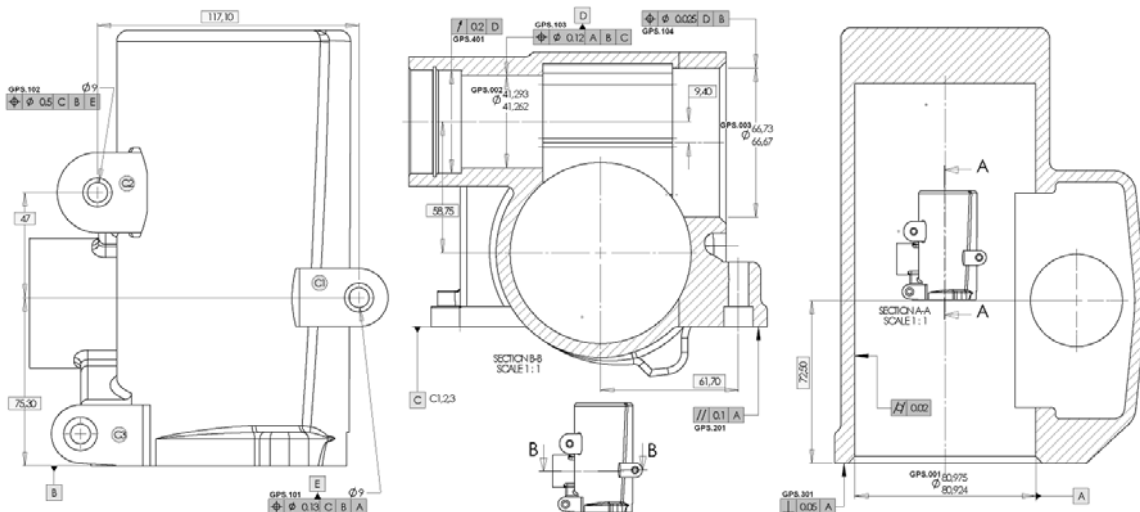


Figura A.2: Vistas da peça escolhida para o estudo de máquinas de medição por coordenadas de uso industrial, com as características dimensionais e geométricas de interesse em destaque.

O experimento tornou-se exequível graças à colaboração de algumas empresas brasileiras parceiras, que disponibilizaram seus equipamentos para as medições necessárias, sob a condição de discricção no uso das informações. 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 (Mitutoyo), ro-

dando um mesmo software de medição e avaliação, e com especificações de erro similares. 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, pois 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.

Tabela A.1: Breve descrição dos mensurandos definidos para o estudo comparativo, com os respectivos valores de referência e incertezas (em milímetros).

Código	Breve Descrição da Estratégia de Medição	Valor Referencial
GPS.001	<i>Diâmetro do furo avaliado pelo método dos mínimos quadrados, obtido a partir da medição de cinco pontos uniformemente distribuídos em cada uma das três seções circulares.</i>	80,9440 ± 0,0012
GPS.002	<i>Diâmetro do furo avaliado pelo método dos mínimos quadrados, obtido a partir da medição de cinco pontos uniformemente distribuídos em cada uma das três seções circulares.</i>	41,2783 ± 0,0011
GPS.003	<i>Diâmetro do furo avaliado pelo método dos mínimos quadrados, obtido a partir da medição de cinco pontos uniformemente distribuídos em cada uma das três seções circulares.</i>	66,7187 ± 0,0010
GPS.101	<i>Posição do eixo do furo medido como três seções circulares (cinco pontos em cada), que definem três centros dos respectivos círculos avaliados pelo método dos mínimos quadrados, com relação ao sistema de referência (referência primária: plano definido por nove pontos; referência secundária: plano definido por dez pontos; referência terciária: eixo do cilindro definido por quinze pontos amostrados em três seções circulares).</i>	0,0589 ± 0,0014
GPS.102	<i>Posição do eixo do furo medido como três seções circulares (cinco pontos em cada), que definem três centros dos respectivos círculos avaliados pelo método dos mínimos quadrados, com relação ao sistema de referência (referência primária: plano definido por nove pontos; referência secundária: plano definido por dez pontos; referência terciária: eixo do cilindro definido por quinze pontos amostrados em três seções circulares).</i>	0,3121 ± 0,0030
GPS.103	<i>Posição do eixo do furo medido como três seções circulares (cinco pontos em cada), que definem três centros dos respectivos círculos avaliados pelo método dos mínimos quadrados, com relação ao sistema de referência (referência primária: eixo do cilindro definido por quinze pontos amostrados em três seções circulares; referência secundária: plano definido por dez pontos; referência terciária: plano definido por nove pontos).</i>	0,1226 ± 0,0023
GPS.201	<i>Paralelismo do plano medido com nove pontos com relação ao eixo de referência (eixo do cilindro definido por quinze pontos amostrados em três seções circulares).</i>	0,0442 ± 0,0018
GPS.301	<i>Perpendicularidade do plano medido com dez pontos com relação ao eixo de referência (eixo do cilindro definido por quinze pontos amostrados em três seções circulares).</i>	0,0054 ± 0,0011
GPS.401	<i>Batimento circular na direção radial (vinte e cinco pontos igualmente espaçados) com relação ao eixo de referência (eixo do cilindro definido por quinze pontos amostrados em três seções circulares).</i>	0,0252 ± 0,0020

As características de interesse da peça, identificadas na figura A.2, foram calibradas numa CMM de referência (vide nota 24), com base no procedimento apresentado na ISO/TS 15530-2. 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 CMM de referência e os das máquinas avaliadas. Os valores de referência de cada característica avaliada são listados na tabela A.1, assim como uma breve descrição da estratégia de amostragem e avaliação.

Tendo sido definidos os objetivos e os procedimentos, assim como a peça padrão, as medições nas máquinas das empresas parceiras puderam ser executadas e os resultados avaliados pelo método de análise de variância (ANOVA), para identificar e quantificar os efeitos aleatórios, e pseudoaleatórios³⁰, nelas atuantes. Em virtude da configuração do estudo, quatro componentes de variação puderam ser estimados:

- componente de repetitividade: considera efeitos estocásticos associados, p.ex., ao apalpador de medição e à indexação das pontas de medição (se aplicável);
- 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 A.3 e detalhados nos itens a seguir (cabe lembrar que todas as máquinas avaliadas pertenciam a classes de exatidão semelhantes):

- 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, de fato, um valor médio, valores submicrométricos podem ser observados 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

³⁰ Efeitos sistemáticos por natureza, porém tratados pelo método de análise de variância como efeitos aleatórios, em função da amostragem limitada.

de escala, sejam eles inerentes à máquina ou induzidos pela temperatura, podem comprometer significativamente a medição;

- iii. apesar de se tratar de uma tarefa de medição de relativa simplicidade, os valores estimados para as variações combinadas podem divergir consideravelmente uns 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, p.ex., 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 distintos elementos geométricos, i.e., 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 em um dos resultados deve-se ao tipo de apalpador,

diferente dos demais, o qual é mais sensível ao uso de pontas orientadas na horizontal e possui um padrão de lóbulos de magnitude significativa.

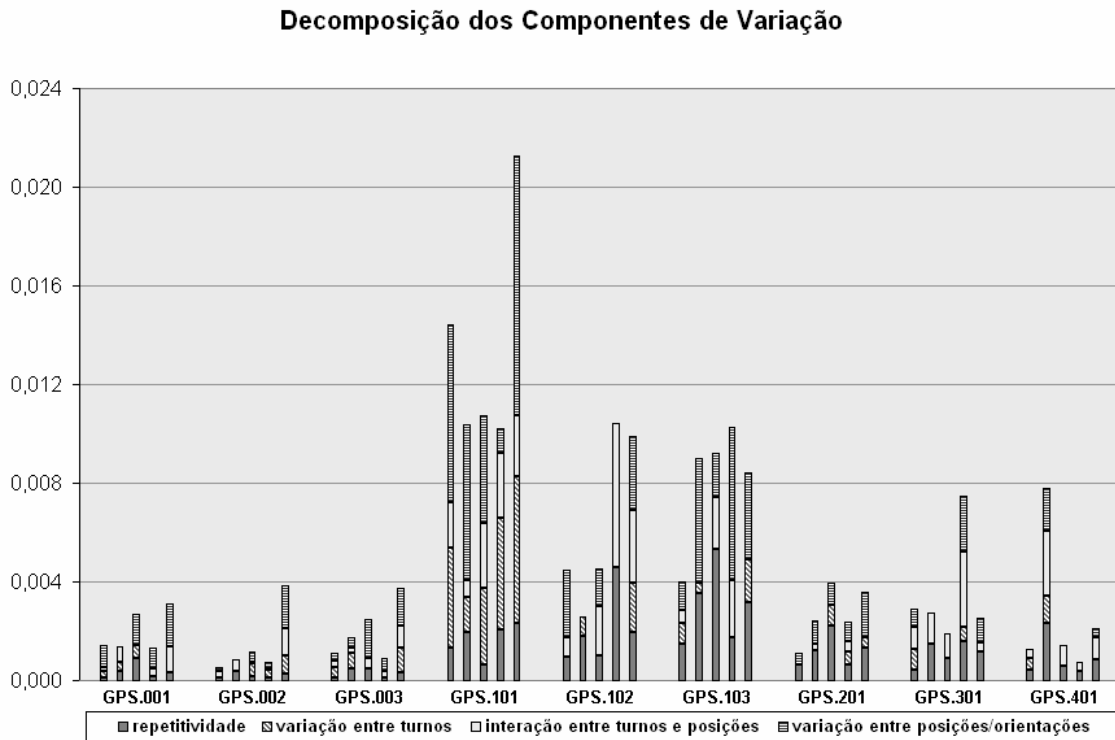


Figura A.3: Decomposição dos componentes de variação, cada um deles expressados como unidade de desvio padrão, de todas as combinações característica-máquina possíveis (valores em milímetros).

Uma vez que a decomposição dos componentes de variação nada diz a respeito dos desvios em relação aos valores de referência, análises complementares tornaram-se necessárias. Em uma das análises, para cada combinação máquina-característica, considerou-se a média aritmética de todas as medições efetuadas³¹ como a melhor estimativa de cada grandeza, e a incerteza como o desvio padrão combinado (dos componentes isolados de variação) multiplicado pelo fator dois. Uma forma de se representar graficamente essas informações é mostrada na figura A.4.

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,

³¹ $k.n.r = 32$, com $k = 4$ posições/orientações, $n = 2$ períodos, e $r = 4$ repetições em cada posição/orientação.

explicados pelo modelo de apalpador de medição, com características funcionais distintas dos demais. Desvios significativos podem ser também observados nas medições do batimento circular, ocasionados por diferenças existentes entre o software da CMM de referência e os das demais máquinas.

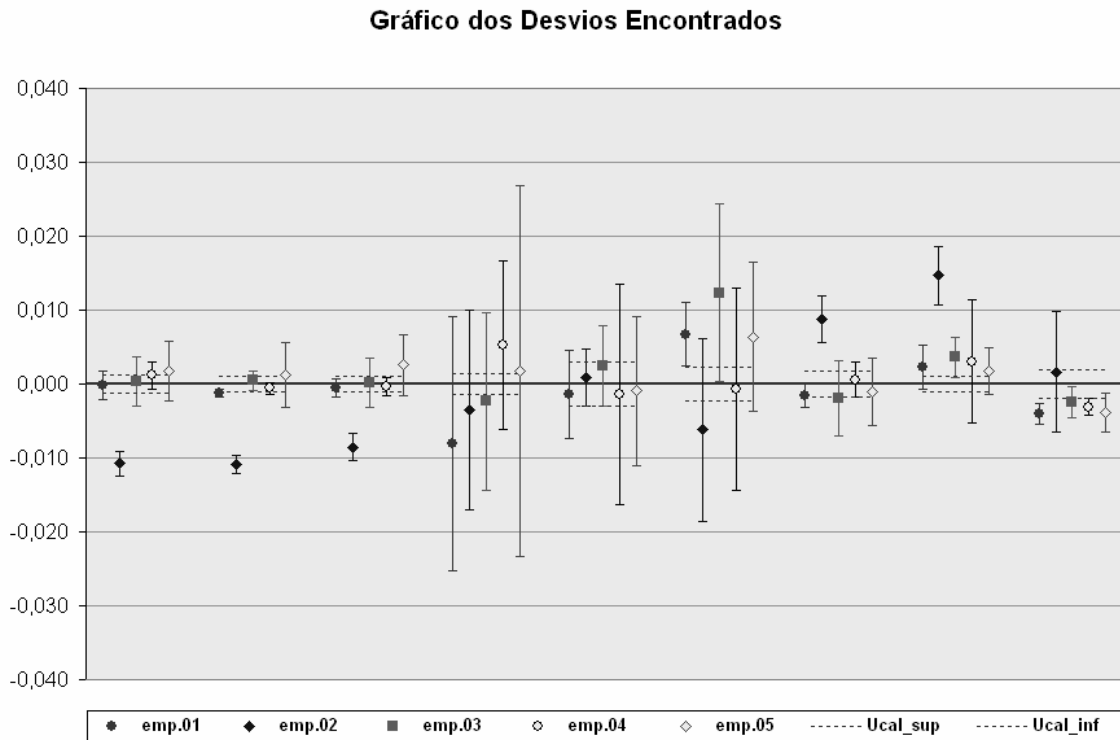


Figura A.4: Gráfico dos desvios médios verificados (em relação aos respectivos valores de referência) para cada combinação máquina-característica, com as respectivas incertezas das medições (linhas verticais) e dos valores de referência (traços horizontais); valores em milímetros.

A fim de compensar as limitações das análises anteriores, que aleatorizaram 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 A.5 e A.6. Em todos os gráficos, as medições em distintas posições/orientações são indicadas por asteriscos, e as medições em diferentes períodos por cores distintas.

Os dois pares de gráficos das tendências e das amplitudes da figura A.5 mostram as medições de um mesmo elemento da peça padrão (diâmetro GPS.002 na figura A.2) 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 singularidades, 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.

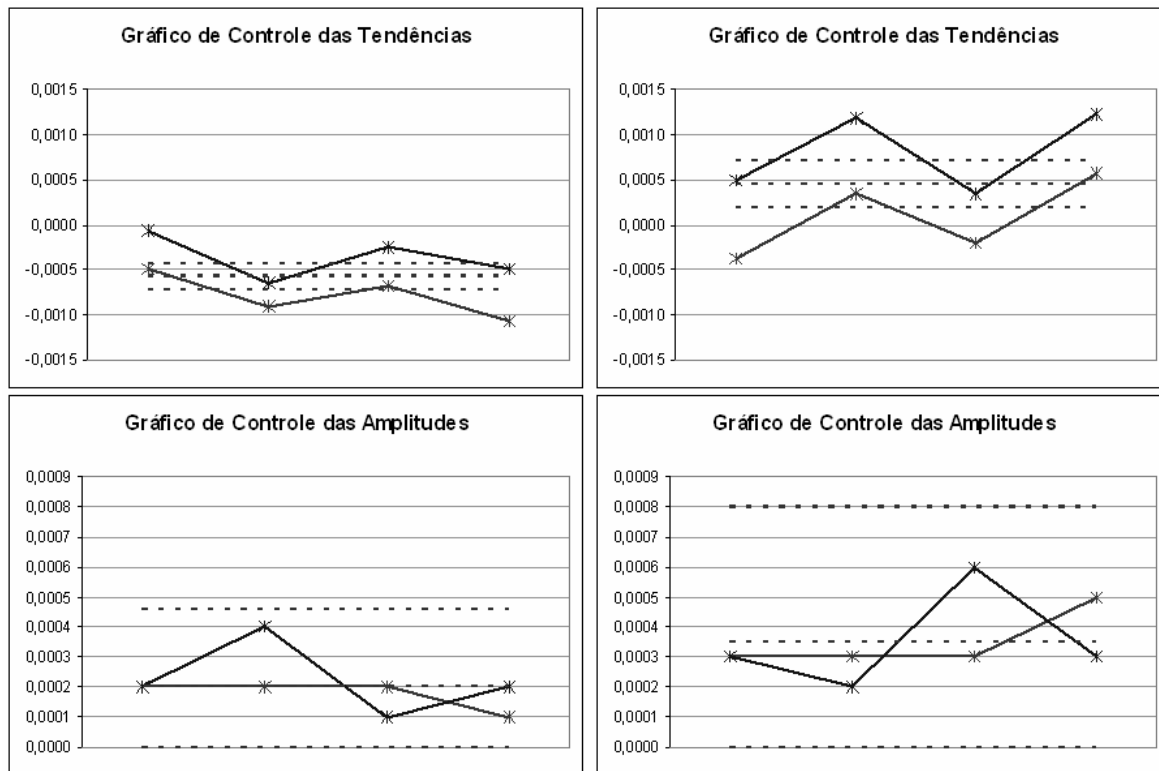


Figura A.5: Gráficos de controle das tendências e das amplitudes relacionados às medições do diâmetro GPS.002 em diferentes máquinas (valores em milímetros).

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 A.6 são mostrados os resultados das medições de uma característica aninhada da peça padrão (posição GPS.101 na figura A.2). Verifica-se, nos gráficos das amplitudes, que a repetitividade das medições feitas em uma máquina é aproximadamente a metade da repetitividade na outra máquina. 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.

Em suma, os resultados do estudo de máquinas de medição por coordenadas trans parecem a complexa composição dos erros influenciando cada medição particular. A derivação das incertezas a partir de um sistema especialista deveria ser capaz de

considerar as especificidades apresentadas, as quais não apenas estão associadas a efeitos aleatórios distintos atuando nas medições, mas também, e em uma proporção muito mais significativa, a efeitos sistemáticos.

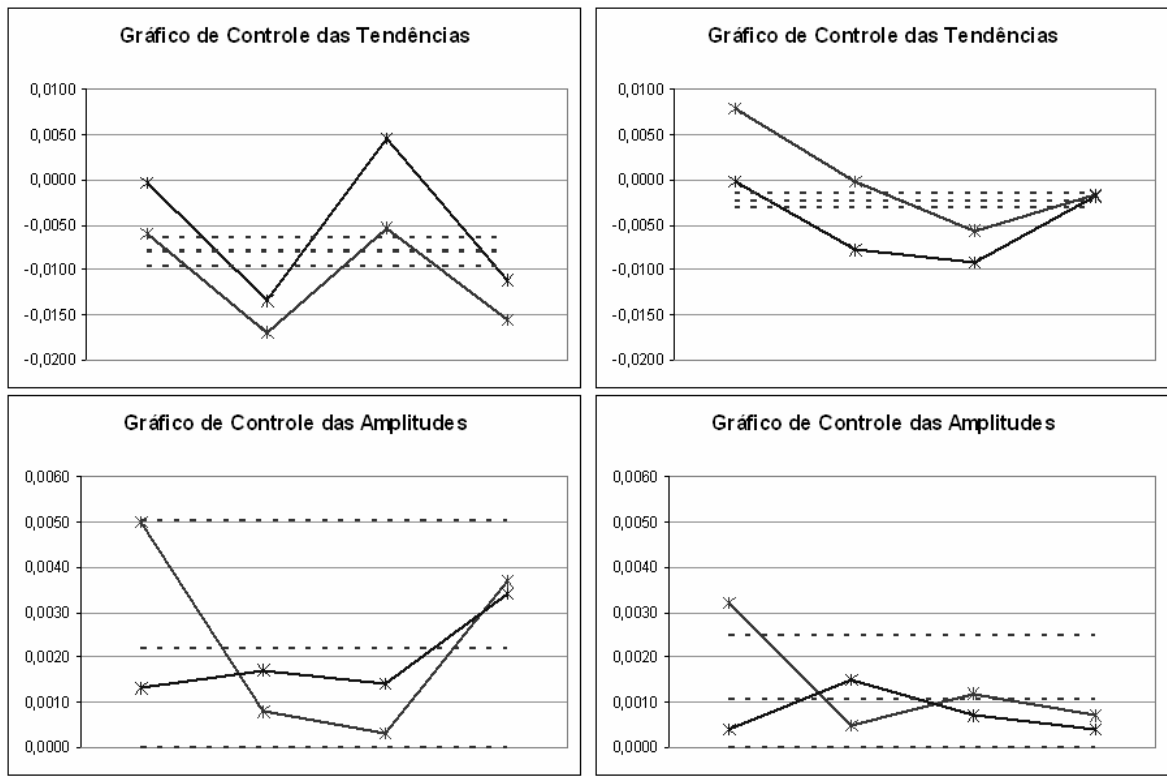


Figura A.6: Gráficos de controle das tendências e das amplitudes relativos às medições da posição GPS.101 em diferentes máquinas (valores em milímetros).

A concepção de um sistema com os atributos acima teria como principal obstáculo a definição do grau de similaridade (correlação) entre as medições, a qual dependeria da confrontação de informações as mais diversas, necessárias para suficientemente representar uma medição, e certamente demandaria esforços e recursos proibitivos. Por conseqüência, a reutilização das incertezas baseada em técnicas de inteligência artificial seria plausível em medições de baixa complexidade e sob condições razoavelmente bem controladas, ou em situações onde os requisitos sobre a exatidão da incerteza fossem consideravelmente relaxados.

Em adição aos problemas associados à caracterização do processo de medição e reutilização das incertezas, o êxito de qualquer busca na base de dados dependeria da existência de registros nela armazenados. Infelizmente, como discutido ao longo dos capítulos preliminares deste documento, as técnicas hoje disponíveis não têm sido atraentes para os usuários das medições por coordenadas nas indústrias. Logo, o próprio preenchimento da base de dados particularizaria uma lacuna no conceito.

APÊNDICE B

SÍMBOLOS UTILIZADOS NA FORMULAÇÃO DOS BALANÇOS DE INCERTEZA CARACTERÍSTICOS

Todos os índices utilizados nas equações referentes aos *balanços de incerteza característicos* são listados abaixo. Com exceção do índice associado à coordenada de interesse, os demais possuem uma posição seqüencial específica na nomenclatura da equação (de 1 a 3). Por exemplo, na equação B.1 (repetição da equação 4.17):

$$U_{\text{en.ea.ip}2.3} = \frac{\sqrt{4/n_2}}{I_{22}} \cdot r_3 \quad (\text{B.1})$$

o índice en ocupa a primeira posição, o índice ea (subdivisão do componente de incerteza “eixo nominal do elemento tolerado”), a segunda, e o índice ip (subdivisão do componente de incerteza “efeito aleatório do apalpador”), a terceira.

Índice	Posição	Significado
I	--	coordenada de interesse, i.e., z (1), x (2), y (3), no sistema peça
cs	1	componente (associado a efeitos) sistemáticos
ca	1	componente (associado a efeitos) aleatórios
en	1	eixo nominal (do elemento tolerado)
pc	1	posição do centro (do elemento geométrico associado)
vc	1	variação do centro (do elemento geométrico associado)
em	2	erro (de geometria) da máquina
ea	2	efeito aleatório (do apalpador)
ef	2	erro de forma (do elemento geométrico)
rp	2	repetitividade de posicionamento (da ponta)
et	2	influência da temperatura
ta	2	temperatura absoluta
td	2	diferença de temperatura (entre peça e escala)
ip	3	inclinação do plano (primário de referência)
pe	3	posição do eixo (da zona cilíndrica de tolerância)
cp	3	centróide do plano (secundário/terciário de referência)
os	3	origem do sistema (de coordenadas da peça/característica)
rs	3	rotação do sistema (de coordenadas da peça/característica)

APÊNDICE C

COEFICIENTES DE SENSIBILIDADE PARA OS PARÂMETROS DOS ELEMENTOS GEOMÉTRICOS ASSOCIADOS POR MÍNIMOS QUADRADOS

Os coeficientes de sensibilidade relacionados aos parâmetros que definem os elementos geométricos ajustados por mínimos quadrados, podem ser derivados a partir do conhecimento da matriz de incerteza (i.e., matriz de variância-covariância), como ilustrado, e.g., em [82-83,147-148,168-172]. Para o caso de uma solução por mínimos quadrados linear, a matriz de incerteza V_a provém da seguinte relação matricial:

$$V_a = (C^T \cdot C)^{-1} \cdot C^T \cdot V_y \cdot \left[(C^T \cdot C)^{-1} \cdot C^T \right]^T = \sigma^2 \cdot (C^T \cdot C)^{-1} \quad (C.1)$$

onde $V_y = \sigma^2 \cdot I$ denota a matriz de incerteza associada aos valores de entrada, σ^2 a variância dos pontos em referência ao elemento geométrico associado e C a matriz de sensibilidade (também chamada matriz observação ou matriz modelo).

Para o caso de uma solução por mínimos quadrados não-linear, a relação matricial equivalente é a seguinte:

$$V_a \approx \sigma^2 \cdot (J^T \cdot J)^{-1} \quad (C.2)$$

onde J denota a matriz jacobiano, cujos elementos provêm das derivadas parciais da função objetivo específica para cada situação com respeito a cada incógnita (i.e., parâmetros de interesse):

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial a_j} (a) \quad (C.3)$$

Uma vez que a relação matricial C.2 baseia-se em linearizações, para modelos altamente não-lineares, as estimativas por ela geradas para a variância associada aos parâmetros ajustados podem ser significativamente diferentes das variâncias hipoteticamente verdadeiras [169].

Por outra parte, para os elementos geométricos tipicamente envolvidos em medições por coordenadas, e.g., linha reta, círculos e cilindros, e sob a condição de um espa-

çamento uniforme dos pontos ao longo/redor da superfície integral do elemento, expressões fechadas e suficientemente exatas podem ser obtidas para os coeficientes de sensibilidade. Dois casos são detalhados na seqüência, sendo as expressões resultantes informadas na tabela C.1.

Caso A: círculo em um plano específico

Um círculo em um plano específico pode ser representado pela seguinte equação:

$$(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2 = r^2 \quad (C.4)$$

onde x_o e y_o denotam as coordenadas do centro e r , o raio. Sendo a distância radial de um ponto (x_i, y_i) ao círculo dada por:

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_o)^2 + (y_i - y_o)^2} - r \quad (C.5)$$

os elementos da matriz jacobiano são determinados a partir das derivadas parciais da função objetivo d_i com respeito aos parâmetros x_o , y_o , r , como segue [172-173]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial d_i}{\partial x_o} &= -\frac{(x_i - x_o)}{r_i} = -\cos \varphi \\ \frac{\partial d_i}{\partial y_o} &= -\frac{(y_i - y_o)}{r_i} = -\text{sen} \varphi \\ \frac{\partial d_i}{\partial r} &= -1 \end{aligned} \quad (C.6)$$

sendo φ o ângulo polar. Com base nas derivadas parciais acima, a matriz jacobiano resultante para todos o n pontos amostrados pode ser constituída:

$$J = \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 & \text{sen} \varphi_1 & 1 \\ \cos \varphi_2 & \text{sen} \varphi_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos \varphi_n & \text{sen} \varphi_n & 1 \end{pmatrix} \quad (C.7)$$

Para o caso de pontos uniformemente distribuídos ao redor da circunferência completa, a relação matricial C.2 reduz-se a:

$$V_a \approx \sigma^2 \cdot \begin{pmatrix} 2/n & 0 & 0 \\ 0 & 2/n & 0 \\ 0 & 0 & 1/n \end{pmatrix} \quad (C.8)$$

onde se observa que todos os elementos fora da diagonal principal assumem o valor zero; em outros termos, os coeficientes de correlação desaparecem e as incertezas das coordenadas do centro e do raio dependem apenas do número de pontos:

$$\begin{aligned} u_{x_0} = u_{y_0} &\approx \sqrt{\frac{2}{n}} \cdot \sigma \\ u_r &\approx \sqrt{\frac{1}{n}} \cdot \sigma \end{aligned} \tag{C.9}$$

Caso B: elemento geométrico tipo cilindro

Um elemento geométrico do tipo cilindro é definido por:

- um ponto (x_0, y_0, z_0) em seu eixo;
- um vetor direção (a, b, c) apontando ao longo do eixo;
- um raio r .

A distância de um ponto (x_i, y_i, z_i) à superfície do cilindro é dada por:

$$d_i = r_i - r \tag{C.10}$$

onde

$$r_i = \frac{\sqrt{u_i^2 + v_i^2 + w_i^2}}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}$$

com

$$\begin{aligned} u_i &= c \cdot (y_i - y_0) - b \cdot (z_i - z_0) \\ v_i &= a \cdot (z_i - z_0) - c \cdot (x_i - x_0) \\ w_i &= b \cdot (x_i - x_0) - a \cdot (y_i - y_0) \end{aligned}$$

Empregando-se as seguintes restrições:

$$\begin{aligned} z_0 &= -(a \cdot x_0 + b \cdot y_0) \\ c &= 1 \end{aligned} \tag{C.11}$$

e considerando ainda o caso especial onde $x_0 = y_0 = a = b = 0$, a expressão para r_i acima reduz-se a:

$$r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$$

Por conseguinte, os elementos que formam a matriz jacobiano, i.e., derivadas parciais da função objetivo d_i com respeito aos parâmetros x_o , y_o , a , b , r , são dados pelas seguintes relações [172-173]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial d_i}{\partial x_o} &= -\frac{x_i}{r_i} \\ \frac{\partial d_i}{\partial y_o} &= -\frac{y_i}{r_i} \\ \frac{\partial d_i}{\partial a} &= -\frac{x_i \cdot z_i}{r_i} \\ \frac{\partial d_i}{\partial b} &= -\frac{y_i \cdot z_i}{r_i} \\ \frac{\partial d_i}{\partial r} &= -1 \end{aligned} \tag{C.12}$$

Tabela C.1: Fatores (coeficientes de sensibilidade) dos parâmetros dos elementos geométricos substitutos em função do número de pontos medidos n .

Fator	Parâmetro
$\sqrt{\frac{1}{n}}$	valor médio; coordenada do centróide de uma linha reta ou plano; raio de um círculo, esfera, cilindro ou cone (distribuição uniforme dos pontos ao redor do elemento completo).
$\sqrt{\frac{2}{n}}$	coordenada do centro de um círculo ou esfera; coordenada do centróide de um cilindro ou cone (distribuição uniforme dos pontos ao redor do elemento completo).
$\sqrt{\frac{4}{n}}$	diâmetro de um círculo, esfera, cilindro ou cone (distribuição uniforme dos pontos ao redor do elemento completo); ângulo de uma linha reta (pontos nas extremidades).
$\sqrt{\frac{8}{n}}$	ângulo de um plano (distribuição circular dos pontos); ângulo do eixo de um cilindro ou cone (duas seções transversais radiais com $n/2$ pontos cada).
$\sqrt{\frac{12}{n}}$	ângulo de uma linha reta ou plano (distribuição uniforme dos pontos ao longo da linha reta ou na superfície do plano).
$\sqrt{\frac{24}{n}}$	ângulo do eixo de um cilindro ou cone (distribuição uniforme dos pontos ao redor do elemento completo).

Considerando que os pontos amostrados estejam igualmente espaçados ao redor da superfície integral do cilindro, e que a eles estejam associados apenas efeitos puramente aleatórios independentes e identicamente distribuídos (i.i.d), os coeficientes

de sensibilidade apresentados na tabela C.1 aplicam-se aos parâmetros de um cilindro ajustado por mínimos quadrados.

Os fatores para os parâmetros de outros elementos geométricos e mesmo para outras distribuições dos pontos são também sintetizados na tabela C.1. Cabe salientar, por sua vez, dois aspectos atrelados aos fatores para ângulos:

- a. As incertezas padrão dos ângulos são calculadas em unidades de comprimento e referem-se sempre ao comprimento avaliado L . A fim de convertê-las em unidades de ângulo (radianos), é preciso dividi-las pelo comprimento avaliado L .
- b. As incertezas padrão dos ângulos são superestimadas caso poucos pontos sejam usados. Por exemplo, para $n = 20$, espera-se uma superestimação de aproximadamente 27% para o ângulo da uma linha reta e de aproximadamente 22% para o ângulo do eixo de um cilindro.

APÊNDICE D

TRANSFORMAÇÕES GEOMÉTRICAS

No terceiro capítulo, considerou-se, no atinente ao uso das informações relativas aos componentes de escala e esquadro da CMM, haver concordância entre os sistemas de coordenadas da máquina e da peça, i.e., eixo z da máquina coincidindo com a normal ao plano primário, eixo y da máquina coincidindo com a normal ao plano secundário e eixo x da máquina coincidindo com a normal ao plano terciário. Em casos onde essa condição é violada, transformações geométricas podem ser usadas para converter os erros definidos no sistema de coordenadas da máquina para o sistema de coordenadas da peça.

Posição de um eixo com respeito a um sistema de referência

Para relacionar os sistemas de coordenadas, sugere-se o seguinte procedimento: (a) definir o ângulo ω formado entre o plano de referência primário da característica GPS e o plano XY da máquina; (b) se necessário, definir o ângulo κ formado entre o plano de referência secundário da característica GPS e o plano XZ da máquina; (c) se necessário, definir o ângulo φ formado entre o plano de referência terciário e o plano YZ da máquina. Os ângulos de rotação no espaço κ , φ , ω são representados na figura D.1.

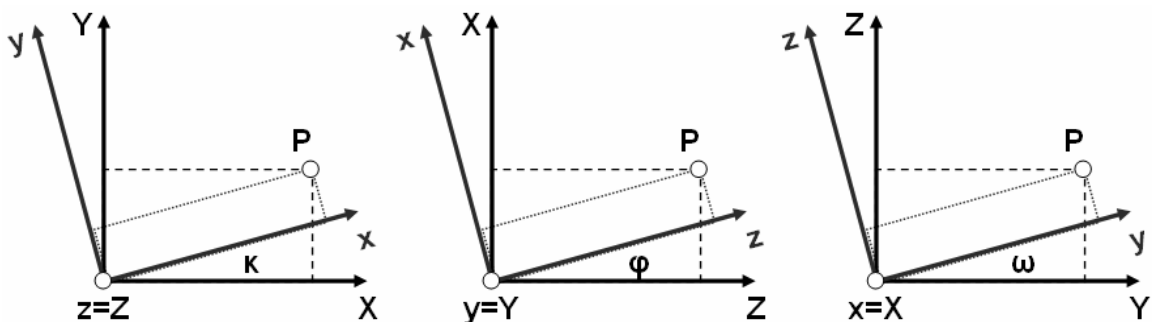


Figura D.1: Ângulos de rotação no espaço necessários para a compatibilizar os sistemas de coordenadas de interesse.

As coordenadas que definem os pontos relevantes para estimar a incerteza inerente à avaliação duma característica do tipo posição, como descrito na subseção 4.2.3.1, são, com base nos ângulos expostos acima, transformadas do sistema de coordenadas da peça (índice scp) para o da máquina (índice scm) utilizando a operação matricial abaixo:

$$\begin{bmatrix} x_{scm} \\ y_{scm} \\ z_{scm} \end{bmatrix} = M \cdot \begin{bmatrix} x_{scp} \\ y_{scp} \\ z_{scp} \end{bmatrix} \quad (D.1)$$

onde

$$M = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cdot \cos \kappa & \cos \varphi \cdot \sin \kappa & \sin \varphi \\ \cos \kappa \cdot \sin \omega \cdot \sin \varphi + \sin \kappa \cdot \cos \omega & -\sin \omega \cdot \sin \varphi \cdot \sin \kappa + \cos \omega \cdot \cos \kappa & -\sin \omega \cdot \cos \varphi \\ \sin \omega \cdot \sin \kappa - \cos \omega \cdot \sin \varphi \cdot \cos \kappa & \sin \omega \cdot \cos \kappa + \cos \omega \cdot \sin \varphi \cdot \sin \kappa & \cos \omega \cdot \cos \varphi \end{bmatrix}$$

representa a matriz de rotação.

A partir dos pontos resultantes, as incertezas padrão associadas as coordenadas de cada ponto, no sistema de coordenadas da máquina, podem ser determinadas pela expressão D.2 (generalização da equação 4.21):

$$\begin{aligned} u_{x.scn}^2 &= (x_{scn} \cdot u_{dxx})^2 + (y_{scn} \cdot u_{dyx})^2 + (z_{scn} \cdot u_{dzx})^2 \\ u_{y.scn}^2 &= (y_{scn} \cdot u_{dyy})^2 + (z_{scn} \cdot u_{dzy})^2 \\ u_{z.scn}^2 &= (z_{scn} \cdot u_{dzz})^2 \end{aligned} \quad (D.2)$$

As incertezas resultantes no sistema de coordenadas da característica GPS, por sua vez, podem ser obtidas através da seguinte operação matricial:

$$\begin{bmatrix} u_{x.scp}^2 \\ u_{y.scp}^2 \\ u_{z.scp}^2 \end{bmatrix} = C \cdot \begin{bmatrix} u_{x.scn}^2 \\ u_{y.scn}^2 \\ u_{z.scn}^2 \end{bmatrix} \quad (D.3)$$

onde C é uma matriz quadrada de ordem três, tendo cada elemento tomado como o respectivo elemento da inversa da matriz M elevado ao quadrado.

Finalmente, as incertezas padrão em cada coordenada resultam da adequada combinação das expressões D.4, relacionada aos erros de escala da CMM (idêntica à equação 4.23):

$$\begin{aligned} u_{escala.2}^2 &= u_{P1.escala.2}^2 - u_{P3.escala.2}^2 \\ u_{escala.3}^2 &= u_{P1.escala.3}^2 - u_{P2.escala.3}^2 \end{aligned} \quad (D.4)$$

e D.5, relacionada aos erros de esquadro da CMM (generalização da equação 4.25):

$$u_{\text{esquadro.2}}^2 = u_{P1.\text{esquadro.2}}^2 + \frac{u_{P2.\text{esquadro.3}}^2}{(\text{ted}_2/\text{ted}_3)^2} + \frac{u_{P2.\text{esquadro.1}}^2}{(\text{ted}_2/h)^2} \quad (\text{D.5})$$

$$u_{\text{esquadro.3}}^2 = \left(u_{P1.\text{esquadro.3}}^2 - u_{P2.\text{esquadro.3}}^2 \right) + \frac{u_{P3.\text{esquadro.1}}^2}{(\text{ted}_3/h)^2}$$

Em virtude da dependência estatística existente entre as coordenadas dos pontos, sempre que a discordância entre os sistemas de coordenadas da máquina e da peça assumir um ângulo não múltiplo de 90°, as expressões D.4 e D.5 aplicam-se apenas a relacionamentos com ângulos múltiplos de 90°. Cabe ressaltar ainda que o tratamento aqui apresentado para as incertezas pode ser também usado, sem modificações relevantes, para as estimativas dos erros sistemáticos conhecidos.

Perpendicularidade de um eixo com respeito a um plano de referência

Para as coordenadas dos pontos de interesse, como definido na subseção 4.2.3.2, o mesmo procedimento descrito para o caso anterior, i.e. equações D.1, D.2 (somente fatores de esquadro) e D.3, pode ser empregado. É necessário, para tanto, definir o ângulo ω formado entre o plano de referência da característica GPS e o plano XY da máquina. Os demais relacionamentos não são relevantes para este caso.

As incertezas padrão em cada coordenada provêm da equação D.6 (idêntica à equação 4.38):

$$u_{\text{en.em.2}}^2 = u_{P1.\text{esquadro.2}}^2 + \frac{u_{P2.\text{esquadro.1}}^2}{(\text{pa}_2/h)^2} \quad (\text{D.6})$$

$$u_{\text{en.em.3}}^2 = u_{P1.\text{esquadro.3}}^2 + \frac{u_{P3.\text{esquadro.1}}^2}{(\text{pa}_3/h)^2}$$

e o mesmo tratamento pode ser empregado, sem modificações relevantes, para as estimativas dos erros sistemáticos conhecidos.

ANEXO A

TERMOS E DEFINIÇÕES ESPECÍFICOS

Os seguintes termos específicos e normalizados são utilizados ao longo do corpo do texto de uma forma não-isolada (as definições provêm dos documentos citados).

ASME Y14.5M [36]

elemento geométrico dimensionável (FOS)

uma superfície cilíndrica ou esférica, ou um conjunto de dois elementos opostos ou duas superfícies paralelas opostas, ao qual está associado a uma cota dimensional

ISO/TS 17450-1 [130]

associação

operação usada para ajustar elemento(s) geométrico(s) ideal(is) a elemento(s) não-ideal(is)

coleção

operação usada para identificar elementos geométricos em conjunto, conforme a função da peça

construção

operação usada para construir elemento(s) geométrico(s) ideal(is) a partir de outros elementos geométricos ideais, respeitando algumas restrições

extração

operação usada para identificar pontos específicos de um elemento geométrico não-ideal

ISO/TS 17450-2 [131]

operador perfeito da verificação

operador da verificação baseado em um conjunto completo de operações perfeitas de verificação, executado na ordem predefinida

ISO/TS 14660-1 [146]

elemento geométrico derivado associado

centro, eixo ou plano mediano derivado a partir de um ou mais elementos geométricos integrais associados

ANEXO B

CASO VDI/VDE 2617-8: MEDIÇÃO DE UMA CAIXA DE BOMBA

Característica GPS:	<i>Posição de eixo de um furo cilíndrico</i>					
Cota Básica:	450 mm	Valor de Referência, x_{cal}:	0,0196 mm			
Tolerância:	0,05 mm	Incerteza Expandida, U_{cal}:	0,0042 mm			
Temperatura Média:	22 °C	Coefficiente Expansão Térmica, $\alpha_{aço}$:	$(11,5 \pm 1,0) K^{-1}$			
Medição		Data (Operador)	Peça Calibrada	Peças Não-calibradas		
				1	2	3
	1	22/3/02 (A)	0,0201	0,0225	0,0206	0,0180
	2	22/3/02 (A)	0,0199	0,0199	0,0213	0,0193
	3	22/3/02 (A)	0,0196	0,0210	0,0182	0,0177
	4	22/3/02 (B)	0,0197	0,0211	0,0199	0,0182
	5	22/3/02 (B)	0,0196	0,0206	0,0195	0,0182
	6	27/3/02 (B)	0,0201	0,0231	0,0212	0,0178
	7	27/3/02 (B)	0,0200	0,0227	0,0204	0,0182
	8	27/3/02 (A)	0,0195	0,0228	0,0190	0,0181
	9	27/3/02 (A)	0,0196	0,0204	0,0202	0,0182
	10	27/3/02 (A)	0,0199	0,0215	0,0211	0,0190
	11	28/3/02 (C)	0,0197	0,0205	0,0212	0,0181
	12	28/3/02 (C)	0,0196	0,0202	0,0204	0,0190
	13	28/3/02 (C)	0,0194	0,0228	0,0193	0,0188
	14	28/3/02 (C)	0,0195	0,0210	0,0193	0,0186
	15	28/3/02 (B)	0,0198	0,0226	0,0212	0,0187
	16	28/3/02 (B)	0,0199	0,0216	0,0200	0,0179
	17	28/3/02 (B)	0,0201	0,0225	0,0215	0,0179
	18	28/3/02 (B)	0,0200	0,0234	0,0215	0,0187
19	28/3/02 (B)	0,0194	0,0220	0,0191	0,0189	
20	28/3/02 (A)	0,0195	0,0216	0,0186	0,0182	
Média Aritmética, \bar{y}:		0,0197				
Incerteza Padrão, $u_{p,j}$:		0,00024	0,00107	0,00103	0,00046	
Componente de Incerteza			Símbolo	Incerteza Padrão		
<i>Incerteza do valor calibrado</i>			u_{cal}	0,0021 mm		
<i>Incerteza do procedimento de medição</i>			u_p	0,0008 mm		
<i>Incerteza do coeficiente de expansão térmica</i>			u_w	0,0009 mm		
<i>Tendência (erro sistemático)</i>			b	0,0001 mm		
<i>Incerteza expandida ($k=2$)</i>			U	0,0050 mm		