

Recebido em: 05/05/11

Aprovado em: 18/06/11

Uma proposta para garantia da qualidade metrológica em peças de geometria complexa

Marcos Ronaldo Albertin (UFC – CE/Brasil) - albertin@ot.ufc.br

Luiz Soares Júnior (UFC – CE/Brasil) - lsj@ufc.br

• Campus Universitário do Pici, bl. 714, Bairro Amadeu Furtado, 60455-970, Fortaleza-CE
João Bosco de Aquino Silva (UFPB – PB/Brasil) - jbosco@uol.com.br

Resumo

Peças de geometria complexa são de interesse em muitas aplicações industriais, seja por questão funcional seja por estética. Sua disseminação deve-se, em parte, aos avanços nos sistemas CAD/CAM e na tecnologia de medição por coordenadas. As variações dimensionais, de forma e de textura são especificadas, através de tolerância dimensional e geométrica. O seu controle tipicamente consiste na medição de pontos discretos sobre a superfície, utilizando máquina de medir por coordenadas e algoritmo de avaliação. Este trabalho apresenta uma proposta de sistematização de informações, para garantia da qualidade, através de medição por coordenadas cartesianas. A proposta foi baseada no amplo estudo sobre o tema, nas constatações de problemas evidenciados nas visitas realizadas em seis empresas e nos resultados de estudos de casos realizados numa empresa do setor automotivo. A sistemática foca nas principais fontes de erros da medição por coordenadas e demonstrou ser de útil aplicação na empresa selecionada.

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

Abstract

Parts with complex geometry are of great interest in many industrial applications, either for functional or aesthetic issue. Its spread is due in part to advances in CAD/CAM systems and coordinate measuring technology. The dimensional variations of shape and surface texture are specified using geometric and dimensional tolerance. Their control typically consists of the measurement of discrete points on the surface using a coordinate measuring machine and algorithm evaluation. This paper presents a systematization of information for quality assurance of measurement through measuring machine by cartesian coordinates. The proposal was based on extensive study on the subject, the findings of problems revealed in visits to six companies and the results of case studies from a company in the automotive sector. The system focuses on the major sources of errors of coordinate measuring and proved easy to apply the selected company.

Keywords: Coordinate measuring; Complex Geometry; Quality assurance.

1. INTRODUÇÃO

Os constantes desafios da manufatura mundial têm obrigado as indústrias a aprimorarem seus processos industriais, incluindo os processos metrológicos. As mudanças têm sido motivadas pela agregação de novas tecnologias ao desenvolvimento de produtos com *lead time* e custos menores e também, com geometrias diferenciadas.

De um modo geral, observa-se que peças com geometria simples são mais fáceis e têm menor custo de fabricação que peças de geometria complexas. Entretanto, em muitas situações, a forma geométrica simples pode não ser a mais adequada, como, por exemplo, quando a funcionalidade da peça depende de uma interação com um fluido ou uma onda, como é o caso de aplicações em aerodinâmica e óptica. Em outras situações, a estética e aparência podem ser mais importantes para o consumidor que requisitos funcionais (SAVIO *et al.*, 2007).

A disseminação do uso de geometria complexa nos produtos, tem a contribuição dos programas computacionais para CAD (Projeto Auxiliado por Computador), que modelam sólidos 3D e superfícies, entre outras características. No planejamento da fabricação e montagem, os programas denominados de CAPP (Planejamento da Produção Auxiliada por Computador) e CAM (Fabricação Auxiliada por Computador) podem incorporar funções para programação da fabricação em máquinas CNC (Comando Numérico Computadorizado), planejamento da montagem e otimização da produção, entre outras. Esses avanços no campo da fabricação contribuíram para o emprego de peças complexas, em produtos de diferentes áreas, destacando-se os setores automotivo, aeronáutico e eletro-eletrônico (GIGO, 1999).

Nas atividades de controle dimensional e geométrico, tem-se destaque para as tecnologias de medição por coordenadas, onde é possível integrar equipamento de medição e programa computacional ao ciclo de desenvolvimento do produto e comparar os pontos medidos diretamente no modelo CAD da peça (LI e GU, 2004).

Apesar dos avanços tecnológicos, entretanto, o projeto do produto continua sendo um dos maiores problemas da indústria (MAZIERO *et al.*, 1997; DONATELLI *et al.*, 2005). Esses problemas vão desde a concepção do projeto até problemas exclusivos de fabricação que, muitas vezes, são descobertos no estágio de inspeção final ou uso do produto.

Segundo o relatório ISO/TC 213 (2008) da ISO (*International Organization for Standardization*), quase 80% dos custos de um produto derivam de decisões tomadas durante as fases de concepção e de produção inicial. Grande parte dos desvios, com referência à qualidade desejada pelo cliente, é originária das etapas de planejamento do produto, projeto e métodos de produção, onde constam as especificações de funcionalidade e tolerâncias do novo produto. Esses desvios são gerados ao longo de todo o ciclo de vida do produto e os custos dos desvios da qualidade corrigidos podem ser consideráveis, à medida que são identificados nas fases de fabricação ou inspeção final (KUNZMANN *et al.*, 2005; DONATELLI *et al.*, 2005).

As causas desses desvios de qualidade são diversas e, muitas vezes, complexas. Entre as causas prováveis, citam-se (DONATELLI *et al.*, 2005; ISO/TC 213, 2008):

- Especificação inadequada de tolerâncias dimensionais e geométricas;
- Processo de fabricação fora de controle estatístico;
- Conhecimento insuficiente das técnicas de inspeção, medição e ensaios do produto, nas diversas fases de desenvolvimento, considerando, inclusive, a rastreabilidade metrológica;
- Falta de integração entre os setores de projeto, fabricação e metrologia;
- Falhas no registro e transferência de informação ao longo do projeto;
- Negligenciamento do erro do sistema de medição e sua incerteza desde a especificação de projeto;
- Desconhecimento das possíveis variações dimensionais e geométricas durante e após a fabricação;
- Conhecimento insuficiente da capacidade do processo de medição e de fabricação;
- Rigor das normas atuais de avaliação de conformidade com a especificação.

Verifica-se, portanto, que boa parte das possíveis causas relatadas tem relação direta com a atividade de garantia da qualidade de produto na empresa. Este panorama pode ser ainda mais crítico, quando se tratam de peças com geometria complexa, como, por exemplo, engrenagem, hélice de turbina, perfil de automóvel, entre outros.

Este trabalho propõe uma sistemática para auxiliar profissionais e empresas na garantia da qualidade, na medição de peças com geometrias complexas, utilizando máquina de medir por coordenadas. A sistemática foi estruturada em três módulos que contemplam aspectos relacionados com recursos humanos, comunicação, documentação, normalização, características do produto, planejamento e estratégia de medição e confirmação metrológica. As recomendações constantes, na proposta deste trabalho, foram resultados de:

- Visitas técnicas a seis empresas de médio porte;
- Troca de informações com especialistas da área;
- Realização de dois estudos de casos em uma empresa fornecedora de componentes mecânicos para o setor automotivo.

Os estudos de casos serviram para validar a metodologia proposta. Neste trabalho, constam os resultados de um dos estudos de caso.

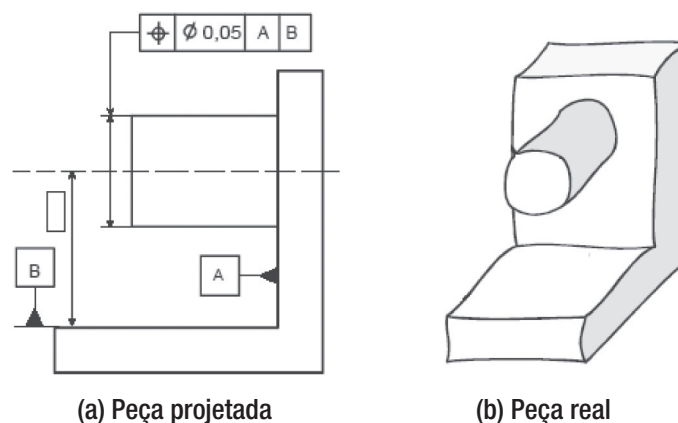
Este trabalho foi organizado da seguinte forma: na seção 2, são apresentados os estudos sobre especificação geométrica de produtos e normalização nesse domínio e as fontes de incerteza na medição com máquina de medir por coordenadas. Na seção 3, é apresentada a sistemática proposta e na seção 4, é mostrado um estudo de caso real com o modelo proposto. A conclusão é apresentada na seção 5.

2. ESPECIFICAÇÃO DE TOLERÂNCIA

Dois princípios de tolerância são usualmente classificados na literatura técnica: o princípio da tolerância tradicional ou cartesiana, limitada pela representação da forma da peça e os valores de suas dimensões, com tolerância para mais e para menos (+/-) e o princípio denominado tolerância geométrica (FENG e HOPP, 1991; KANDIKJANA *et al.*, 2001; MAVROIDIS *et al.*, 2002).

A necessidade da especificação de tolerância parte do princípio de que as variações inerentes do processo de fabricação e de controle fazem com que existam diferenças entre o que é projetado e o produto real (SCHNEIDER, 2005). Na figura 1, está representada a intenção do projetista, expressada no desenho técnico (a) e no lado direito da figura, a geometria real da peça fabricada (b).

Figura 1 – Desvio entre a peça projetada (a) e a peça real (b).



Fonte: Adaptado de Schneider (2005).

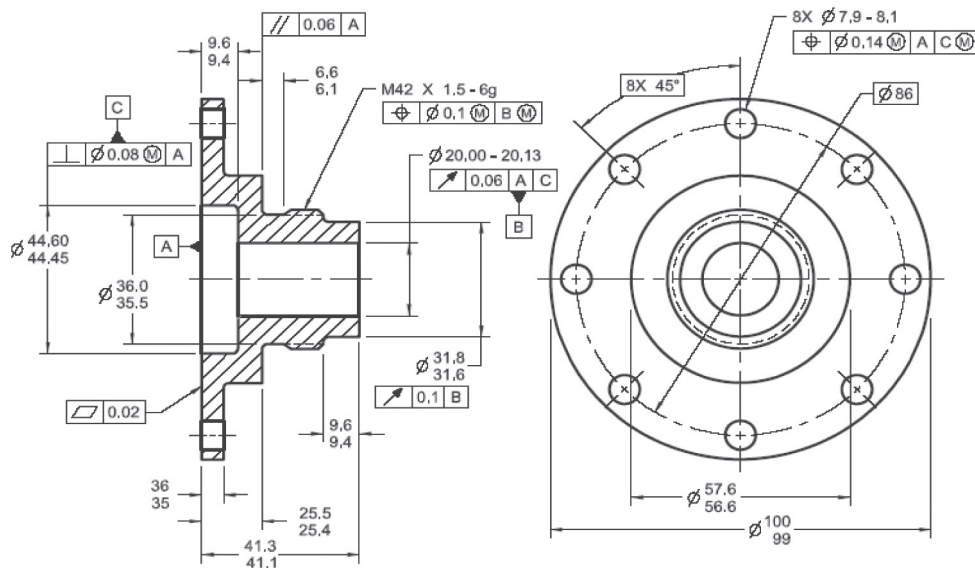
Segundo Wandeck e Sousa (2008), a especificação de tolerância pelo método tradicional é aplicada apenas nas tolerâncias de tamanhos e casos simples de tolerâncias de posição; e por não abordar tolerâncias de forma, os requisitos de montagem e alinhamento não são possíveis de representar ou verificar. Para Feng e Hopp (1991), outra limitação é a representação pobre nos desenhos face às potencialidades atuais dos sistemas CAD 3D.

Face às limitações do método tradicional, para especificar e expressar de forma adequadas as características geométricas do produto, foi necessário desenvolver uma linguagem padronizada, que considerasse a simbologia para indicação gráfica e o seu significado no desenho técnico (WANDECK e SOUSA, 2008). Essa linguagem associada aos desenhos tipicamente em 2D, foi amplamente difundida no meio industrial, como GD&T (*Geometrical Dimensioning and Tolerancing*), suportada pela ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) e GPS (*Geometric Product Specification*), suportada pela ISO (*International Organization for Standardization*).

As duas linguagens são usadas em conjunto com as práticas tradicionais de tolerância dimensional, o que permite ao projetista comunicar as características importantes da peça, de uma forma clara e sem ambiguidades, para a fabricação e inspeção (FLACK e BEVAN, 2005).

Um exemplo da linguagem GD&T é apresentado na figura 2, onde constam cotas de tolerâncias dimensionais e especificação de tolerâncias geométricas de paralelismo, posição, batimento circular radial e axial, perpendicularidade e tolerância de planeza.

Figura 2 – Exemplo de desenho técnico com a linguagem GD&T.



Fonte: ASME (2009).

No exemplo do desenho da figura 2, constam, ainda, a especificação de elementos de referência, denominados de A, B e C, para os elementos tolerados e a condição de máximo material, denominado pelo símbolo M com um círculo. Em resumo, a especificação e verificação da tolerância, seja dimensional seja geométrica, são necessárias, porque:

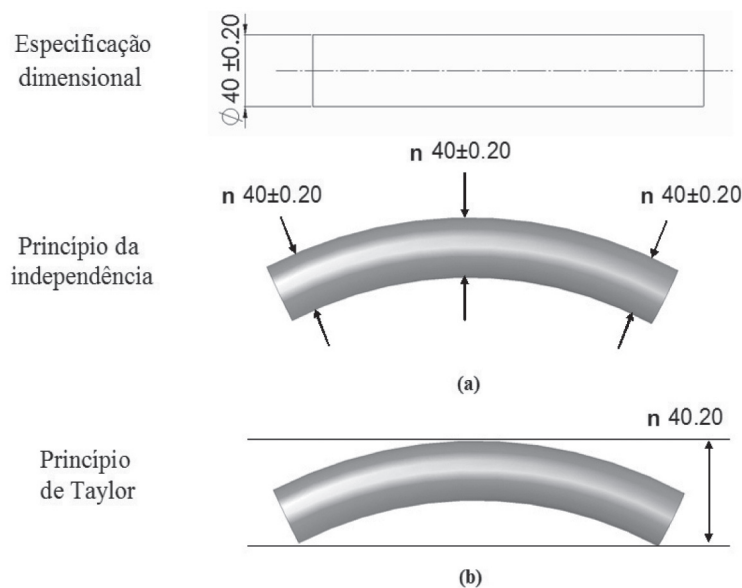
- O processo de fabricação não é perfeito;
- O processo de medição possui erros e, portanto, não se consegue determinar o valor nominal com exatidão;
- Sem tolerância não existem parâmetros para controle e, como consequência, podem ocorrer falhas de montagem e de função da peça.

2.1. Normalização para tolerância geométrica

As duas linguagens para especificação geométrica são muito similares, mas ainda persistem diferenças em aspectos fundamentais, que podem levar a uma interpretação equivocada dos desenhos e procedimentos de medição (WANDECK e SOUSA, 2008).

A filosofia da linguagem ASME/GD&T pode ser resumida pelo princípio do envelope (ou princípio de Taylor), que estabelece uma correlação (dependência) entre a variação de forma e dimensão (KRULIKOWSKI, 1999; WANDECK e SOUSA, 2008). Por outro lado, a linguagem ISO/GPS, através da norma ISO1101 (2004), tem como filosofia o princípio da independência, onde cada requisito dimensional ou geométrico especificado no desenho técnico da peça deve ser controlado individualmente, a não ser que alguma relação entre eles seja especificada. Na figura 3, consta a ilustração dos dois princípios de cotagem.

Figura 3 – Interpretação dos princípios de independência e de Taylor.



Fonte: WANDECK e SOUSA (2008).

No exemplo da figura 3, há apenas a especificação de tolerância dimensional e pelo princípio da independência, o controle deve ser feito nas seções de interesse (figura 3a), com um instrumento de medição de dois contatos como, por exemplo, um micrômetro externo.

Aplicando o princípio de Taylor, através da norma ASME Y14.5 (2009), define-se uma zona (envelope) na condição de máximo material (diâmetro máximo), que controla a dimensão e a forma do eixo (figura 3b). Portanto, para a ASME, o princípio do envelope é automático. No caso da ISO, é opcional, de modo que quando se deseja controlar tolerância geométrica pela ISO, deve-se especificá-la no desenho técnico.

Considerando que nem sempre é possível aplicar o princípio da independência ou do envelope para todos os casos, ambos os sistemas de normalização permitem exceção.

No quadro 1, é apresentado o resumo das principais diferenças entre os sistemas de normalização no domínio da especificação geométrica de produtos.

Quadro 1 – Diferenças fundamentais entre GD&T e GPS.

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

Fonte: Adaptado de Concheri *et al.* (2001).

No caso da linguagem internacional ISO/GPS, a harmonização dos comitês técnicos, relacionados com projeto, fabricação e metrologia, resultou na publicação do relatório técnico ISO/TR 14638 (1995), conhecido como Plano Mestre (*Master Plan*). A base para essa nova geração de normas, resume-se na transmissão, sem ambiguidade, das características da peça ao longo dos setores de projeto, fabricação e de metrologia. Um exemplo de uma norma com essa filosofia é a ISO 14253-1(1998), que trata de regras para avaliação de conformidade frente às tolerâncias especificadas e a incerteza avaliada do processo de medição.

No quadro 2, os *links* relacionados com metrologia (4, 5 e 6) de todas as normas gerais da matriz GPS são influenciados pela ISO 14253-1.

Quadro 2 – Exemplo do relacionamento de normas na matriz GPS.

| Nº do <i>link</i> na cadeia | Projeto | | | Verificação | Medição | Rastreabilidade |
|---------------------------------------|--|---|---|---|--|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Característica geométrica do elemento | Indicação da documentação do produto – Codificação | Definição das tolerâncias – Valores e definições teóricas | Definições do elemento real – Características ou parâmetros | Avaliação dos desvios da peça – Comparação com os limites especificados | Requisitos para os equipamentos de medição | Requisitos de calibração – Padrões de medição |
| Tamanho | 129; 286-1 | 286-2; 286-2 | 286-1; 1938 | 1938 | 10360-X | 3650 |
| Distância | 129; 406 | | | | 10360-X | |

Para a atividade de fabricação

Matriz de normas GPS complementares

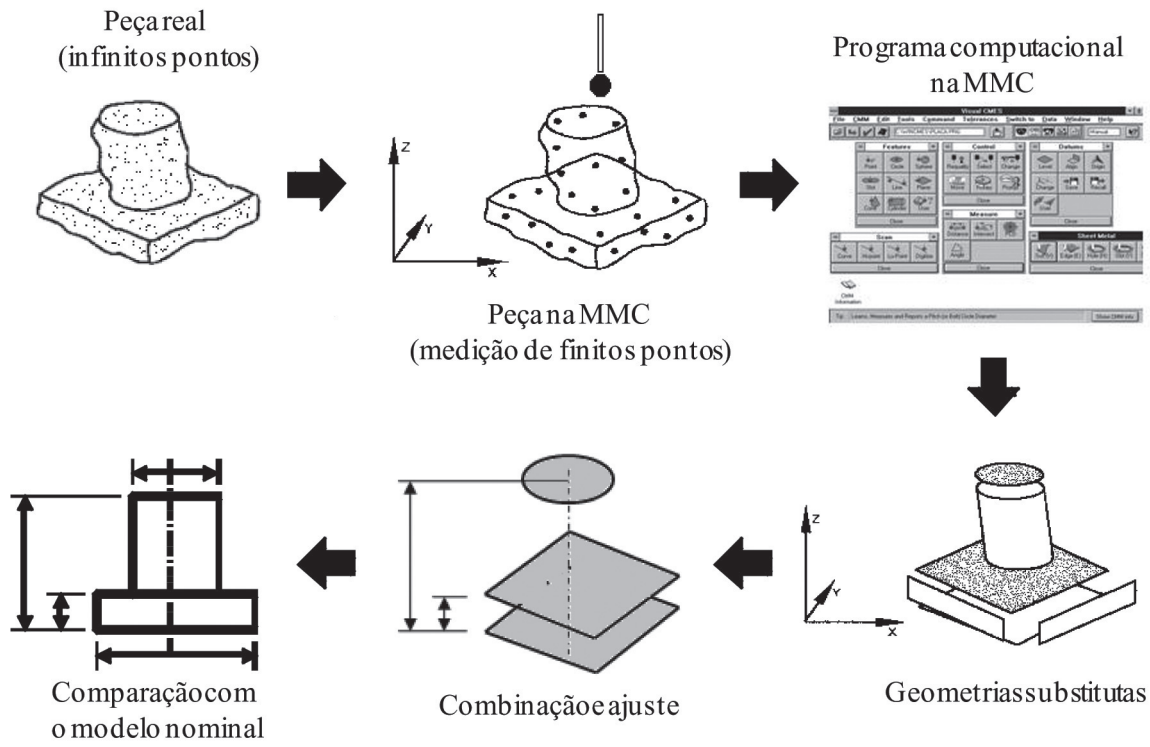
Fonte: Adaptado de Concheri *et al.* (2001).

2.2. Máquinas de medir por coordenadas

Máquinas de medir por coordenadas (MMC) são largamente utilizadas para medição de peças com geometrias regulares e complexas. Esse sistema de medição define a geometria de uma peça, através de pontos coordenados (x_i, y_i, z_i), localizados sobre a sua superfície a medir. Na medição por contato com essas máquinas, a informação sobre a geometria da peça é obtida, apalpando a superfície em pontos de medição discretos e as coordenadas desses pontos são expressas num sistema de referência pré-determinado. Entretanto, não é possível avaliar os desvios dimensionais e geométricos da peça (por exemplo, desvios de diâmetro, de distância, de posição, de perfil, batimentos, entre outros), diretamente pelas coordenadas dos pontos medidos. É necessário que o sistema de medição tenha associado um programa computacional, com algoritmos matemáticos adequados para ajustar os pontos coordenados às geometrias – usualmente chamadas de geometrias substitutas – que modelam a peça medida. As características ou parâmetros principais das geometrias substitutas ou da sua combinação são comparados, então, às dimensões e tolerâncias do projeto da peça.

Na figura 4, está ilustrada a natureza das medições com uma máquina de medir por coordenadas.

Figura 4 – A natureza da medição com máquina de medir por coordenadas.



Fonte: Adaptado de Orrego *et al.* (2000).

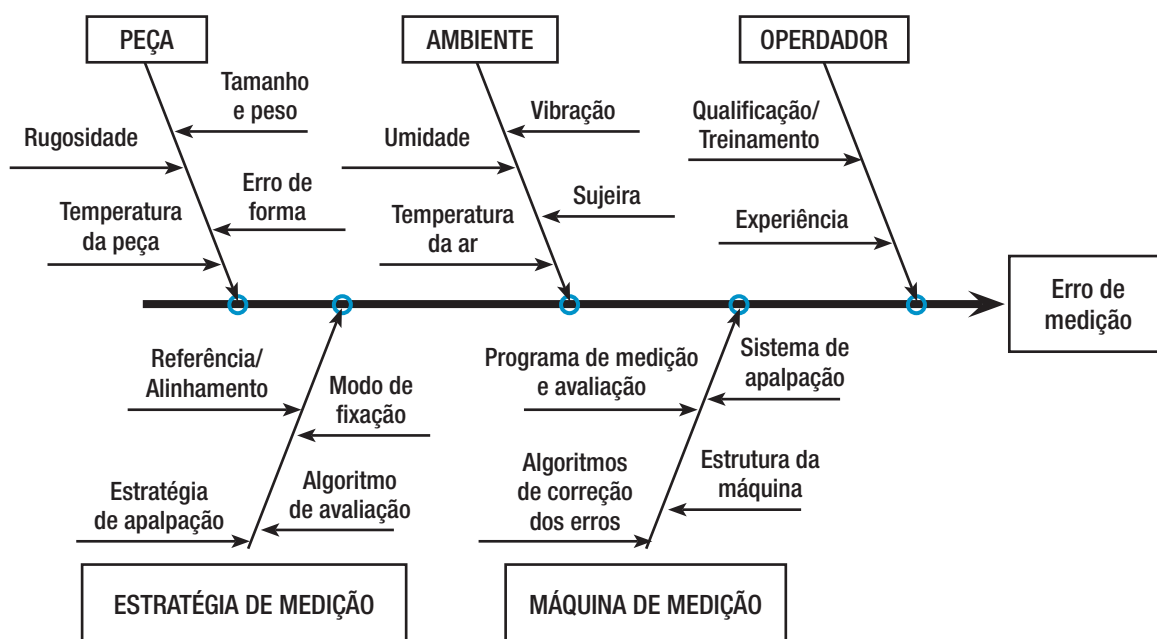
Diferentemente das geometrias ideais (plano, cilindro, etc.), como mostrados na figura 4, onde a quantidade de pontos para apalpação é normalizada, na medição de geometrias complexas e superfícies com formas livres, a escolha do número de pontos e da posição é mais difícil, necessitando normalmente de uma quantidade densa de pontos sobre a superfície (HAMBURG-PIEKAR, 2006).

Apesar das muitas qualidades de uma MMC, diversos fatores contribuem para erros de medição e sua estimativa de incerteza de medição (WECKENMANN *et al.*, 2001; FENG *et al.*, 2007).

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

Na figura 5, constam as diferentes fontes típicas de erros na medição por coordenadas.

Figura 5 – Fontes de erros na medição com máquina de medir por coordenadas.



Fonte: Adaptado de Hamburg-Piekar (2006).

3. PROPOSTA DE SISTEMATIZAÇÃO DE INFORMAÇÕES

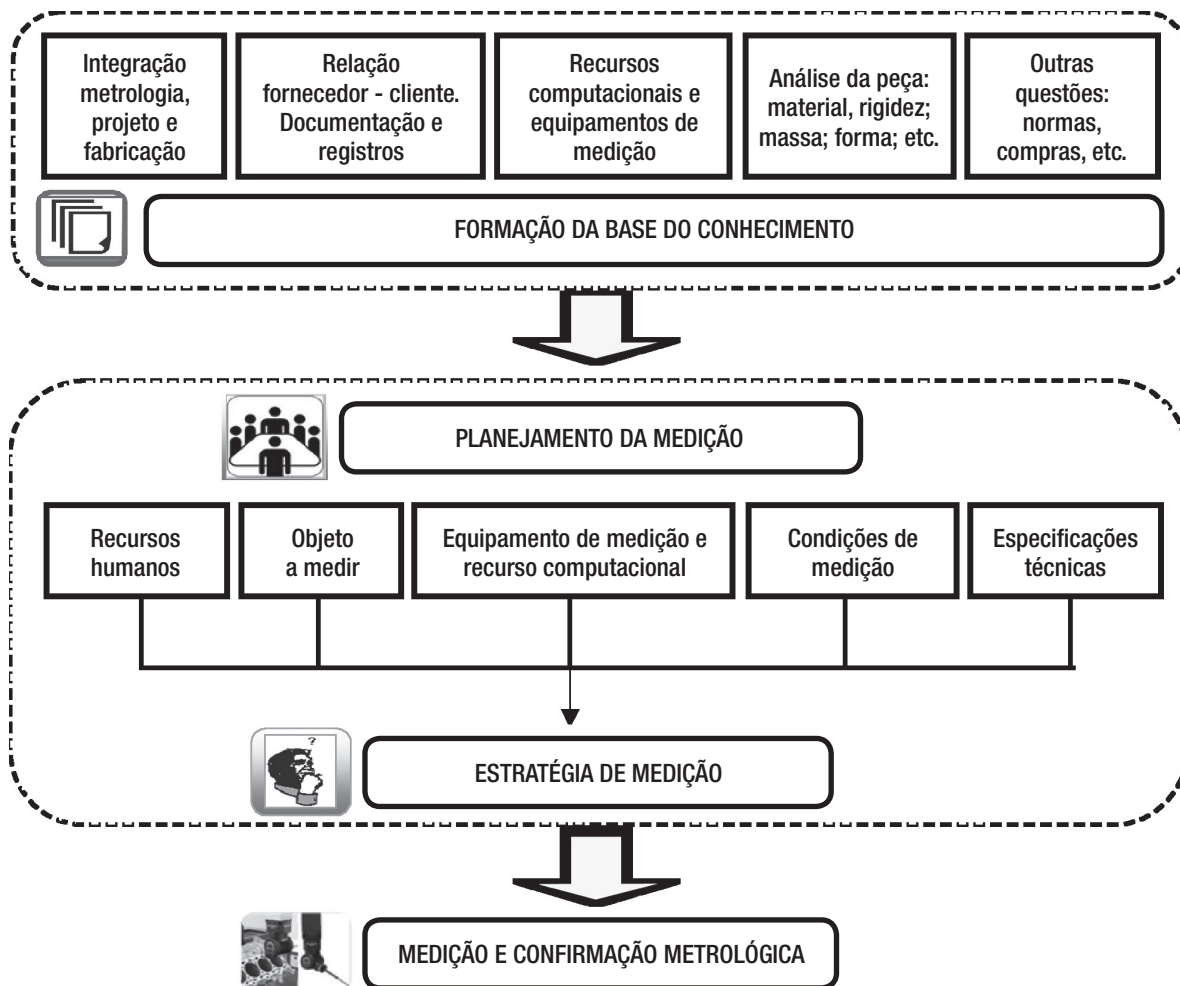
A sistematização de informações consiste em um conjunto de diretrizes, focadas nas principais fontes de erros na medição por coordenadas, apresentadas na figura 5. O objetivo é propor recomendações fundamentadas em normas, com foco na importância do planejamento adequado da estratégia de medição, minimizando as principais fontes de incertezas e aumentando a confiabilidade metrológica do processo de medição.

A proposta não tem a pretensão de apresentar soluções para todos os problemas de medição, nem ser a única forma de resolvê-los. Ela deve apoiar, por exemplo, a sequência de ações para a implementação do processo de medição, satisfazendo situações particulares.

A proposta apresentada neste trabalho foi estruturada em três módulos, que contemplam aspectos relacionados com recursos humanos, comunicação, documentação, normalização, características do produto, planejamento e estratégia de medição e confirmação metrológica, baseada nas recomendações de AIAG (2002); Brito (2003); Concheri *et al.* (2001) e Flack *et al.* (2005).

A figura 6 descreve os módulos desta proposta: formação da base do conhecimento, planejamento da medição (inclui a estratégia de medição) e o módulo da medição e confirmação metrológica.

Figura 6 – Módulos que caracterizam a proposta para a garantia da qualidade metrológica.



Fonte: Elaborado pelos autores.

3.1. Formação da base do conhecimento

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

- Interação entre os setores de metrologia, projeto (ou engenharia) e o de fabricação;
- Relacionamento com cliente e fornecedor e documentação (incluindo registros);
- Recursos computacionais e equipamentos de medição;
- Análise da peça;
- Outras questões que podem envolver requisitos normativos, mercado, etc.

3.2. Planejamento da medição

O planejamento da medição envolve as informações relevantes, obtidas do módulo anterior, que contribuem para a elaboração da estratégia de medição e o relatório de medição.

Não há um modelo único para se planejar uma medição e tampouco se padronizar a estratégia na medição por coordenadas. No quadro 3, constam aspectos importantes que deverão ser considerados no planejamento de cada tarefa de medição em uma MMC.

Quadro 3 – Aspectos para elaboração do planejamento da medição.

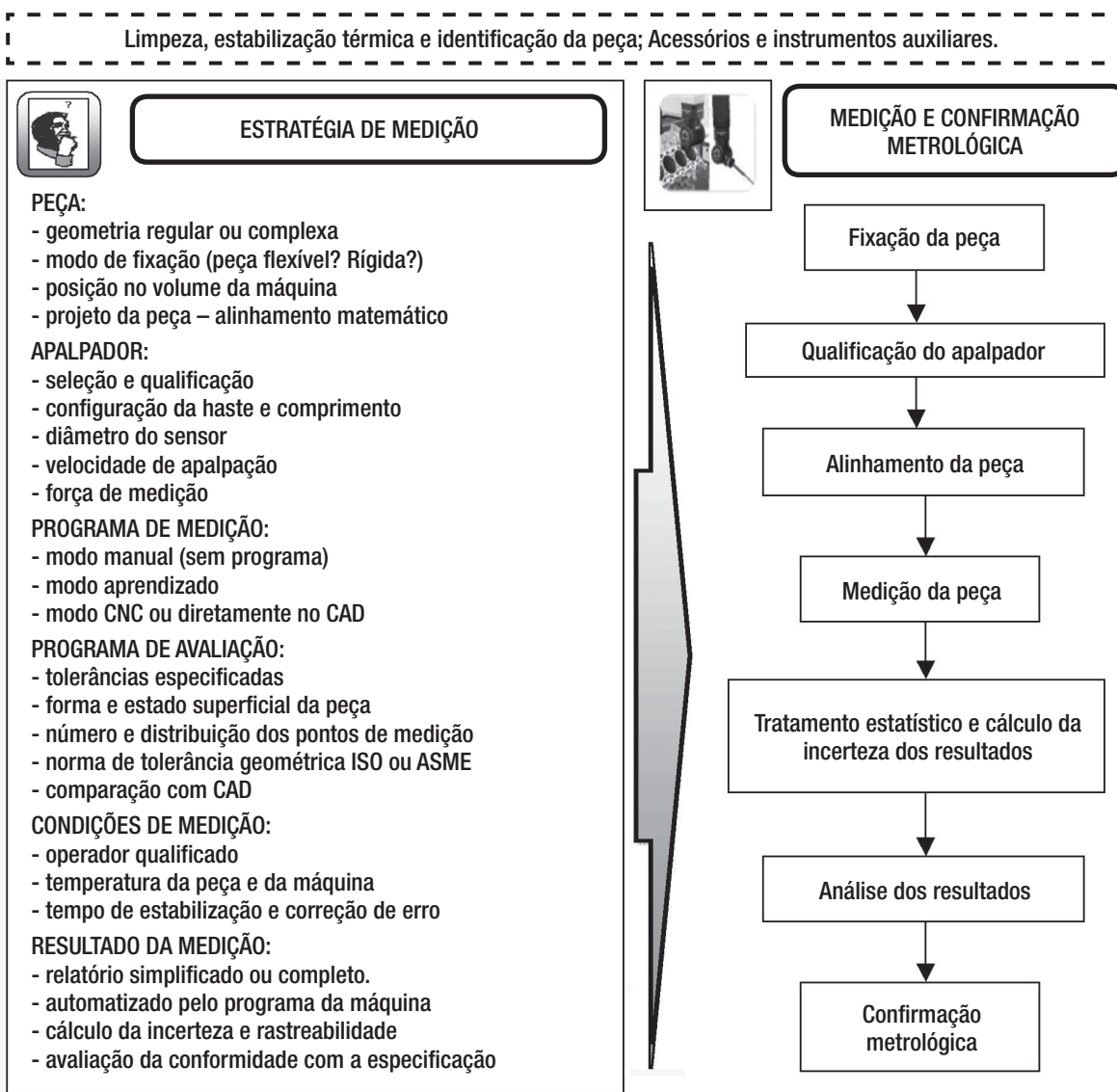
| TAREFAS | ASPECTOS A SEREM CONSIDERADOS | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------|--------------------------|-----------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------------|------------------|
| | Geometria da peça | Micro e macro geometria da peça | Programa de medição | Características da peça. | Projeto da peça | Incerteza da máquina de medir | Nível de incerteza | Qualificação Recursos humanos | Tempo de medição |
| Posição da peça no volume da MMC | X | | | | | X | X | X | |
| Fixação da peça | X | | | X | X | | | X | |
| Seleção do apalpador | X | X | | X | | | | X | |
| Diâmetro do sensor | X | X | | | | | | X | |
| Haste e comprimento do apalpador | X | | | | | | | X | |
| Velocidade de apalpação | X | | | X | | | X | X | X |
| Força de apalpação | | | | X | | | X | X | |
| Acessórios de fixação | X | | | | | | | X | |
| Sistema de coordenadas (alinhamento) | | | | | X | | | X | |
| Referências (<i>datums</i>) | | X | | | X | | | X | |
| Definição do número de pontos | X | X | | | | | X | X | X |
| Distribuição dos pontos de medição | X | X | | | | | X | X | |
| Seleção do algoritmo de avaliação | X | | X | | | | X | X | |
| Temperatura de medição | | | | X | | | X | X | |
| Número de medições | | | | | | | X | X | X |
| Avaliação da incerteza | | | | | | X | X | X | |

Fonte: Adaptado de Brito (2003).

Após a discussão e entendimento de todos os aspectos que compõem o planejamento da medição, a tarefa seguinte é a elaboração da estratégia de medição, para cada característica a ser medida.

Na figura 7 constam os aspectos a serem considerados na elaboração da estratégia de medição e sequência da medição por coordenadas. Observa-se a diversidade de fatores que devem ser analisados para se estabelecer uma estratégia de medição adequada. Portanto, não é possível padronizar a estratégia de medição para todas as situações possíveis, uma vez que para elementos geométricos diferentes, existirão estratégias de medição distintas. A medição deve, portanto, ser orientada à característica do elemento geométrico a ser medido.

Figura 7 – Aspectos a serem considerados para estratégia de medição e sequência da medição por coordenadas.



Fonte: Elaborado pelos autores

3.3. Medição e confirmação metrológica

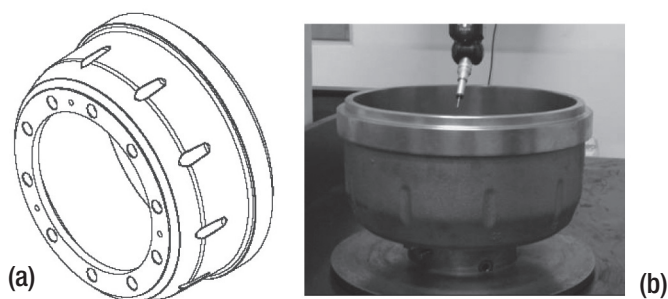
O procedimento de medição, definido a partir do planejamento da medição, segue o estabelecido pelo fluxograma da figura 7. A qualificação do metrologista é fundamental para garantia da qualidade dos resultados da medição, de modo que o processo de medição somente deve ser continuado, se não houver dúvidas em cada etapa.

O termo confirmação metrológica, utilizado neste trabalho, compreende as ações para confirmar se o processo de medição realizado atende às especificações de tolerância estabelecidas ou limites de variabilidade do processo de fabricação. Para tanto, são realizados estudos de avaliação da incerteza do processo de medição, através de documentos da ISO ou através de estudos de repetitividade, reprodutibilidade, estabilidade, etc.

4. ESTUDO DE CASO

O experimento consistiu da medição dos principais parâmetros dimensionais e geométricos de um tambor de freio, fabricado em ferro fundido e usinado conforme projeto. Na figura 8, é apresentado o desenho em três dimensões da peça (a) e uma das peças utilizadas para o estudo (b).

Figura 8 – Desenho 3D da peça (a) e montagem da peça na MMC (b).



A empresa participante do estudo de caso é fornecedora de peças para grandes montadoras de veículos, com atuação no mercado interno e externo e possui certificação pela norma ISO/TS 16949, para o setor automotivo, além de ISO 9001 e ISO 14000.

As medições foram realizadas numa máquina de medir *Mitutoyo*, modelo BLN C710, com faixa nominal 700x1000x500 mm com cabeçote PH-10M e apalpador TP-2. O programa computacional foi o *GeopakWin*, versão 2.4 R8.

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

disponível no eixo X da máquina.

A maior tendência informada no certificado de calibração da MMC foi de -0,001 9mm na sua diagonal, denominada de E4 para o ponto 410mm. A incerteza de medição expressa no certificado de calibração é uma função do comprimento medido, com a seguinte equação: $(1,2 + L/1300) \mu\text{m}$, com L em milímetros para aproximadamente 95% de confiança e $k=2,1$.

A estratégia utilizada no estudo dessa peça foi acompanhar algumas medições rotineiras, na condição de observador e, depois, discutir com o grupo (técnicos do laboratório, projeto e usinagem) as questões relacionadas com o planejamento e estratégia de medição, observando os itens citados no quadro 3 e figura 7. No quadro 4, constam os principais pontos discutidos e as sugestões apresentadas.

Quadro 4 – Sugestões e melhorias.

| PEÇA | COMENTÁRIOS/ SUGESTÕES |
|--|--|
| A peça não é fixada na sua posição funcional, por limitação de acesso às medições internas. | <ul style="list-style-type: none"> - Peça rígida, portanto, as deformações são desprezíveis frente às tolerâncias da peça; - Gabarito tipo meia-lua para fixação funcional; - Configuração de haste longa que permita a medição de toda peça, sem mudança de posição. |
| O desenho com diversas inconsistências, com respeito às especificações de tolerâncias geométricas. | <ul style="list-style-type: none"> - Incluir a área de projeto e usinagem nos cursos sobre metrologia e GD&T; - Maior controle nas versões dos desenhos; - Aprimorar o canal de comunicação técnica entre fornecedor e cliente. |
| O alinhamento matemático da peça não é realizado pelos elementos de referência, definidos no desenho, por conta da limitação de acesso ao elemento. | <ul style="list-style-type: none"> - Analisar a possibilidade de uma nova posição de medição para a peça; - As tolerâncias geométricas de orientação e posição devem ser medidas pelas referências no desenho técnico. |
| PROGRAMA DE AVALIAÇÃO | COMENTÁRIOS/ SUGESTÕES |
| Uso geral dos mínimos quadrados como algoritmo de ajuste. A distribuição dos pontos de medição é adequada, mas o nº de pontos deve ser melhor analisado. | <ul style="list-style-type: none"> - As características medidas são usinadas e apresentam baixo erro de forma. - Para superfície da peça em bruto, mais pontos de medição devem ser coletados. |
| CONDIÇÕES DE MEDIÇÃO | COMENTÁRIOS/ SUGESTÕES |
| Medições realizadas em uma temperatura média ambiente de 22°C. O tempo de estabilização das peças não é padronizado e a correção dos erros sistemáticos não é realizada. | <ul style="list-style-type: none"> - As peças devem ser limpas antes da medição e inspecionadas, visualmente, com respeito a rebarbas ou sujeira; - Analisar o tempo de estabilização térmica das peças e avaliar uma possível correção para as medidas lineares. |

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.1. Resultados e confirmação metrológica

Na tabela 1, está apresentado um resumo das cotas de interesse nesse trabalho. Verifica-se que todas as características foram aprovadas, com respeito às tolerâncias de projeto.

Tabela 1 – Resultado das medições.

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

Nesse experimento, foram realizados dois estudos de R&R (repetitividade e reprodutibilidade), pelo método da média e amplitude, para a peça em questão, com o objetivo de comparar e validar a proposta apresentada. O método da média e amplitude estima tanto as variações para repetitividade quanto à reprodutibilidade do sistema de medição, tratando-as separadamente. O estudo de R&R é composto de duas partes: as análises gráficas e as análises através de cálculos numéricos (AIAG, 2002). O primeiro estudo de R&R seguiu o procedimento interno do laboratório de metrologia, sem nenhuma alteração por parte dos autores.

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

No estudo de R&R, o critério para verificar se a variabilidade do sistema de medição é satisfatória ou não, está definida no manual do AIAG (2002), da seguinte forma:

- % R & R ≤ 10 %: sistema de medição é considerado aceitável;
- 10 % < % R & R ≤ 30 %: sistema de medição pode ser aceito, com base na importância de sua aplicação, no custo do equipamento de medição, no custo do reparo, entre outros fatores;
- % R & R > 30 %: sistema de medição considerado não aceitável.

Além desse critério, o manual do AIAG (2002), também define uma regra para o número de distintas categorias (ndc), que significa o número de distintas variações do produto que as medições realizadas podem diferenciar. A regra é a seguinte:

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

Pelos resultados da fase 1 do estudo de R&R, verificou-se a existência de uma pequena diferença entre operadores, em especial do operador B, com os demais. Uma provável causa apontada foi a falta de uniformidade no pré-alinhamento manual da peça na placa de fixação. A medição foi replicada para a mesma peça e operador e a causa especial eliminada. O percentual de R&R foi de 13,12% e o ndc de 6, indicando um sistema de medição aceitável, com base na sua importância e custo.

A segunda fase do estudo de R&R consistiu em repetir o estudo, com alteração no programa CNC da medição, a partir do estudo do desenho técnico da peça e da estratégia de medição. A primeira alteração foi com respeito ao alinhamento matemático da peça, utilizando os elementos de referência definidos no desenho técnico. Outra modificação foi a marcação de um ponto de referência na placa e nas peças para um pré-alinhamento manual mais uniforme. A terceira mudança importante foi a alteração do número de pontos de medição, baseado na norma inglesa BS 7172 (1989), conforme apresentado na tabela 2 para as características 1, 2, 3, 5 e 6.

Tabela 2 – Alterações no número de pontos a medir.

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

O gráfico das médias superpostas está apresentado na figura 9. Pelo gráfico, verifica-se que a MMC permanece com suficiente discriminação da variação das peças selecionadas para o estudo. Também, pelo gráfico, parece não haver diferença significativa entre os operadores A, B e C.

Figura 9 – Gráfico das médias superpostas do estudo fase 2.

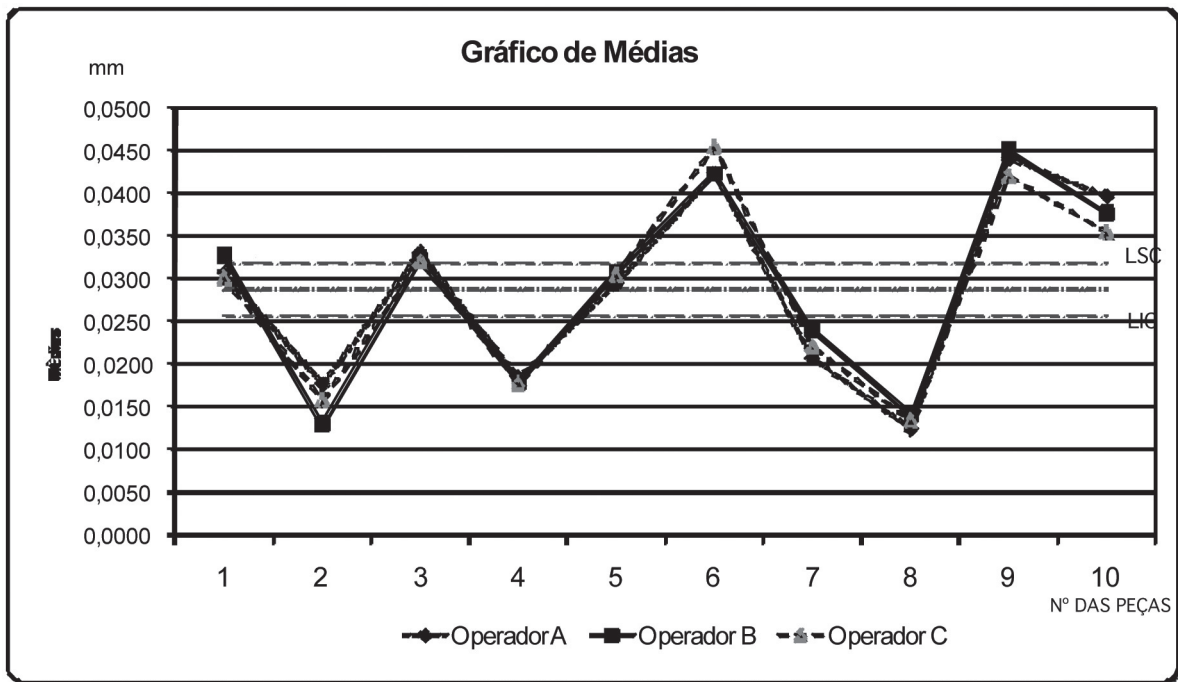
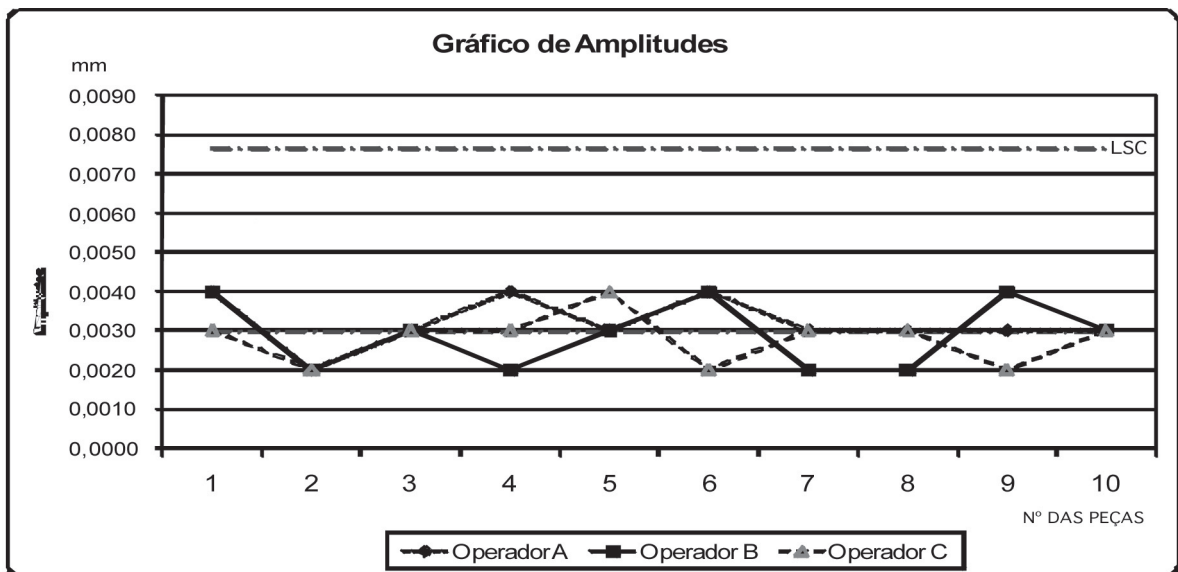


Figura 10 – Gráfico das amplitudes superpostas do estudo fase 2.



No gráfico das amplitudes superpostas da figura 10, verifica-se que não houve causas especiais e se confirma a pequena diferença entre operadores, indicando que os mesmos realizam as medições de uma maneira mais uniforme.

Na tabela 3, verifica-se que o percentual do R&R diminuiu com relação ao estudo anterior, mas ainda permanece um pouco acima de 10%. O número de categorias distintas (ndc) aumentou, indicando que o sistema de medição tem agora maior poder de diferenciar classes de peças da mesma categoria.

Tabela 3 – Resultados numéricos da segunda fase do estudo de R&R.

| Componentes de Variação | | Variação Percentual | |
|-------------------------|-----|--|--------------------------|
| mm | % | Variação Total (Controle do Processo) | Tolerância (Inspeção) |
| VE = 0,0018 | VE | 18,00 % | 10,52 % |
| VA = 0,0000 | VA | 0,00 % | 0,00% |
| R&R = 0,0018 | R&R | 18,00% | 10,52 % |
| VP = 0,0096 | VP | 98,37 % | 57,47% |
| VT = 0,0097 | | | |
| ndc | | 7 | |

VE – Repetitividade; VA – Reprodutibilidade; VP – Variação da peça; VT – Variação Total; R&R – Repetitividade e Reprodutibilidade

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou, com base em informações do relatório ISO/TC 213 e nas informações coletadas em visitas e um estudo de caso, uma relação de causas de desvios dimensionais na fabricação de produtos. Pôde-se constatar que a maioria dos problemas apontados envolve as atividades de projeto, fabricação e metrologia.

Foram discutidos os princípios de tolerância tradicional (ou cartesiano) e o princípio de tolerância geométrica. Mostrou-se que apenas tolerância de dimensão não é suficiente para transmitir as funções da peça, quando tolerâncias geométricas estão presentes.

Foram apresentadas e discutidas as principais diferenças filosóficas entre as linguagens ASME e ISO, para dimensionamento e tolerância geométrica. Na figura 3, foram apresentadas as diferenças entre os princípios da independência e o de Taylor.

Com respeito à medição por coordenadas, foram apresentadas as principais fontes de erros que compõem o processo de medição. Pode-se concluir que a medição por coordenadas não é uma tarefa trivial, pois envolve inúmeras fontes de erros, às vezes correlacionadas. Essa tarefa pode ser difícil, quando envolve a medição de peças com geometria complexa, uma vez que não existem geometrias substitutas para esses casos, nos programas de medição e de avaliação das máquinas de medir por coordenadas.

Foi proposta uma sistemática para garantia da qualidade da medição para peças complexas, utilizando máquina de medir por coordenadas. A metodologia foi aplicada numa empresa fornecedora de componentes automotivos para o mercado interno e externo. A peça selecionada foi um tambor de freio, com múltiplas tolerâncias dimensionais e geométricas. A sistemática mostrou-se de fácil implementação, em uma empresa certificada ISO 9001 e TS 16949. Entretanto, a principal dificuldade operacional, para aplicação da proposta, foi a falta de integração entre os setores de projeto, fabricação e metrologia, com respeito à troca de informações.

A aplicação da sistemática na medição contribuiu para identificação de diversos pontos de melhoria na empresa, tais como as inconsistências nos desenhos técnicos e na forma de fixação e alinhamento da peça em estudo. A utilização de estudo de repetitividade e reprodutibilidade, realizado periodicamente pela empresa, permitiu a validação metrológica do método proposto, com a redução da variação do sistema de medição de 13,12% para 10,52%, relativo à tolerância da característica medida.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- THE AUTOMOTIVE INDUSTRIES ACTION GROUP. **AIAG: Measurement Systems Analysis (MSA)**. Reference Manual. Third Edition, 239p. USA, Michigan, 2002.
- AMERICAN SOCIETY FOR MECHANICAL ENGINEERS. **ASME, Y14.5: Dimensioning and Tolerancing** - Engineering Drawing and Related Documentation Practices, USA, 224p. 2009.
- BRITO, A. A. **A Tecnologia da Medição por Coordenadas na Calibração de Peças-Padrão e Medição de Peças com Geometrias Complexas**, Florianópolis, SC, 99p. Dissertação (mestrado em Metrologia Científica e Industrial). Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, 2003.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 7172: Guide to assessment of position, size and departure from nominal form of geometric features**, 20p.1989.
- CONCHERI, G., CRISTOFOLINI, I., MENEGHELLO, R. **Geometric Dimensioning and Tolerancing (GD&T) versus Geometrical Product Specification (GPS)**, XII ADM International Conference, Grand Hotel, Rimini, Italy, 2001.
- DONATELLI, G. D, GONÇALVES. A. A, SCHNEIDER, C. A, *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, p. 9-28, 2005.

- FENG, C. J.; SAAL, A. L.; SALSBUURY, J. G. et.al. Design and analysis of experiments in CMM measurement uncertainty study, **Precision Engineering**, v.31, p. 94–101, 2007.
- FENG S. C.; HOPP T. H. **A review of current geometric tolerancing theories and inspection data analysis algorithms**, NISTIR 4509, National Institute of Standards and Technology, USA, 1991
- FLACK, D.; BEVAN, K. **Fundamental Good Practice in the Design and Interpretation of Engineering Drawings for Measurement Processes**, National Physical Laboratory, ISSN 1368-6550, Guide 79, Hampton Road, Teddington, Middlesex, 2005
- GIGO, L. G. **Estação de medição por coordenadas na produção de peças complexas – metodologia de especificação**, Florianópolis, SC, 87p. Dissertação (mestrado em Metrologia Científica e Industrial). Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, 1999.
- HAMBURG-PIEKAR, D. S. **Calibração de peças-padrão em máquinas de medir por coordenadas**, Florianópolis, SC, 167p. Dissertação (mestrado em Metrologia Científica e Industrial). Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, 2006.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO/TC 213: **Dimensional and geometrical product specifications and verification** – Business Plan. Executive Summary. Version: 5 Draft, 14p.2008.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO/TR 14638: **Geometrical product specification (GPS)** – MasterPlan. First Edition, 35p. 1995.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 1101: **Geometrical tolerancing** - Tolerances of form, orientation, location and run-out. Second Edition, 62p. 2004.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14253-1: **Geometrical Product Specifications (GPS)** – Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment – Part 1: Decision rules for proving conformance or non-conformance with specifications. First Edition, 20p. 1998.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO/TS 16949: **Quality management systems** - Particular requirements for the application of ISO 9001:2008 for automotive production and relevant service part organizations. First Edition, 48p. 2009. LI, Y., GU, P. Free-form Surface Inspection Techniques State of the Art Review, **Computer-Aided Design**, v.36, p. 1395–1417, 2004.
- KANDIKJANA, T.; SHAH, J. J.; DAVIDSON, J. K. A mechanism for validating dimensioning and tolerancing schemes in CAD systems, **Computer-Aided Design**, v. 33, p. 721-73, 2001.
- KRULIKOWSKI, A. **Advanced Concepts of GD&T Based on ASME Y14.5M-1994**, First Edition, Effective Training Inc., 391p. EUA. 1999.
- KUNZMANN, H.; PFEIFER, T.; SCHMITT, R.; SCHWENKE, H.; WECKENMANN, A. Productive Metrology - Adding Value to Manufacture, **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v 54, Issue 2, p.155-168, 2005.

MAVROIDIS, C.; GATLA, K. A **Review of tolerance analysis of mechanical assemblies**, First year Report and second year Research Proposal, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Rutgers University, University of New Jersey, 2002. Disponível em <http://robots.rutgers.edu/papers/Mavroidis_Report.pdf>. Acesso em: 26 mai. 2011.

MAZIERO, N. L.; FERREIRA, J. C. E.; GUBERT, E. Desenvolvimento de um banco de dados de tolerâncias, visando à integração com um sistema CAD, **Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica**, Bauru, SP, 1997. Disponível em <<http://www.grima.ufsc.br/papers/PaperCobem97CAD.pdf>>. Acesso em: 4 jun. 2011.

ORREGO, R. M. M.; DI GIACOMO B.; ABACKERLI, A. J. Fontes de Erros em Metrologia a Três Coordenadas: considerações gerais, **Revista de Ciência & Tecnologia**, v. 8, nº 16, p. 43-56, 2000.

SAVIO, E.; DE CHIFFRE, L.; SCHMITT, R. Metrology of freeform shaped parts. *In: Annals of the CIRP*. v.56, nº 2, p.810-835, 2007.

SCHNEIDER, F. **Tolérancement Géométrique Interprétation**. IUFM de Lorraine Université de Metz. Île du Saulcy. 57 045, Paris, 2005. Disponível em: <www.ac-nancy-metz.fr> Acesso em: 5 jun. 2011.

WANDECK, M.; SOUSA, A. R. Análise funcional e metrológica dos princípios de Taylor e da Independência na especificação e controle geométrico de produtos, **Anais do 1º. Congresso Internacional de Metrologia - CIMMEC**, 08 a 10 de outubro. Rio de Janeiro, RJ, 2008. ID 12. 1CD-ROM.

WECKENMANN, A.; KNAUER, M.; KILLMAIER, T. Uncertainty of coordinate measurements on sheet-metal parts in the automotive industry, **Journal of materials processing technology**, v.115, p. 9-13, 2001.