



UMA PROPOSTA PARA GARANTIA DA QUALIDADE NA MEDIÇÃO DE PEÇAS COM GEOMETRIA COMPLEXA UTILIZANDO MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS

*Luiz Soares Júnior*¹, *João Bosco de Aquino Silva*²,

¹ UFC, Fortaleza, Brasil, lsjota@gmail.com

² UFPB, João Pessoa, Brasil, jbdeaquino@uol.com.br

Resumo: Este trabalho propõe uma sistemática com procedimentos 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 baseados em um amplo estudo bibliográfico; nas informações e discussões resultantes de visitas em seis empresas de médio porte que projetam, medem e fabricam produtos; na troca de informações com especialistas da área e nos resultados de medição de um tambor de freio em uma empresa fornecedora de componentes mecânicos para o setor automotivo. A sistemática proposta considera para confirmação metrológica os parâmetros de incerteza do processo de medição com base na norma internacional ISO/TS 14253-1 e Repetitividade e Reprodutibilidade (R&R) do Manual de Análise dos Sistemas de Medição. O estudo de caso serviu para validar a metodologia proposta que se mostrou de fácil aplicação.

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

1. INTRODUÇÃO

As transformações que a manufatura mundial tem experimentado nos últimos anos 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 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 [1].

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 com geometrias complexas em produtos de diferentes áreas, destacando-se os setores automotivo, aeronáutico e eletroeletrônico.

Nas atividades de controle dimensional e geométrico têm-se destaque para as tecnologias de medição por coordenadas, onde é possível integrar equipamento de medição e programa computacional ao ciclo de desenvolvimento do produto e comparar os pontos medidos diretamente no modelo CAD da peça [2].

Entretanto, apesar dos avanços tecnológicos, o projeto do produto continua sendo um dos maiores problemas da indústria [3,4]. Esses problemas vão desde a concepção do projeto até problemas exclusivos de fabricação e montagem que muitas vezes são descobertos no estágio de inspeção final ou uso do produto.

Segundo o relatório ISO/TC 213 da ISO (International Organization for Standardization) [5], 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 [6].

As causas desses desvios de qualidade são diversas e muitas vezes complexas.

- Entre as causas prováveis citam-se [3,5]:
- 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 que boa parte das possíveis causas relatadas acima tem relação direta com a atividade de garantia da qualidade e com metrologia na empresa. Esse panorama pode ser ainda mais crítico quando se tratam de peças com geometria complexa.

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. As recomendações constantes na proposta são resultados do trabalho de Tese na UFPB, visitas técnicas a seis empresas de médio porte, troca de informações com especialistas da área e 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 é apresentada a sistemática proposta e na seção 3 é mostrado um estudo de caso real com o modelo proposto. Os resultados são apresentados na seção 4 e as conclusões na seção 5.

2. SISTEMÁTICA PROPOSTA

A sistematização de informações consiste de um conjunto de diretrizes, focadas nas principais fontes de erros na medição por coordenadas. 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 e nem ser a única forma de resolvê-los. Ela deve apoiar, por exemplo, a seqüência 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.

Na Figura 1 estão descritos 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.

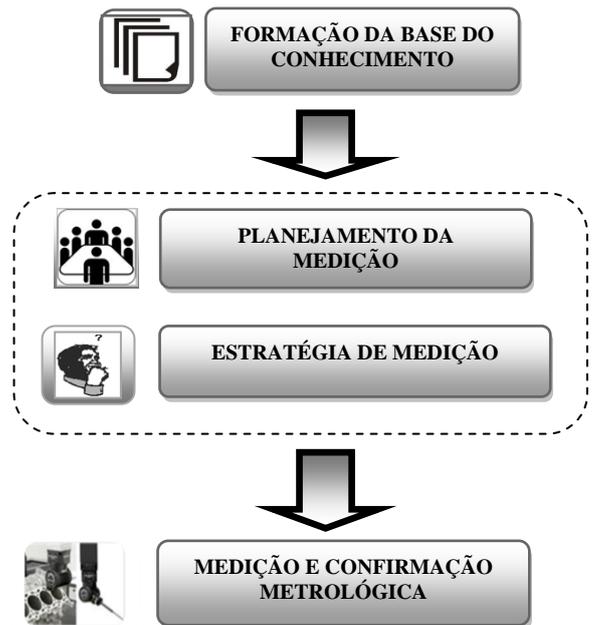


Figura 1 – Módulos que caracterizam a sistemática proposta

2.1 Formação da base do conhecimento

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

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

2.2 Planejamento da medição

O planejamento da medição envolve as informações relevantes obtidas do módulo “Formação da base do conhecimento” que contribuem para a elaboração da estratégia de medição e o relatório de medição.

Não há um modelo único para se planejar a estratégia na medição por coordenadas. Deve-se levar em conta o nível de detalhe de informações e os requisitos do cliente e do sistema de garantia da qualidade da empresa.

No setor automotivo, por exemplo, há falhas no relacionamento entre fornecedor e cliente com respeito à elaboração do plano de medição. Nesse caso, o plano de medição deveria ser encaminhado aos fornecedores juntamente com o desenho do produto, antes mesmo da seleção do fornecedor [7].

Na Tabela 1 constam aspectos importantes que deverão ser considerados e discutidos no planejamento de cada tarefa de medição em uma MMC.

Tabela 1 - Aspectos para elaboração do planejamento da medição (adaptado de [8])

TAREFAS	ASPECTOS A SEREM CONSIDERADOS								
	Geometria da peça	Geometria da peça	Programa de medição	Caract. da peça.	Projeto da peça	IM da MMC	Nível de incerteza	Qualificação RH	Tempo de medição
Posição na MMC									
Fixação da peça									
Seleção do apalpador									
Diâmetro do sensor									
Haste e apalpador									
Vel. de apalpação									
Força de apalpação									
Acessórios de fixação									
Alinhamento									
Referências (<i>datums</i>)									
Número de pontos									
Distribuição dos pontos									
Algoritmo de avaliação									
Temp. de medição									
Número de medições									
Avaliação da incerteza									

Após a discussão e entendimento do planejamento da medição, a tarefa seguinte é a elaboração da estratégia de medição conforme Figura 2.

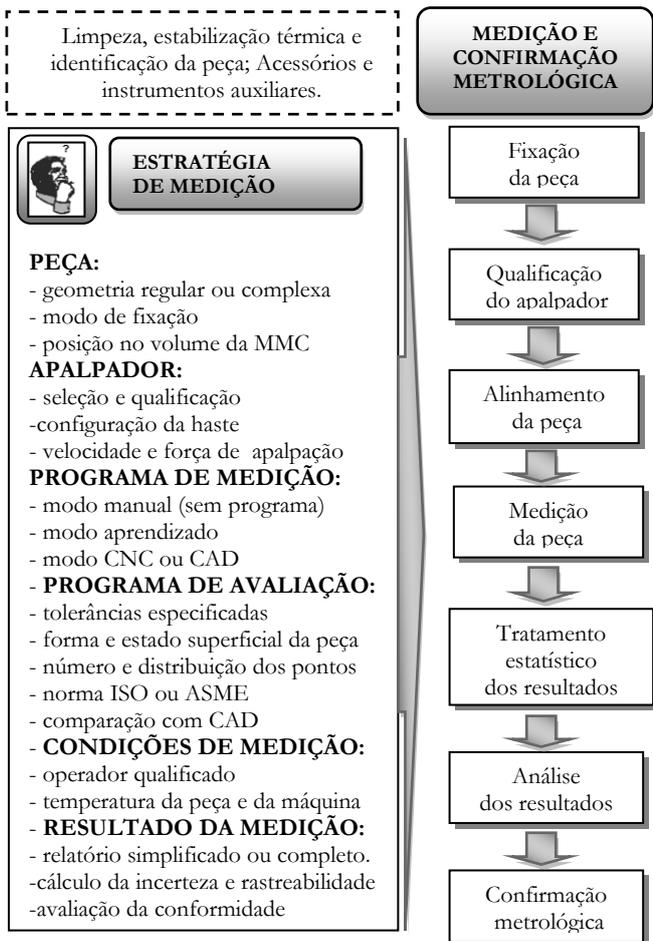


Figura 2: Aspectos a serem considerados para estratégia de medição

Observa-se na Figura 2, onde constam os aspectos a serem considerados na elaboração da estratégia de medição e sequência da medição por coordenadas, a diversidade de fatores que deve 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.

2.3 Medição e Confirmação Metrológica

O procedimento de medição, definido a partir do planejamento da medição, segue o estabelecido pelo fluxograma da Figura 2. A qualificação do metrologista é fundamental para garantia da qualidade dos resultados da medição, de modo que o processo de medição somente deve ser continuado se não houver dúvidas em cada etapa.

O termo confirmação metrológica utilizado neste trabalho compreende as ações para confirmar se o processo de medição realizado atende as especificações de tolerância estabelecidas ou limites de variabilidade do processo de fabricação.

Para tanto, são realizados estudos de avaliação da incerteza do processo de medição através de documentos da ISO ou através de estudos de repetitividade, reprodutibilidade, estabilidade, etc.

3. 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 3 é apresentado o desenho em três dimensões da peça (a) e uma das peças utilizadas para o estudo (b).



Figura 3 – 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 [9] 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 múltiplas tolerâncias geométricas para controle. A fixação é realizada no centro da mesa da MMC através de uma placa de três castanhas. O alinhamento é feito no modo automático (CNC).

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

A 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 na Tabela 1 e Figura 2 e as observações registradas das seguintes análises:

- Análise do desenho da peça e suas características;
- Pesquisa sobre os estudos de repetitividade e reprodutibilidade (R&R) realizados para o modelo de peça estudado;
- Análise das características selecionadas para medição especificadas pelo cliente, assim como as cotas críticas para estudo de R&R;
- Análise das tolerâncias de projeto, dos limites do processo de fabricação e da incerteza do processo de medição por coordenadas;
- Análise dos procedimentos de fixação, localização da peça sobre a máquina e dos pontos de medição e alinhamento.

Na Tabela 2 constam os principais pontos discutidos e as sugestões apresentadas.

Tabela 2: Sugestões e melhorias

PEÇA	
1	A peça não é fixada na sua posição funcional por limitação de acesso as medições internas.
COMENTÁRIOS/ SUGESTÕES	
-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.	
2	O desenho com diversas inconsistências com respeito às especificações de tolerâncias geométricas
COMENTÁRIOS/ SUGESTÕES	
-Curso de metrologia e GD&T para área de projeto e usinagem -Maior controle nas versões dos desenhos; -Aprimorar o canal de comunicação entre fornecedor e cliente.	
3	O alinhamento matemático da peça não é realizado pelos elementos de referência definidos no desenho por conta a limitação de acesso ao elemento.
COMENTÁRIOS/ SUGESTÕES	
- 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	
Uso geral dos mínimos quadrados como algoritmo de	

4	ajuste. A distribuição dos pontos de medição é adequada, mas o n° de pontos deve ser melhor analisado.
COMENTÁRIOS/ SUGESTÕES	
- Características medidas são usinadas com baixo erro de forma. - Superfície da peça em bruto, logo, mais pontos de medição.	
CONDIÇÕES DE MEDIÇÃO	
5	Medições 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.
COMENTÁRIOS/ SUGESTÕES	
-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.	
RESULTADO DE MEDIÇÃO	
6	O relatório de avaliação da conformidade contempla as cotas assinaladas, mas não há evidência de que a incerteza da medição é considerada no cálculo.
COMENTÁRIOS/ SUGESTÕES	
- as avaliações de conformidade dos instrumentos e sistema de medição consideram a incerteza de medição e o erro máximo informado no certificado de calibração, mas em muitas situações o cálculo é subestimado. - A incerteza do processo de medição não é considerada e sugere-se realizar um estudo para características críticas medidas.	

Cabe ressaltar que algumas constatações apresentadas na Tabela 2 como, por exemplo, a não aplicação da incerteza do processo de medição na avaliação da conformidade e inconsistências nos desenhos técnicos foram comuns nas empresas pesquisadas.

Com respeito à avaliação da conformidade utilizando a incerteza de medição, o que se constatou é que essa análise é utilizada apenas para avaliação de instrumentos ou sistema de medição, através de um “parâmetro” calculado pela raiz quadrada da soma quadrática do erro e sua incerteza associada informados no certificado de calibração. Esse “parâmetro” é então comparado com a tolerância do produto.

A prática de se combinar quadraticamente a incerteza de medição e o erro sempre subestima o “parâmetro” resultante e não tem fundamentação no ISO GUM [10] que recomenda, quando não for feita a correção do erro, que a combinação seja linear.

4. RESULTADOS E CONFIRMAÇÃO METROLÓGICA

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 estudo de R&R é composto de análises gráficas e análises através de cálculos numéricos [11], onde são estimadas as variações para repetitividade quanto à reprodutibilidade do sistema de medição, tratando-as separadamente.

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

Na Tabela 3 está apresentado um resumo das cotas de interesse onde se verifica que todas as características foram aprovadas com respeito às tolerâncias de projeto.

Tabela 3 – Resultado das medições

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

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 [11] 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.

O manual do AIAG [11] 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 [12] conforme apresentado na Tabela 4 para as características 1, 2, 3, 5 e 6.

Tabela 4 – Resultado das medições

	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	Cinco (05) pontos em três (03) círculos espaçados de aprox. 35 mm
6	Concentricidade diâmetro lona de freio	Avaliado indiretamente	Avaliado indiretamente

O gráfico das médias superpostas está apresentado na Figura 4. 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.

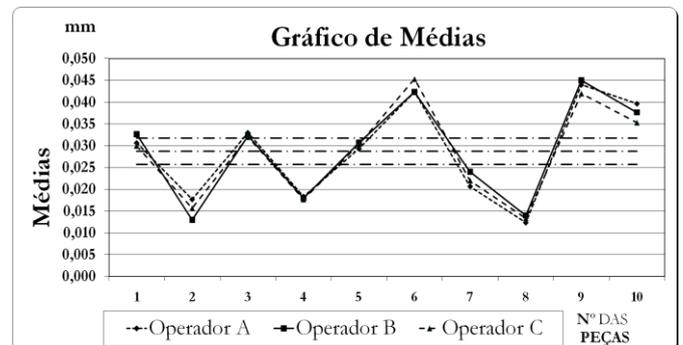


Figura 4: Gráfico das médias superpostas do estudo fase 2

No gráfico das amplitudes da Figura 5, verifica-se que não houve causas especiais, confirmando a pequena diferença entre operadores indicando que os mesmos realizam as medições de uma maneira mais uniforme.

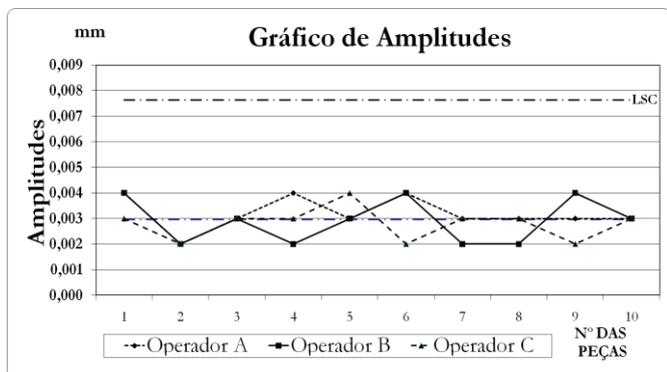


Figura 5: Gráfico das amplitudes superpostas do estudo fase 2

Na Tabela 5 verifica-se que o percentual do R&R diminuiu com relação ao estudo anterior, mas ainda acima de 10%. O número de categorias distintas (ndc) aumentou indicando que o sistema de medição pode diferenciar classes de peças da mesma categoria.

Tabela 5: Resultados numéricos da segunda fase do estudo de R&R.

	Variação percentual	
	Variação Total	Tolerância
%VE	18,00 %	10,52 %
%VA	0,00 %	0,00%
%R&R	18,00%	10,52 %
%VP	98,37 %	57,47%
ndc	7	

5. CONCLUSÕES

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.

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 se mostrou 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 diversas inconsistências, entre elas podem-se citar os erros nos desenhos técnicos e forma inadequada 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.

REFERÊNCIAS

- [1] Savio, E., De Chiffre, L., Schmitt, R., 2007, "Metrology of freeform shaped parts", *Annals of the CIRP*, VOL 56/2/2007, pp.810-835.
- [2] Li, Y., Gu, P., 2004, "Free-form Surface Inspection Techniques State of the Art Review", *Computer-Aided Design* 36, pp. 1395–1417.
- [3] Donatelli, G.D, Gonçalves. A. A, Schneider, C.A, et al., 2005, "Metrologia Geométrica na Indústria - Tendências e Desafios" – *Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.*
- [4] Maziero, N. L., Ferreira, J.C.E, Gubert, E. , 1997, "Desenvolvimento de um banco de dados de tolerâncias visando a integração com um sistema CAD", *Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - Bauru, SP, Brasil.*
- [5] ISO/TC 213, 2008 - *Dimensional and geometrical product specifications and verification – Business Plan, Executive Summary Version: 5 Draft 1.*
- [6] Kunzmann, H., Pfeifer, T., Schmitt, R., Schwnnke, H., Weckenmann, A., 2005, "Productive Metrology - Adding Value to Manufacture", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Volume 54, Issue 2, Pages 155-168
- [7] VIANA, C. Z., 2006, Sistemática para a padronização de estratégias de medição por coordenadas na cadeia de suprimentos da indústria automotiva, Dissertação de mestrado apresentada Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.
- [8] Brito, A . A., 2003, *A Tecnologia da Medição por Coordenadas na Calibração de Peças Padrão e Medição de Peças com Geometrias Complexas*, Dissertação de mestrado apresentada Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.
- [9] ISO/TS 16949, 2009, *Quality management systems -- Particular requirements for the application of ISO 9001:2008 for automotive production and relevant service part organization* First Edition.
- [10] ISO-GUM, 1995, *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, Published Jointly by BIPM, IEC,IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, Geneva, Switzerland.
- [11] AIAG; ASQ, 2002, *Measurement Systems Analysis (MSA), Reference Manual*, Third Edition, The Automotive Industries Action Group, Troy.
- [12] BS 7172, 1989, *Guide to assessment of position, size and departure from nominal form of geometric features*, British Standards Institution.