



**VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING**  
**18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil**  
*August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil*

## **ESPECIFICAÇÃO E CONTROLE DE TOLERÂNCIA DE GEOMETRIAS COMPLEXAS E SUPERFÍCIES COM FORMA LIVRE**

**Luiz Soares Júnior, lsjota@gmail.com<sup>1</sup>**  
**João Bosco de Aquino Silva, jbosco@uol.com.br<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> UFC, Campus Universitário do Pici Bloco 714, Fortaleza - CE - Brasil Cep: 60455-970

<sup>2</sup> UFPB, Campus Universitário I - João Pessoa - PB – Brasil CEP 58051-900

**Resumo:** *Peças com geometrias complexas e formas livres são de grande interesse em muitas aplicações industriais. A principal característica dessas peças é a diversidade de geometrias e múltiplas tolerâncias. Caixas de câmbio, blocos de motores, discos de freio etc. são exemplos de peças complexas. As variações admissíveis de dimensão e forma são transmitidas nos desenhos de engenharia pelas normas de GD&T e ISO/GPS. No entanto, essas normas não abordam geometrias complexas. A avaliação de conformidade com a especificação é normalmente realizada por meio de máquina de medição por coordenadas, porém a evidência formal da rastreabilidade metrológica é válida apenas para geometrias regulares. Este trabalho faz uma análise sobre as normas ASME Y14.5 (GD&T), ISO-GPS e ABNT para especificação tolerância dimensional e geométrica e apresenta o estado-da-arte na garantia da rastreabilidade metrológica de pás de turbina e engrenagens medidas em máquinas de medição por coordenadas.*

**Palavras-chave:** *Tolerância, Geometria complexa, Metrologia, Forma livre.*

### **1. INTRODUÇÃO**

Peças com geometrias complexas e superfícies com formas livres são de grande interesse em muitas aplicações industriais, seja por questão funcional ou estética. Sua principal característica é a diversidade de geometrias e múltiplas tolerâncias, com a capacidade de agregar funções de diversos componentes numa só estrutura, tornando-as de alto valor. Caixas de câmbio, blocos de motores, discos de freio, pás de turbinas etc. são exemplos de peças complexas do setor automotivo. Segundo a norma ISO 17450-2 (2005), uma característica geométrica complexa não tem grau de invariância, ou seja, deslocando-se uma característica ideal ela não se mantém idêntica. Uma geometria cilíndrica, por exemplo, tem dois graus de invariância: rotação e translação em torno do seu eixo.

As variações admissíveis de peças com superfícies livres são transmitidas no desenho de engenharia através da especificação de tolerâncias de perfil de linha e de superfície com ou sem referência estabelecida. A avaliação de conformidade tipicamente consiste na comparação dos pontos coordenados medidos sobre a superfície com o modelo CAD disponível (Li and Gu, 2004). A especificação e controle inadequados podem levar a significativos custos finais de produção.

Projetistas tendem a especificar tolerâncias mais estreitas para garantir os requisitos de montagem e função da peça, mas que podem resultar em um aumento de custos de produção. Por outro lado, o fabricante prefere tolerâncias largas que favorecem a redução dos custos de produção, mas que podem aumentar os problemas de montagem. Nessa cadeia projeto-fabricação, o metrologista deve interpretar corretamente a especificação da peça no desenho de engenharia e definir procedimentos e equipamentos de medição para a avaliação da conformidade do produto. Verifica-se, portanto, que a atividade de especificação de tolerância é crítica entre projetista, fabricante e metrologista.

Apesar dos avanços tecnológicos, o projeto do produto continua sendo um dos maiores problemas da indústria. 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. É fato, na prática industrial, que nos primeiros estágios do projeto mecânico, o projetista imagina o produto ideal, ou seja, tendo dimensões e formas perfeitas. Porém, os processos de fabricação e de montagem são inerentemente imprecisos (Dantan, et al., 2008), produzindo peças que variam de dimensão, forma e textura da superfície que podem prejudicar a funcionalidade da peça ou do componente projetado.

Segundo o relatório (ISO/TC213, 2008) do Comitê Técnico 213 da ISO (International Organization for Standardization) que padroniza a verificação e especificação dimensional, geométrica de produtos, quase 80% dos custos de um produto derivam de decisões tomadas durante as fases de concepção e de produção inicial. Segundo Donatelli (2005) muitos desses desvios de qualidade gerados nas fases iniciais do projeto somente são

detectados e corrigidos nas fases de inspeção ou mesmo de utilização do produto pelo usuário final, acarretando elevados custos para a empresa em re-trabalhos e refugos.

As causas desses desvios de qualidade são diversas e muitas vezes complexas. Abaixo está uma lista de causas prováveis, sem a pretensão que seja exaustiva (Donatelli, 2005, ISO/TC213, 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 CAD, CAE, CAPP, CAM e CAI;
- falhas no registro e transferência de informação ao longo do projeto;
- negligenciamento do erro do sistema de medição e sua incerteza desde as especificações 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;

## 2. ESPECIFICAÇÃO GEOMÉTRICA DE PRODUTOS

No desenvolvimento de um produto mecânico, o principal meio de comunicação entre o projetista, fabricante e o metrologista é o desenho de engenharia. Nele estão contidas todas as informações relevantes para a concretização do produto como, por exemplo, sua especificação geométrica. Entende-se como especificação geométrica a etapa do projeto onde a faixa de desvios admissíveis de um conjunto de características de uma peça é estabelecida, levando-se em conta os requisitos funcionais. Adicionalmente é definido um nível de qualidade em conformidade com o processo de fabricação, os limites admissíveis para fabricação e a definição dos critérios avaliação de conformidade da peça (ISO 17450, 2005).

O filósofo e cientista René Descartes foi um dos precursores da especificação geométrica de produtos com a publicação, em 1637, do livro “Geometrie”, introduzindo o conceito de coordenadas cartesianas. Três séculos depois o engenheiro Stanley Parker, trabalhando em uma fábrica de torpedos da Marinha Britânica durante a Segunda Guerra Mundial, constatou que peças boas tinham sido rejeitadas quando da avaliação de tolerância de posição de furos com a cotação cartesiana. Stanley verificou que a característica crítica na montagem era o afastamento em relação ao centro do furo e, portanto, o campo de tolerância deveria ser circular e não quadrado, que limita a zona de tolerância de um valor 57% menor em relação a zona de tolerância circular. Stanley Parker provou que a forma correta da zona de tolerância de posição de um furo deveria ser cilíndrica e não retangular, introduzindo o conceito de cotação funcional (Wandek e Sousa, 2008). Na figura 1 está ilustrado o ganho em termos de variação possível da tolerância do furo sem que se perca a funcionalidade do produto.

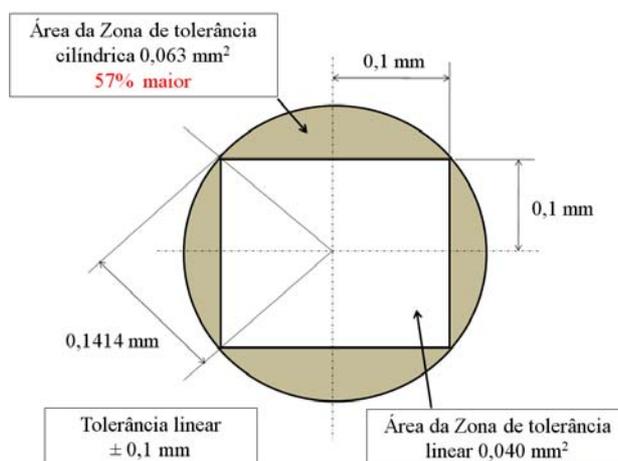
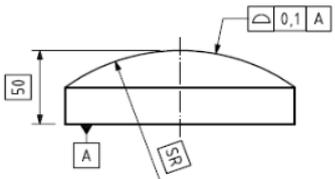
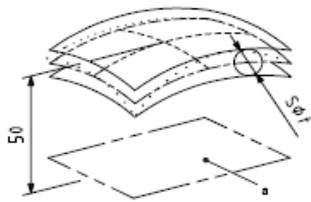


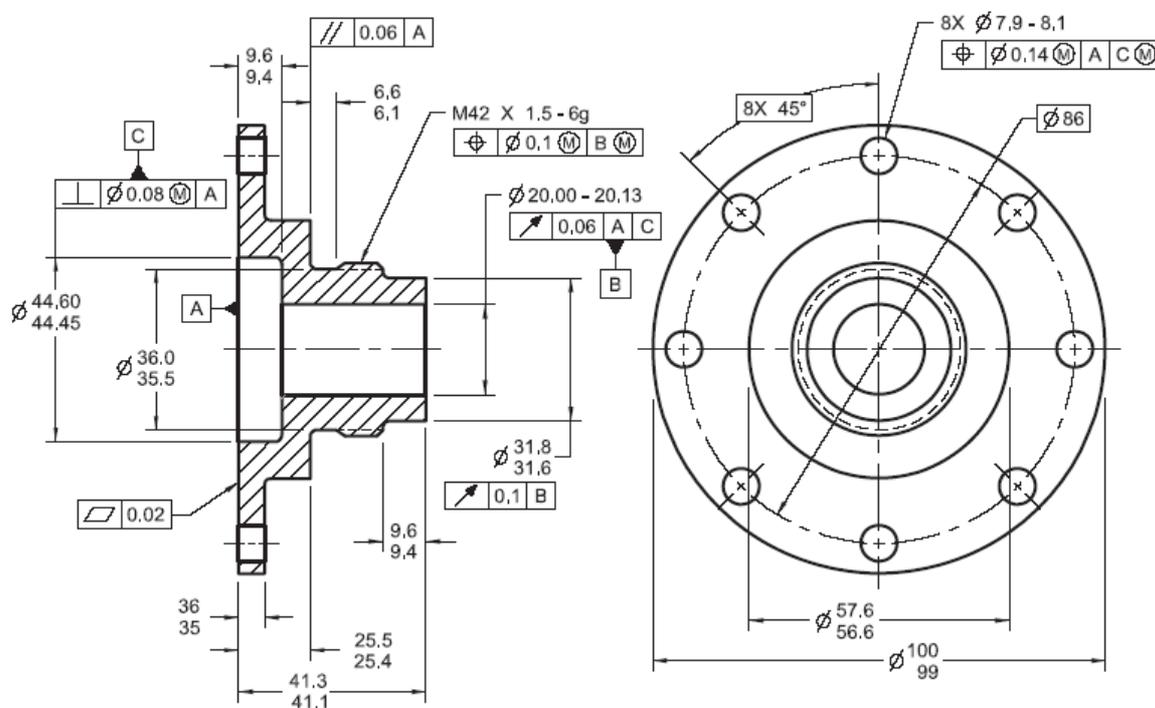
Figura 1 – Tolerância linear versus tolerância geométrica

A partir desses estudos verificou-se a limitação da cotação cartesiana dando início ao desenvolvimento de uma nova forma de especificação geométrica dos produtos que contemplasse as variações de forma e funcionalidade do produto (Wandek e Sousa, 2008). Segundo Srinivasan (2008), para especificar e expressar de forma adequada as características geométricas do produto foi necessário desenvolver uma linguagem padronizada que considerasse a sintaxe (simbologia para indicação gráfica) e a semântica (o que cada símbolo significa para interpretação na engenharia).

Simbologia	Indicação e explicação (a)	Definição da zona de tolerância (b)
		

**Figura 2 – Representação(sintaxe) da tolerância de perfil com datum (a) e interpretação (semântica) (b)**  
Adaptado de Srinivasan (2008)

Essa linguagem associada aos desenhos tipicamente em duas dimensões foi amplamente difundida no meio industrial e ficou conhecida como GD&T (*Geometrical Dimensioning and Tolerancing*). A disseminação do uso induziu o desenvolvimento de várias normas nacionais e internacionais com o fito de transmitir de forma clara, objetiva e uniforme as intenções do projeto. Um exemplo da linguagem GD&T é apresentado no desenho industrial da Figura 3.



**Figura 3 – Exemplo de desenho industrial com especificação GD&T nas vistas (ASME, 2009)**

Ao longo dos anos diversos fatores como, por exemplo, o uso intenso de computadores para auxílio aos projetos e a tecnologia para medição por coordenadas contribuíram para a fundamentação matemática do dimensionamento e especificação de tolerância. As normas atuais descritas na seção seguinte incorporaram diversos novos conceitos, como os princípios de máximo e mínimo material, a condição de independência, a zona de tolerância projetada, as zonas de tolerâncias compostas, referências (datuns), etc.

## 2.1. Normalização

A Associação Americana ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) e o Organismo Internacional para Normalização ISO (*International Organization for Standardization*) são os dois organismos de normalização mais atuantes no campo da especificação geométrica de produtos. As normas ASME 14.5-M (ASME Y14.5M, 2009) publicada em 2009 e a norma ISO 1101 (ISO 1101, 2004) publicada em 2004 estabelecem um conjunto de regras para a interpretação de tolerâncias dimensionais e geométricas e requisitos relacionados para uso nos desenhos de engenharia.

Os dois sistemas de padronização concordam em muitos pontos, mas ainda persistem algumas 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 GD&T pode ser resumida pelo princípio do envelope (ou princípio de Taylor), que estabelece uma correlação (dependência) entre variação de forma e dimensão (tamanho). Pela regra, quando somente uma tolerância de tamanho é especificada, os limites de tolerância de uma característica individual prescrevem o limite dentro do qual as variações da sua forma geométrica e de seu tamanho são permitidas. Portanto a norma ASME 14.5 – M segue o princípio de Taylor na definição de sua Regra #1 e, portanto, nos desenhos de engenharia por essa norma, as tolerâncias dimensionais já controlam os desvios de forma dentro de certos limites (Wandeck e Sousa, 2008).

Por outro lado, a linguagem GPS (*Geometrical Product Specifications*) da ISO tende a detalhar as características dimensionais e geométricas separadamente. As normas ISO 1101 e ISO 8015 seguem o princípio da independência, de modo que as tolerâncias geométricas devam ser aplicadas independentemente da tolerância dimensional (Concheri et al., 2001).

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 caso da norma ASME 14.5-M, abre-se a possibilidade de uso do princípio da independência desde que venha indicado no desenho o termo *Perfect Form Not Required at Maximum Material Condition*. A forma geométrica perfeita pressupõe que as características planeza, retilinearidade, circularidade e cilindridade são perfeitas. Enquanto que a condição de máximo material significa que a característica de tamanho contém a porção máxima de material dentro dos limites estabelecidos. Para um furo, por exemplo, a condição de máximo material é o seu menor diâmetro. Na tabela 1 estão relacionadas algumas das principais diferenças entre os dois sistemas de normalização.

**Tabela 1 – Diferenças fundamentais entre os sistemas GD&T e GPS (Concheri et al , 2001)**

ASME 14.5-M (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 considerados	Aspectos metrológicos considerados, inclusive a incerteza da medição.

A normalização brasileira nesse domínio está restrita à norma NBR 6409 que estabelece os princípios gerais para indicação das tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento e a NBR ISO 10209-2/1993 que trata dos termos relativos aos métodos de projeção, com foco na documentação técnica de produtos. A norma 6409 (NBR 6409, 1997) segue o princípio da independência, pois está baseada na ISO 1101 de 1983, no entanto está desatualizada.

## 2.2. Nova geração de normas ISO/GPS

Em 1996, uma grande força tarefa liderada por Per Bennich, criou o Comitê Técnico ISO/TC 213 (*Dimensional and geometrical product specifications and verification*) da ISO com o objetivo de harmonizar internacionalmente uma linguagem para especificação geométrica de produtos, integrar os diversos comitês de normalização nesse domínio e prover uma fundamentação matemática dos conceitos GPS, para integrá-los nos sistemas computacionais CAx(CAD, CAE, CAM, CAT, CAPP , CAI, etc.). A harmonização dos comitês ISO/TC 3-10-57 resultou na publicação do Relatório Técnico ISO/TR 14638 (ISO/TR 14638, 1995), relacionado ao sistema de normas GPS, conhecido como Plano Mestre (*Master Plan*). A base para essa nova geração de normas é transmitir sem ambigüidade a definição da peça ao longo de todo processo de produção.

O relacionamento da função, fabricação e avaliação da conformidade (metrologia) pode ser evidenciado na estrutura da matriz GPS descrita na norma ISO/TR 14638. O conceito de cadeia de normas é aplicado nas diferentes etapas do ciclo de desenvolvimento do produto. A Matriz é dividida em quatro grupos de normas onde cada cadeia de normas gerais (dezoito cadeias) possui seis links relacionando a representação no desenho até a verificação (metrologia). Na figura 3 consta a estrutura da matriz GPS.

		<b>NORMAS GLOBAIS</b> Possuem conteúdo que influenciam toda ou parte das normas gerais e complementares.							
		<b>NORMAS GERAIS</b> Este grupo congrega o maior conjunto de normas para GPS onde são definidas as regras de indicação de desenho, princípios de tolerância e verificação para diferentes características geométricas.							
<b>NORMAS FUNDAMENTAIS</b> (a norma ISO 14638 e a ISO 8015)		<b>GPS – Características geométricas</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>1</b>	Tamanho	Documentação técnica do produto – representação	Definições de tolerâncias – definições teóricas e valores	Definições das características reais (feature não ideal)	Avaliação dos desvios DDD peças – comparação com os limites de tolerância	Requisitos para os equipamentos de medição	Requisitos de calibração – Normas de calibração		
<b>2</b>	Distância								
<b>3</b>	Raio								
<b>4</b>	Ângulo								
<b>5</b>	Forma de uma linha independente de referência								
<b>6</b>	Forma de uma linha dependente de referência								
<b>7</b>	Forma de uma superfície independente de referência								
<b>8</b>	Forma de uma superfície dependente de referência								
<b>9</b>	Orientação								
<b>10</b>	Posição								
<b>11</b>	Batimento circular								
<b>12</b>	Batimento total								
<b>13</b>	Referências (Datums)								
<b>14</b>	Perfil de rugosidade								
<b>15</b>	Perfil de onda								
<b>16</b>	Perfil primário								
<b>17</b>	Defeitos em superfícies								
<b>18</b>	Arestas								
		<b>NORMAS COMPLEMENTARES</b> Este grupo contém regras complementares para especificação nos desenhos e verificação de cotas e tolerâncias de processos de fabricação (usinagem, soldagem, fundição etc.) e categorias de elementos específicos, como engrenagens, roscas, cones etc.							

Fig. 3. Modelo geral da matriz de normas GPS [adaptado de (ISO/TR 14638, 1995)]

### 3. CONROLE DIMENSIONAL E GEOMÉTRICO DE PEÇAS COMPLEXAS

Basicamente dois métodos são utilizados para medição de peças com geometria complexa e superfícies com formas livres: a comparação direta e a indireta (Li and Gu, 2004, Savio et al., 2007)]. O primeiro método consiste na verificação dos desvios entre a superfície a ser medida e o modelo físico padrão. Dentre as limitações, pode-se citar a exatidão, produtividade e a pouca flexibilidade. Na comparação indireta, a superfície real é comparada não mais com um modelo físico, mas, com um modelo geométrico da peça em um CAD 3D. Essa metodologia é mais empregada que a anterior e baseia-se na tecnologia de medição por coordenadas (Li and Gu, 2004).

Quanto às técnicas de medição, as peças com formas livres e geometria complexa podem ser medidas com ou sem contato. Na medição por contato, tem-se destaque para máquina de medição por coordenadas, onde a peça é apalpada mecanicamente por um sensor. Na medição sem contato, não há o contato físico entre o sensor e a peça e os métodos ópticos são largamente utilizados (Li and Gu, 2004).

Existem diversos tipos de sistemas de medição (manuais ou automatizados) aplicados ao controle geométricos de peças complexas. Entretanto, a máquina de medição por coordenadas (MMC) é ainda a mais utilizada. Os principais sistemas de medição podem ser agrupados segundo a classificação abaixo:

- Máquina de medição por coordenadas
- Braço articulado de medição
- Sistema fotogramétrico
- Sistema topogramétrico
- Sistema laser track

### 3.1. Máquina de medição por três coordenadas

Uma máquina de medição por coordenadas, independentemente de qual seja sua estrutura mecânica, é a representação física de um sistema de coordenadas cartesianas. 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. A flexibilidade das máquinas de medir por coordenadas aliada a sua capacidade de medir uma vasta gama de parâmetros geométricos é, sem dúvida, a maior vantagem oferecida por esta tecnologia. A possibilidade de adaptar-se rapidamente para medição de diferentes tipos de geometrias, a torna a principal opção na medição de peças com geometrias complexas (Hamburg-Piekar, 2006).

Na medição por contato em uma MMC, 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 a máquina 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.

Diferentemente das geometrias ideais (plano, cilindro, esfera, cone etc.) onde a quantidade de pontos para apalpação é normalizada, na medição de superfícies livres, a escolha do número de pontos e da posição é mais difícil, gerando normalmente 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). Adicionalmente, os efeitos das diferentes fontes de incertezas se combinam das mais diversas formas e se refletem, diretamente, nos pontos coordenados que definem as geometrias substitutas. É exatamente essa particularidade que torna extremamente complexa a análise dos erros e da incerteza de medição de qualquer tipo de máquina de medir, pois cada ponto coordenado é influenciado de forma diferente (Martinez et al., 2001).

Como não existe uma norma única metodologia que permita avaliar incertezas para qualquer tipo de medição realizada numa MMC, uma estratégia particular deve ser abordada para cada tipo de mensurando, e o modelo de medição deve estar de acordo com este (Hamburg-Piekar, 2006). Dessa forma, o termo “incerteza de medição para tarefas específicas” é geralmente utilizado. Nesse sentido, em 2004, o comitê ISO/TC 213 publicou a norma ISO/TS 15530-3 que será abordada na seção seguinte.

### 3.2. Rastreabilidade metrológica

Uma das temáticas mais abordadas em relação à medição por coordenadas é a demonstração formal da rastreabilidade metrológica para as tarefas específicas de medição dentro do volume de trabalho da MMC. Dentre os fatores que justificam a importância do tema, podemos citar:

- a rastreabilidade é um importante requisito das normas de garantia da qualidade ISO 9001, ISO/TS 16949 e ISO/IEC 17025;
- a avaliação de incerteza através do Guia para expressão da incerteza da medição – ISO GUM é de difícil aplicação para medição de peças complexas (Savio, et al., 2007).
- o procedimento de avaliação da incerteza de medição para MMC descrito na norma 15530-3 não aborda medição de geometrias complexas (Savio et al., 2007, Piratelli e Lesnau, 2007)
- os métodos atuais de avaliação de máquina de medição por coordenadas estão limitados às geometrias regulares e não garantem rastreabilidade de medidas para todas as tarefas de medição no seu volume de trabalho (Savio et al., 2007, Piratelli e Lesnau, 2007)

Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia (INMETRO, 2007), rastreabilidade refere-se 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”. Verifica-se, portanto, uma estreita relação entre rastreabilidade, incerteza da medição e método de comparação. Na prática, a comparação trata-se de uma calibração que em resumo é a determinação dos desvios verificados entre o valor indicado pelo sistema de medição e o valor verdadeiro estabelecido por um padrão reconhecido com incertezas estabelecidas.

No caso de máquina de medição por coordenadas a expressão da incerteza de medição para cada elemento geométrico medido é de difícil aplicação. Dessa forma, o que normalmente se apresenta no resultado do ensaio de calibração de uma MMC é o erro cometido na medição de comprimentos no seu volume de medição (Hamburg-Piekar, 2006).

Fabricantes de MMC, laboratórios de calibração e usuários em geral se baseiam em normas e diretrizes internacionais de aceitação e verificação de máquinas de medir, como, por exemplo, a ISO 10360-2, VDI/VDE 2617, EAL - G17 entre outras. Estas normas não tratam de calibrações, mas sim de verificações para ensaios bem definidos como erros para medição de comprimentos, posição e forma calibrados. No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT utiliza-se das normas e guias internacionais acima citadas nesse domínio (Hamburg-Piekar, 2006).

No nível internacional, o comitê técnico TC 213 da ISO, que trata de especificação geométrica de produtos – GPS publicou a série de normas ISO 15530, onde atualmente estão em vigor a ISO/DIS 15530-3 (ISO/DIS 15530-3, 2004) e

a ISO/TS 15530-4 (ISO/TS 15530-4, 2008). A norma ISO 15530-3 descreve uma metodologia para estimar incerteza de medição utilizando-se uma peça ou padrão calibrado similar as peças normalmente medidas na MMC e, portanto prover evidência formal de rastreabilidade no processo produtivo. A própria norma declara como fatores limitantes do método, a disponibilidade de peças padrão com exatidão suficiente, estabilidade, custo razoável e incerteza de calibração suficientemente pequena. Outra limitação é que a norma não trata de medição peças com geometrias complexas.

A norma 15530-4 descreve técnicas de simulação computacional onde são introduzidas informações sobre vários fatores que influenciam o desempenho da MMC, tais como, erros geométricos, erros de apalpação, etc. que quando combinados, dão como resultados, estimativas dos erros e das incertezas de tarefas de medição específicas executadas pela máquina. O PTB (*Physikalisch – Technische Bundesanstalt*) foi pioneiro no uso de simulação computacional para calibração de MMC, pelo denominado método da “CMM Virtual” (Hamburg-Piekar, 2006). A norma não explicita o método de Monte Carlo para simulação computacional e não aborda a medição de geometria complexas. Entretanto, essa metodologia ganha força uma vez que pode ser aplicada para medição de peças complexas porque o modelo CAD e o programa CNC representam bem o modelo geométrico do processo de medição.

### 3.2.1. Rastreabilidade na medição de pás de turbinas

Pás de turbinas são componentes mecânicos de geometria complexa utilizados em uma grande variedade de produtos industriais, desde ventiladores (coolers) para computadores pessoais até sistemas de alto desempenho como motores de combustão a jato. Usualmente esses componentes mecânicos podem ser medidos através de técnicas de medição com e sem contato. Atualmente o uso da medição por coordenadas associada a softwares específicos e apalpadores tipo *scanning* tem larga aplicação. Na medição sem contato os métodos ópticos têm suas vantagens, especialmente pelo elevado volume de pontos medidos sobre a superfície e a velocidade de aquisição que pode chegar tipicamente a 20 000 pontos por segundo. Ambos os métodos têm limitações devido a superposição das pás e as curvaturas muito acentuadas.

Uma contribuição recente no campo da rastreabilidade metrológica para peças complexas e na linha da norma ISO 15530-3 foi proposto Savio et al (2007). Os autores desenvolveram o conceito de MFG (*Modular FreeForm Gauge*), que basicamente é a combinação de padrões regulares calibrados, como por exemplo, blocos e cilindros padrão com o intuito de simular o quanto possível a geometria complexa que se deseja medir com essas peças regulares. O experimento focou na inspeção de uma pá de turbina, onde o MFG foi composto de um cilindro padrão e duas placas com boa planeza conforme Figura 4. Um modelo CAD de “referência” foi gerado com as posições calibradas do MFG. As incertezas de medição foram da ordem de 2 a 3 micrometros, utilizando-se uma MMC de referência. A principal vantagem citada pelo autor foi a possibilidade de calibrar o MFG por métodos bem conhecidos da metrologia dimensional e, portanto, com boa exatidão e completa rastreabilidade metrológica e um custo relativamente baixo se comparado aos artefatos padrão com forma livre.



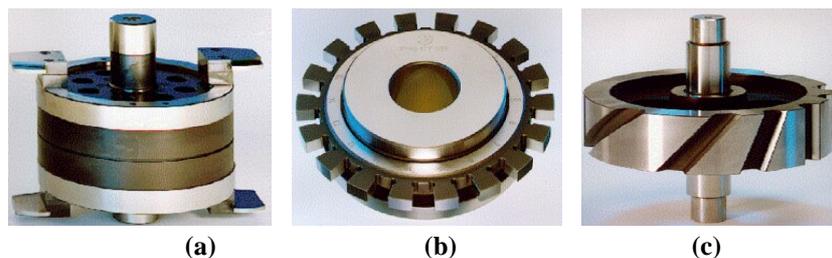
Figura 4 – Experimento montado: MFG (esquerda) e a pá de turbina (direita) (Savio et al (2007)).

Dentre as limitações da proposta apresentada consta a impossibilidade de generalização do método uma vez que o estudo focou numa geometria relativamente simples e a dificuldade de manter a similaridade geométrica do MFG com a peça a medir.

### 3.2.2. Rastreabilidade na medição de engrenagens cônicas

As engrenagens estão presentes em vários mecanismos de transmissão, aparelhos domésticos, máquinas ou motores, tipicamente com a função de transmitir movimento. Os parâmetros característicos das engrenagens são comumente os desvios de forma (erros no perfil), na orientação (linha de flanco) do dente da engrenagem, erros na espessura e no passo dos dentes, bem como o batimento radial (Sato et al., 2009). Esses desvios são medidos em máquinas de medir engrenagens controladas numericamente ou por máquinas de medição por coordenadas com características adicionais como mesa rotativa. Os resultados de medição devem ser validados sob um rigoroso sistema

de rastreabilidade e os equipamentos de medição, calibrados contra padrões corporificados que exigem níveis de incerteza bastante reduzidos. Na Figura-5 consta exemplo de padrões corporificados para engrenagens.



**Figura 5 – Padrões corporificados: (a) perfil envolvente, (b) passo e (c) ângulo de hélice (Brito, 2003).**

Devido ao custo de aquisição e manutenção da calibração desses padrões, é recomendado que o usuário mantenha uma engrenagem padrão (réplica padrão) para monitoramento da confiabilidade do processo de medição (Brito, 2003). Apesar da norma 15503-3 não abordar geometria complexa como, por exemplo, engrenagens, autores como (Datan et al., 2007, Goch, 2003) têm proposto metodologias para avaliação de incerteza e evidência da rastreabilidade metrológica, utilizando o método de medição por substituição com peças padrão baseado na norma ISO 15530-3.

Outra tendência na metrologia de engrenagens é o controle, por métodos ópticos, de toda a superfície do flanco da engrenagem e não apenas a medição do perfil, linha de flanco e passo simples, como é feito na metrologia convencional de engrenagem (Goch, 2003). A descrição 3D do flanco do dente e seu relacionamento geométrico com o passo e a espessura do dente permitem a descrição tridimensional completa de toda engrenagem. No entanto, as normas atuais de engrenagens não abordam a análise 3D do flanco e tampouco a teoria de GD&T (Datan et al., 2007).

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar da sua importância de peças com geometrias complexas no contexto atual da fabricação, verifica-se que as normas ASME 14.5-M:2009(GD&T) e a norma ISO 1101:2004(ISO/GPS) que tratam de dimensionamento e tolerância geométrica não abordam métodos de controle para peças com geometria complexa.

Os sistemas de padronização denominados de GD&T (Sistema Americano) e ISO/GPS (Internacional) possuem ainda pequenas diferenças em aspectos fundamentais que podem levar a uma interpretação equivocada dos desenhos e procedimentos de medição. A linguagem GD&T é baseada no princípio do envelope (ou princípio de Taylor), que estabelece uma correlação (dependência) entre variação de forma e dimensão (tamanho). Por outro lado, a linguagem ISO/GPS é baseada no princípio da independência que tende a detalhar as características dimensionais e geométricas separadamente. A normalização brasileira nesse domínio está restrita à norma NBR 6409:1997 que segue o princípio da independência, pois está baseada na ISO 1101 de 1983, e, portanto, está obsoleta.

Uma nova geração de normas está em desenvolvimento pelo Comitê Técnico ISO/TC 213 onde o relacionamento da função, fabricação e avaliação da conformidade (metrologia) pode ser constado na norma ISO/TR 14638, denominada de “*Master plan*”.

No campo da avaliação da conformidade com a especificação, peças com geometria complexa e formas livres são, na grande maioria, medidas em máquinas de medição por coordenadas. A metodologia mais usual de medição consiste na comparação dos pontos medidos sobre a superfície real da peça com um modelo geométrico da peça em um CAD 3D.

Apesar das muitas qualidades de uma MMC, diversos fatores contribuem para erros de medição e sua estimativa de incerteza de medição. Como não há uma metodologia única que permita avaliar incertezas para qualquer tipo de mensurando em uma MMC e, portanto o termo “incerteza de medição para tarefas específicas” é geralmente empregado. Desse modo, a demonstração formal da rastreabilidade metrológica na medição de peças complexas em laboratórios e chão de fábrica é uma questão ainda não resolvida.

Para peças com geometrias regulares, existe a norma ISO 15530-3 que descreve uma metodologia para estimar incerteza de medição utilizando-se uma peça ou padrão calibrado similar as peças normalmente medidas na MMC e, portanto prover evidência formal de rastreabilidade no processo produtivo. Dentre as limitações da norma pode-se citar a disponibilidade de peças padrão com precisão suficiente, estabilidade, custo razoável e incerteza de calibração suficientemente pequena.

Outra norma, a ISO 15530-4 descreve técnicas de simulação computacional para estimativas dos erros e das incertezas de tarefas de medição específicas executadas por MMC. A norma não considera geometrias complexas e não cita o método de Monte Carlo para simulação computacional apesar de este ser uma opção para avaliação de incertezas nos casos em que o método clássico pelo ISO-GUM não for aplicável. Essa norma ganha força uma vez que pode ser aplicada para medição de peças complexas porque o modelo CAD e o programa CNC representam bem o modelo geométrico do processo de medição.

Este trabalho apresentou uma contribuição recente no campo da rastreabilidade metrológica para peças complexas e na linha da norma ISO 15530-3 proposto Savio et al (2007). O trabalho focou na inspeção de uma pá de turbina onde foi utilizado um artefato denominado de MFG (*Modular FreeForm Gauge*), que é a combinação de padrões regulares

calibrados. A principal vantagem citada pelo autor é a possibilidade de calibrar o MFG com por métodos conhecidos da metrologia dimensional, boa exatidão, rastreabilidade metrológica e um custo relativamente baixo se comparado aos artefatos padrão com forma livre. Dentre as limitações citadas pelo autor consta a dificuldade de manter a similaridade geométrica do MFG com a peça a medir.

Na medição de engrenagens, em função dos elevados níveis de tolerância e complexidade para medir, têm-se destaque para os sistemas dedicados de medição e as MMC com mesa rotativa. A rastreabilidade desses sistemas de medição é evidenciada com o uso de padrões corporificados com níveis de incerteza bastante reduzidos.

Uma tendência na metrologia de engrenagens é o uso crescente de sistemas ópticos para o controle de toda a superfície do flanco da engrenagem e não apenas a medição do perfil, linha de flanco e passo simples. No entanto, as normas atuais de engrenagens não abordam a análise 3D do flanco e tampouco a teoria de GD&T.

Autores como (Datan et al., 2007, Goch, 2003) propuseram metodologias para avaliação de incerteza utilizando o método de medição por substituição com peças padrão baseado na norma ISO 15530-3.

## 5. REFERÊNCIAS

ASME Y14.5M, 2009, “Mathematical definition of dimensioning and tolerancing principles”, New York.

Brito, A. A., 2003, “A Tecnologia da Medição por Coordenadas na Calibração de Peças Padrão e Medição de Peças com Geometrias Complexas Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 93p. Florianópolis- SC.

Concheri, G. et al., 2001, “Geometric Dimensioning and Tolerancing (GD&T) versus Geometrical Product Specification (GPS)”, XII ADM International Conference, Grand Hotel, Rimini, Italy.

Dantan, J. Y, et al., 2007, “Geometrical Specification Model for Gear-Expression, Metrology and Analysis”, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 56, Issue 1, pp. 517-520

Donatelli, G.d, et al., 2005, “Metrologia Geométrica na Indústria - Tendências e Desafios”, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC.

Feng, Chang-Xue Jack., et al., 2007, “Design and analysis of experiments in CMM measurement uncertainty study”, Precision Engineering – 31, pp.94–10.

Goch, G., 2003, “Gear metrology”, Keynote paper, Annals of the CIRP, Vol. 52/2:659-695.

Hamburg-Piekar, D. S., 2006, “Calibração de peças padrão em máquinas de medir por coordenadas”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

ISO/TC 213, 2008, “Dimensional and geometrical product specifications and verification – Business Plan”, versão 5, localização eletrônica <http://isotc.iso.org/livelink>, acessado em 25/03/2010.

ISO/TR 14638, 1995, “Geometrical product specification – (GPS) – MasterPlan”, First Edition.

ISO 17450, 2005, “Geometrical product specifications (GPS) - General concepts — Part 1: Model for geometric specification and verifications”.

ISO 1101, 2004, “Geometrical tolerancing —Tolerances of form, orientation, location and run-out”.

ISO/TS 15530-3, 2004, “Geometrical Product Specifications (GPS) -- Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement -- Part 3: Use of calibrated workpieces or standards”.

ISO/TS 15530-4, 2008, “Geometrical Product Specifications (GPS) -- Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement -- Part 4: Evaluating task-specific measurement uncertainty using simulation”.

INMETRO, 2007, “Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia”, 52 pp., Rio de Janeiro, RJ.

Li, Y. and Gu, P., 2004, “Free-form surface inspection techniques state of the art review –Computer-Aided Design, Vol. 36, pp. 1395-1417, University of Calgary, Calgary, Canada.

Martinez, R. M., et al., 2001, “Error Sources in Coordinate Metrology: General Considerations, Revista de Ciência & Tecnologia, Vol. 8, Nº 16, pp. 43-56.

NBR 6409, 1997, “Tolerâncias geométricas – Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento – Generalidades, símbolos, definições e indicações em desenho”.

Piratelli, F. A e Lesnau, G.R., “Uma proposta para execução de testes em Máquinas de Medir por Coordenadas (MMCs). Metrologia & Instrumentação”, v. 49, p. 32-36, 2007.

Weckenmann, A. et al., 2001, “Uncertainty of coordinate measurements on sheet-metal parts in the automotive industry”, Journal of materials processing technology. Vol. 115, pp. 9-13.

Wandek, M., Sousa, A. R., 2008, “Análise funcional e metrológica dos princípios de Taylor e da Independência na especificação e controle geométrico de produtos”, 1º. Congresso Internacional de Metrologia – I CIMMEC – Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Savio, E., et al., 2007, “Metrology of freeform shaped parts”, Annals of the CIRP, Vol., 56, pp. 810-835.

Sato et al., 2010, “Calibration and uncertainty evaluation of single pitch deviation by multiple-measurement technique”, Precision Engineering Vol.34, pp.156–163.

## 6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.



**VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING**  
**18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil**  
**August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil**

## **SPECIFICATION AND CONTROL OF TOLERANCE COMPLEX GEOMETRIES AND SURFACES WITH FREE FORM**

**Luiz Soares Júnior, lsjota@gmail.com<sup>1</sup>**  
**João Bosco de Aquino Silva, jbosco@uol.com.br<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> UFC, Campus Universitário do Pici Bloco 714, Fortaleza - CE - Brasil Cep: 60455-970

<sup>2</sup> UFPB, Campus Universitário I - João Pessoa - PB – Brasil CEP 58051-900

***Abstract:** Parts with complex geometries and shapes are of great interest in many industrial applications. The main feature of these parts is the diversity of multiple geometries and tolerances. Gearboxes, engine blocks, brake discs, turbine blades etc., are examples of complex parts. The permissible variations in size and shape are transmitted in the engineering drawings by the rules of GD&T and ISO/GPS. However, these standards do not address complex geometries. The assessment of compliance with the specification is typically performed by coordinate measuring machine, but the evidence of formal metrological traceability is valid only for regular geometries. This paper makes an analysis on the ASME Y14.5 (GD&T), ISO/GPS and ABNT to dimensional and geometric tolerance specification and presents the state of the art in ensuring the metrological traceability of turbine blades and gears in machine measures coordinate measurement.*

***Keywords:** Tolerance, complex geometry, Metrology, Freeform.*