

## ANÁLISE FUNCIONAL E METROLÓGICA DOS PRINCÍPIOS DE TAYLOR E DA INDEPENDÊNCIA NA ESPECIFICAÇÃO E CONTROLE GEOMÉTRICO DE PRODUTOS.

Maurício Wandeck<sup>1</sup>, André Roberto de Sousa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> GDT Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, mauricio.wandeck@gdt.eng.br  
<sup>2</sup> CEFET/SC – Laboratório de Metrologia, Florianópolis, Brasil, asouza@cefetsc.edu.br

**Resumo:** As normas mais utilizadas internacionalmente para a especificação geométrica de produtos possuem uma diferença fundamental no que diz respeito à relação entre dimensão e forma. A norma americana ASME Y14.5M e a norma ISO1101 divergem quanto à aplicação do princípio da independência e princípio de Taylor e esta divergência pode ocasionar erros de interpretação dos desenhos e procedimentos de medição incorretos. Este artigo aborda esta divergência entre as normas, analisando funcionalmente o princípio de independência e o princípio de Taylor, bem como as suas implicações no controle geométrico de produtos. Esta análise inclui a norma brasileira NBR 6409 e aborda algumas deficiências suas neste aspecto.

**Palavras chave:** Metrologia Dimensional, GD&T, Controle Geométrico, Especificação Geométrica de produtos.

### 1. IMPORTÂNCIA ESTRATÉGICA DA ESPECIFICAÇÃO GEOMÉTRICA DE PRODUTOS

A geometria de um produto é o atributo principal para a garantia da intercambiabilidade, funcionalidade, segurança e estética e o desafio de desenvolver produtos competitivos em performance e custo depende em muito de um projeto que considere de forma adequada as variações dimensionais admissíveis, em outras palavras, a especificação das tolerâncias. Produtos com dimensões e tolerâncias mal definidas não só perdem em performance como apresentam custos de desenvolvimento e produção mais altos.

A especificação das tolerâncias exerce um papel decisivo para o sucesso do produto e para a redução dos custos de produção. Formalizadas no projeto de produto através dos desenhos de engenharia, as tolerâncias têm duas funções básicas: expressar como os diversos elementos de um componente se relacionam e determinar o grau de precisão requerido para o produto montado.

A forma de relacionamento dos elementos determina quais tipos de tolerâncias dimensionais (acoplamentos) e geométricas (posição, perfil de superfície, datums, etc) serão usados. Já o grau de precisão é determinado pelos valores destas tolerâncias. Tanto o tipo de relacionamento quanto o grau de precisão têm influência direta sobre a performance e qualidade do produto final.

O objetivo na etapa de desenvolvimento de produto é, portanto, aplicar as tolerâncias com foco na função dos componentes no conjunto e adequar os valores destas tolerâncias à melhor relação entre performance e custo, para se obter um quadro ótimo entre os custos da qualidade e os custos da não qualidade [1].

### 2. EVOLUÇÃO DA ESPECIFICAÇÃO GEOMÉTRICA DE PRODUTOS: DE DECARTES À MANUFATURA DIGITAL

Para desenvolver a especificação geométrica de um produto, é necessária a utilização de uma linguagem adequada para a especificação e expressão nos desenhos de engenharia. Neste sentido uma grande evolução do projeto mecânico ocorreu quando o filósofo e cientista René Descartes publicou em 1637 o livro “Geometrie”, que introduziu o conceito de coordenadas retangulares, estabelecendo conceitos geométricos utilizados na especificação geométrica de produtos e nos desenhos técnicos. Por muitos anos a cotação cartesiana de produtos foi feita utilizando puramente dimensões e tolerâncias lineares (figura 1).

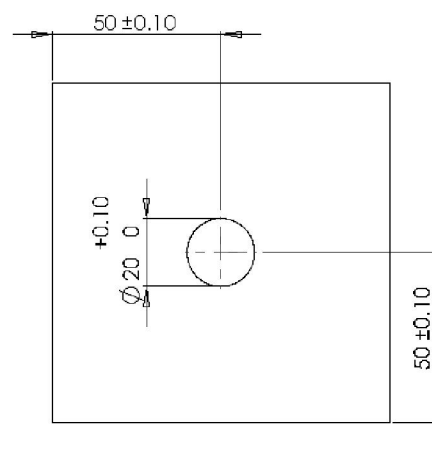


Fig. 1 – Cotação cartesiana

Trezentos anos depois o Engenheiro Stanley Parker, trabalhando em uma fábrica de torpedos da Marinha Britânica durante a 2ª guerra mundial, fez uma descoberta

que mudou a forma de especificar a geometria de produtos. Ao realizar testes com peças rejeitadas constatou que essas peças eram boas, o que estava errado era a cotação cartesiana para definir a tolerância de posição de furos.

Ao definir a tolerância da posição do furo por tolerâncias lineares, o projeto do produto acabava limitando a zona de tolerância a um valor bem abaixo do funcional, criando uma especificação muito mais restritiva do que o necessário. Stanley Parker provou que a forma correta da zona de tolerância de posição de um furo deveria ser cilíndrica e não retangular. Com isso, aproveita-se toda a variação possível da posição do furo que não comprometa a funcionalidade do produto (figura 2). Ganhos de custo sem comprometer a qualidade.

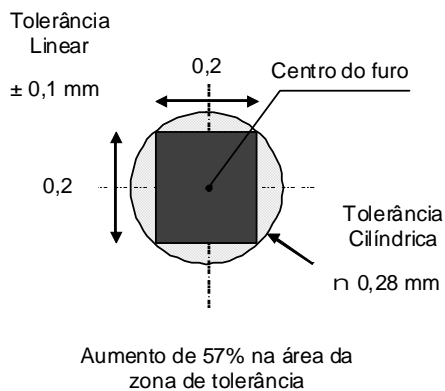


Fig. 2 – Cotação geométrica

Desse fato percebeu-se a limitação da cotação cartesiana e iniciou-se o desenvolvimento de uma nova forma de especificação geométrica dos produtos, que considere de forma mais completa as variações dimensionais e que possibilite partir da análise da função do produto e do relacionamento entre os elementos geométricos das peças, para se chegar a uma descrição clara, concisa e inequívoca destes elementos. Esta forma de cotar ficou conhecida como cotação geométrica (figura 3) ou GD&T – *Geometric Dimensioning and Tolerancing*.

Para auxiliar nesta especificação geométrica, houve a necessidade do desenvolvimento de uma linguagem adequada para a sua especificação e expressão. Para que essa linguagem possa ser eficiente nesse objetivo, deve possuir as seguintes características:

- Possuir todos os recursos para possibilitar a aplicação de tolerâncias em função do requisito do produto;
- Permitir a utilização de uma linguagem uniforme para expressão dessas tolerâncias, minimizando controvérsias e erros de interpretação ao longo da cadeia produtiva;

- Ser normalizada para garantia das relações comerciais entre as empresas, seus parceiros, fornecedores e prestadores de serviços.

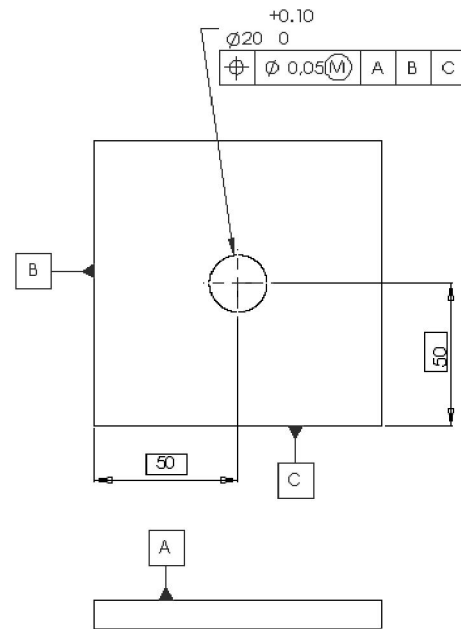


Fig. 3 – Cotação geométrica

Neste sentido foram desenvolvidas várias normas nacionais e internacionais sobre especificação geométrica de produtos, sempre com os objetivos de estabelecer meios para aplicar a tolerância de acordo com o requisito do produto e estabelecer linguagem uniforme para expressão dessas tolerâncias.

As normas mais conhecidas e utilizadas são hoje a ASME Y14.5 – M (*GD&T – Geometrical Dimensioning and Tolerancing*) [2] e as diversas normas ISO (*GPS – Geometrical Product Specification*) [3] nesse tema. Em comum eles possuem modernos recursos de cotação e expressão de tolerâncias e o fato de serem largamente utilizados nos projetos de engenharia no ambiente atual de manufatura digital. No entanto, existem diferenças em aspectos fundamentais que persistem e que podem trazer erros de interpretação dos desenhos que levem inclusive a procedimentos de medição equivocados.

No ambiente atual de manufatura digital o desafio de especificar a geometria do produto tem sido facilitado com as tecnologias computacionais de auxílio na especificação geométrica dos produtos. Esses sistemas, chamados de *Computer Aided Tolerancing*, possuem recursos matemáticos capazes de identificar, e resolver por meio de simulações computacionais, erros de montagem e incompatibilidades entre tolerâncias. Os erros são identificados e resolvidos por intermédio de simulações enquanto o projeto está na engenharia, antes da fabricação de qualquer componente ou ferramental.

### 3. RELAÇÃO DIMENSÃO E FORMA: PRINCÍPIO DA INDEPENDÊNCIA X PRINCÍPIO DE TAYLOR

Desde as primeiras tentativas de definir dimensão se observou certa dependência desta com os desvios de forma da peça.

*A dimensão de um eixo torto é o diâmetro da sua seção transversal ou o diâmetro do menor furo onde esse eixo consegue ser montado?*

Essa questão fundamental norteou as primeiras definições geométricas utilizadas nas normas de cotagem, como pode ser observado na figura 4. Em relação a isso, o **Princípio da Independência** define que:

*Cada requisito dimensional ou geométrico especificado no desenho da peça deve ser atendido individualmente, a não ser que alguma relação entre eles seja especificada.*

Já o **Princípio de Taylor** define que :

*A dimensão de uma peça corresponde ao envelope que inscreve (furo) ou circunscreve (eixo) a geometria da peça.*

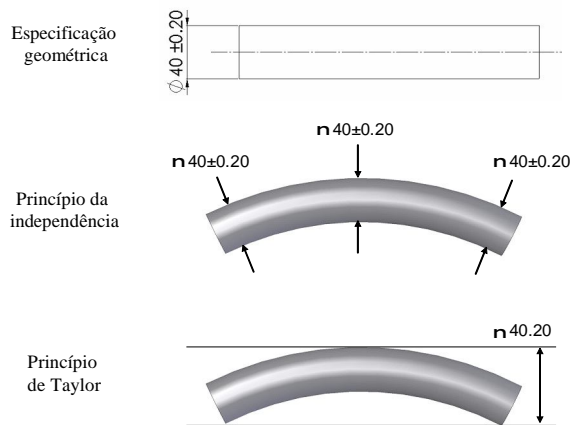


Fig. 4 – Interpretação dos Princípios de independência e de Taylor

Analisando sob o ponto de vista puramente geométrico a dimensão é de fato independente da forma, mas analisando sob o ponto de vista funcional a dimensão está associada com a forma, pois esta é que define a montagem do componente. As principais normas de cotagem geométrica divergem quanto à aplicação destes princípios.

A norma ASME Y14.5-M segue o princípio de Taylor na definição de sua Regra #1 e, com isso, nos desenhos cotados segundo a ASME as tolerâncias dimensionais já controlam os desvios de forma dentro de certos limites.

Já a norma ISO1101 utiliza o princípio da independência como regra fundamental de cotagem, e, assim, nos desenhos cotados segundo a ISO as tolerâncias dimensionais controlam somente as dimensões, sem nenhuma relação com a forma.

Uma vez que o princípio de independência não pode ser aplicado em muitos casos, a norma ISO 8015 abre a possibilidade de adotar opcionalmente o princípio de Taylor, através do recurso de envelope (símbolo  $\epsilon$ ). Assim, a definição que é automática na norma ASME é opcional na norma ISO.

A figura 5 traz três exemplos de cotagem de uma mesma peça: segundo as normas ASME Y14.5-M e ISO 8015 (com requisito de envelope). Não existe diferença entre as normas ASME e ISO quando esta traz o requisito de envelope. Nesse caso ambas obedecem ao princípio de Taylor. Mas se a cotagem da peça for realizada segundo a norma ISO1101 sem o requisito de envelope, isso indica que a dimensão de seção deve ser medida localmente, pois a cotagem só está se referindo ao diâmetro, sem nenhuma relação com a forma.

Uma outra forma que a norma ISO tem para limitar a variação de forma do eixo se dá através da adição das tolerâncias de forma (retitude, circularidade e cilindricidade) no desenho.

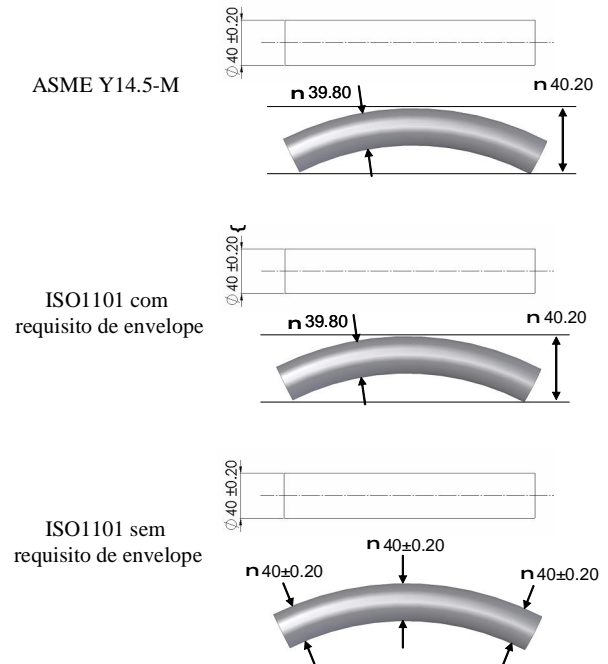


Figura 5 – Requisitos geométricos segundo diferentes princípios de cotagem

A amarração entre dimensão e forma faz sentido na maior parte das aplicações de montagem mecânica, pois a dimensão efetiva de montagem considera a dimensão local com os erros de forma ao longo do elemento geométrico.

No entanto, essa amarração automática trazido pelo princípio de Taylor pode trazer situações restritivas. Por exemplo, quando um eixo tem que atender boa precisão dimensional, mas aceita maior variação de forma o princípio de Taylor acaba restringindo a tolerância de forma pela tolerância dimensional.

Para se adequar a essa situação a norma ASME possui o recurso de adotar opcionalmente o princípio de independência. Quando isso ocorre, deve vir indicado no desenho o termo *Perfect Form Not Required at Maximum Material Condition*.

Com isso as duas normas acabam possibilitando aos projetistas aplicarem os princípios de Independência e de Taylor, mas por caminhos distintos. O princípio de Taylor é automático na norma ASME e opcional na norma ISO1101. O princípio da independência é automático na norma ISO1101 e opcional na norma ASME.

#### 4. IMPLICAÇÕES NO CONTROLE DIMENSIONAL DE PRODUTOS

O procedimento de medição e a interpretação dos resultados são totalmente orientados pela especificação geométrica do produto. Uma interpretação incorreta do desenho ou interpretação errada dos resultados pode provocar um erro na avaliação de conformidade do produto. Desconhecer a norma segundo a qual a peça está cotada, e desconhecer a interpretação desta cotagem pode levar a erros na análise de conformidade em uma medição.

Se o eixo da figura 6 foi cotado de acordo com a norma ASME, o princípio de Taylor é de aplicação automática. Assim o controle da tolerância especificada deve ser realizado segundo o seguinte método:

- A dimensão de máximo material do eixo deve ser verificada com um calibrador tocando toda a geometria do elemento tolerado;
- A dimensão de mínimo material do eixo deve ser verificada com uma medição através de dois contatos.

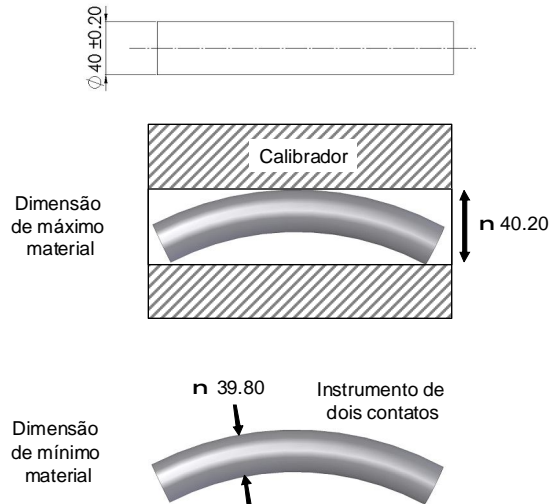


Figura 6 – Controle de eixo cotado segundo norma ASME

No entanto, se o eixo da figura 7 foi cotado de acordo com a norma ISO (sem requisito de envelope), o princípio da independência é automático. Assim o controle da tolerância especificada deve ser realizado segundo o seguinte método:

- As dimensões de máximo e de mínimo material do eixo devem ser verificadas com uma medição através de dois contatos.

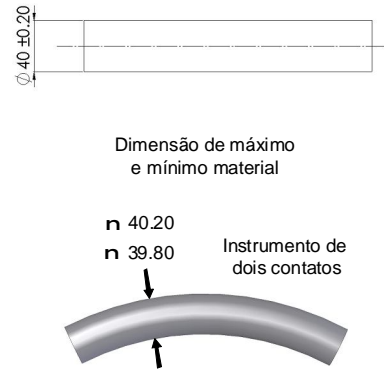


Figura 7 – Controle de eixo cotado segundo normas ISO

Um outro exemplo de divergência nesse aspecto pode ser visto na figura 8. O eixo é cotado segundo a norma ASME e, assim, o seu erro de circularidade já está controlado pela tolerância dimensional. Assim, caso haja uma necessidade de controle de forma mais restritivo, deve ser aplicada uma tolerância de circularidade, que deve ser necessariamente menor do que a tolerância dimensional. O método de medição a ser aplicado deve ser o mesmo descrito na figura 6. Na cotagem segundo o princípio da independência, a tolerância dimensional controla somente o diâmetro da peça.

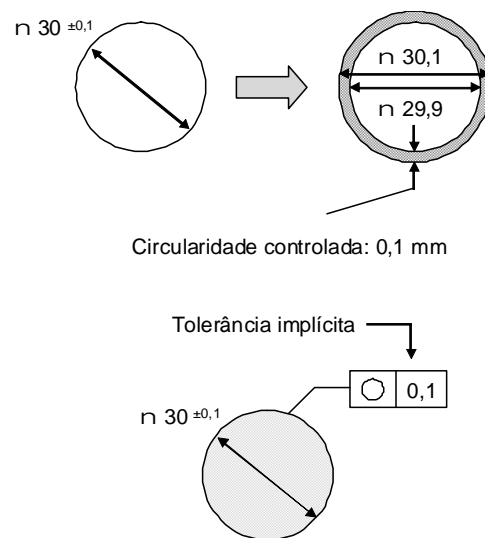


Figura 8 – Erro de forma controlado pela tolerância dimensional (Regra #1 da norma ASME Y14.5-M)

## 5. A NORMALIZAÇÃO BRASILEIRA NBR6409

A NBR6409 [4] é a norma Brasileira que estabelece os princípios gerais de cotagem no que se refere às definições geométricas e indicação das tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento.

A norma foi baseada na norma ISO1101 e, assim, assume-se que obedece ao princípio da independência. No entanto, em seu corpo a norma não indica explicitamente que assume o princípio da independência como regra fundamental. Essa omissão traz erros na aplicação da norma no controle dimensional e de erros de forma.

No Brasil é muito comum a aplicação do princípio de Taylor mesmo em desenhos referenciados à NRB6409, o que indica um erro na interpretação da norma. Assim, há uma prática disseminada em salas de metrologia de empresas brasileiras de considerar que a tolerância dimensional já controla os desvios de forma, potencializando problemas de funcionalidade nos produtos.

Um erro freqüente de cotagem e medição encontrado no Brasil decorre da associação de tolerância de retitude para limitar o erro de forma de um pino, por exemplo (figura 9). Quando a retitude é aplicada no desenho na superfície da peça o controle é feito sobre as geratrizes do pino. Quando a retitude é aplicada sobre a linha de cota do diâmetro do pino, o controle é feito sobre o eixo central do pino. É freqüente a ocorrência de erros nos desenhos pelos projetistas e/ou erros na interpretação dos desenhos pelos metrologistas, podendo ocasionar erros de montagem. Projetista e metrologistas não podem negligenciar estes aspectos das normas sob pena de incorrer em não conformidades dimensionais nos produtos.

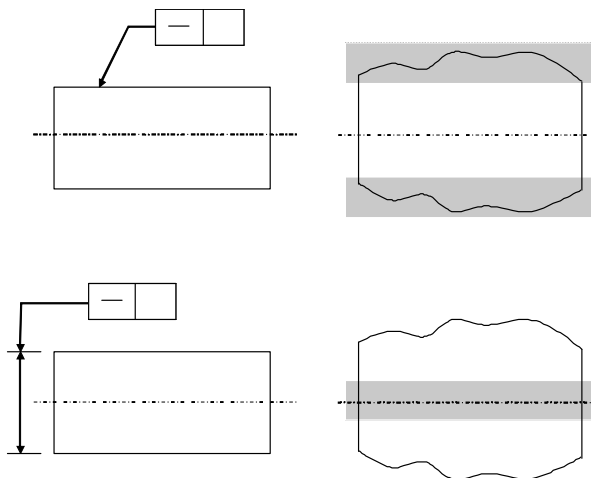
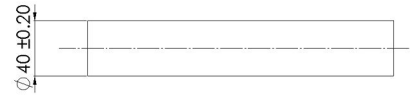


Figura 9 – Diferentes especificações de tolerâncias para limitar erros de forma

Quando o método de medição empregado é a medição por pontos discretos, como na medição por coordenadas, os procedimentos precisam ser muito bem estudados, pois variam consideravelmente conforme a necessidade de

controle. A figura 10 mostra exemplos de procedimentos para o controle do diâmetro de um pino cotado obedecendo ao princípio de Taylor.

Quando a especificação se refere à ASME ou ISO (com requisito de envelope), o controle do diâmetro máximo deve ser feito construindo-se o cilindro circunscrito ao pino medido. O controle do diâmetro mínimo deve ser feito localmente pela distância entre 2 pontos diametralmente opostos.



- Medir o pino com função “Cilindro”
- Verificar se o diâmetro do “Cilindro Mínimo Circunscrito” está abaixo da dimensão de máximo material
- Alinhar o sistema de coordenadas espacial pelo eixo do cilindro medido
- Medir pares de pontos opostos e avaliar se distância entre eles é maior do que a dimensão de mínimo material

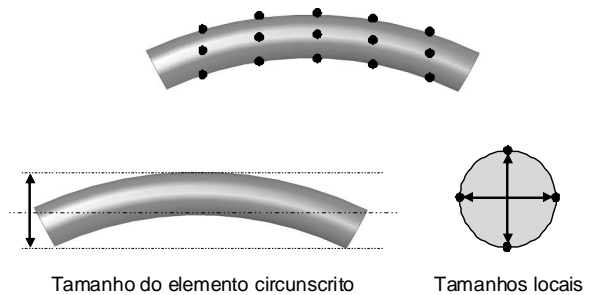


Figura 10 – Procedimento de Medição por Coordenadas para controle de tolerância dimensional

Se a especificação obedece ao princípio de independência, o controle das dimensões máxima e mínima é realizado somente pela distância local entre 2 pontos opostos. Ou, seja:

### Princípio de Taylor:

- Dimensão de Máximo Material controlada pelo tamanho do elemento circunscrito
- Dimensão de mínimo material controlada por tamanhos locais

### Princípio da Independência

- Dimensões de Máximo e Mínimo Material controladas por tamanhos locais

## 6. CONCLUSÕES

A especificação geométrica dos produtos é uma atividade de importância estratégica para o sucesso de um produto. Produtos mal cotados levam consigo problemas funcionais até o fim do seu ciclo de vida, como alto custo de produção, falhas de montagem, segurança e estética.

Para auxiliar os projetistas na correta especificação geométrica dos produtos, as normas ASME Y 14.5-M e a norma ISO1101 são os documentos de referência internacionais mais empregados. Em comum estas normas possuem modernos recursos de cotação e expressão de tolerâncias. No entanto, existem diferenças em aspectos fundamentais que podem trazer erros de interpretação de desenhos que levem a procedimentos de medição equivocados.

Este artigo abordou a diferença entre os princípios de Taylor e da Independência, que fundamentam estas normas de cotação geométrica, realizando uma análise funcional dos dois princípios e de suas implicações na área de metrologia.

Embora as duas normas possuam recursos para aplicar os dois princípios, o fazem por caminhos diferentes. Enquanto na norma ISO1101 o princípio de independência é automático com opção para o princípio de Taylor, na norma ASME Y 14.5-M o princípio de Taylor é automático, com opção para o princípio da independência.

A NBR6409 que é a norma brasileira que estabelece princípios gerais de cotação geométrica, tem como base a norma ISO1101, mas no seu corpo não faz menção ao princípio da independência de forma explícita. Isso potencializa um erro comum encontrado no Brasil em que desenhos cotados segundo a NBR6409 sejam interpretados segundo o princípio de Taylor.

É muito importante que o projetista declare que norma está adotando nos desenhos e que isto seja de conhecimento pleno do metrologista, pois esta diferença entre as normas pode levar a procedimentos de medição totalmente errados.

O artigo apresentou essas diferenças de entendimento e suas implicações no procedimento de medição utilizando meios convencionais e a medição por coordenadas.

## REFERÊNCIAS

- [1] Sousa, A.; Silva, D.; Wandek, M. "O uso do GD&T aliado ao cálculo computacional de tolerâncias permite quantificar a qualidade ainda na fase de projeto". Revista Máquinas e Metais, 2004.
- [2] ASME – American Society for Mechanical Engineers. *Dimensioning and Tolerancing* – ASME Y14.5M - 1994. New York, 1994.

- [3] International Organization for Standardization. ISO 1101: Geometrical Product Specifications (GPS) — Geometrical Tolerancing, 2004.
- [4] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR6409: Tolerâncias Geométricas. Tolerâncias de Forma, Orientação, Posição e Batimento, 1997.