

DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO DE TORQUÍMETROS E A SUA INFLUÊNCIA EM PROCESSOS PRODUTIVOS QUE UTILIZAM TAIS INSTRUMENTOS

José Eduardo Ferreira de Oliveira

Instituto de Tecnologia de Pernambuco – ITEP – Av. Prof. Luiz Freire, 700 – Cidade Universitária – Recife – PE – Brasil. E-mail: jefo@itep.br

Luiz Carlos Cabral de Freitas

Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO – Av. Nossa Senhora das Graças, 50 – Xerém–Duque de Caxias – RJ - Brasil. E-mail: lccabral@inmetro.gov.br

Rafael Soares de Oliveira

Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO – Av. Nossa Senhora das Graças, 50 – Xerém–Duque de Caxias – RJ - Brasil. E-mail: rsoliveira@inmetro.gov.br

Resumo. *O objetivo deste trabalho é apresentar a metodologia para um melhor entendimento da expressão da incerteza de medição na calibração de torquímetros, de acordo com o ISO GUM (ISO GUM, 1998) e na experiência adquirida em anos de trabalho com calibração e utilização desse instrumento, que contribui de forma bastante significativa na detecção das fontes de erros aleatórios e sistemáticos que realmente exercem influência na composição da incerteza de medição. Será ainda apresentada a metodologia para verificação da compatibilidade entre a incerteza de medição e a tolerância de processo, com rebatimento direto na minimização do número de peças defeituosas, gerando como consequência uma diminuição dos custos de fabricação e melhor qualificação do processo, implicando na melhoria da performance da produção.*

Palavras-chave: *incerteza de medição, torquímetro, tolerância, produção.*

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o controle metrológico da grandeza torque tem tido uma atenção especial, em função do impacto que o mesmo apresenta em inúmeros processos industriais, como é o caso dos setores automotivo e de aviação.

Dentro das inúmeras ações de controle metrológico visando a confiabilidade da medição, um ponto de grande relevância é a expressão da incerteza de medição, uma vez que a mesma serve como parâmetro determinístico da eficácia de componentes ou mesmo do produto final.

Um grande problema ainda hoje existente diz respeito a não se seguir um procedimento comum de levantamento desta incerteza, e que esta seja compatível com a aplicação final do instrumento. O que acontece muitas vezes é um sobrecarregamento nos cálculos referentes à expressão dessa incerteza, o que impacta na aplicação, podendo muitas vezes inviabilizar um processo produtivo, quando a mesma é comparada com a tolerância de processo.

Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia para a expressão da incerteza de medição na calibração de torquímetros, destacando as fontes de erros aleatórios que realmente impactam na medição, bem como a influência dessa incerteza no processo produtivo com ênfase na garantia da qualidade.

2. METODOLOGIA PARA A EXPRESSÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO DA CALIBRAÇÃO DE TORQUÍMETROS

Em processos industriais, a garantia da qualidade do produto fabricado é fundamentalmente avaliada por resultados que não são reais, em função de não existir a possibilidade da determinação de um valor de medição exato. Em função disso, faz-se necessário o estabelecimento de um intervalo em torno do resultado de medição que possa abranger, com uma probabilidade específica, os valores que podem ser atribuídos ao mensurando.

A incerteza de medição, parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser fundamentalmente atribuídos a um mensurando (VIM, 2000), é um valor oriundo da combinação de vários componentes, que podem ser estimados baseando-se na distribuição estatística dos resultados de séries de medições, caracterizadas por desvio padrão experimental e através de distribuições de probabilidades assumidas, com base em informações e principalmente, na experiência adquirida.

Especificamente para o caso de torquímetros, a incerteza de medição é obtida através da calibração desse instrumento (ISO 6789, 2003). Para tal, três componentes principais exercem influência sobre a mesma:

- a incerteza associada ao padrão de calibração do torquímetro;
- a incerteza associada à resolução do torquímetro e
- a incerteza referente à dispersão das medições.

Deve-se portanto, obter uma expressão para a incerteza de medição que seja função desses três componentes, conforme equação 1.

$$U = f(i_H, i_r, S(\bar{x})) \quad (1)$$

onde:

U = incerteza expandida de medição;

i_H = incerteza herdada do padrão que calibrou o torquímetro;

i_r = incerteza referente à resolução do torquímetro e

$S(\bar{x})$ = incerteza estatística.

Para a obtenção da incerteza de medição de torquímetros, deve-se seguir os passos de acordo com o fluxograma apresentado na figura 1.

2.1 Determinação da incerteza associada ao padrão de calibração de torquímetros

Esta fonte de incerteza é obtida diretamente do certificado de calibração do padrão. Tal padrão pode ser uma célula de torque, como é o caso dos padrões do ITEP apresentados na figura 2 ou um padrão que utiliza massas (peso-morto), conforme figura 3. A incerteza é matematicamente expressa conforme equação 2.

$$i_H = \frac{i_p}{k_p} \quad (2)$$

onde:

i_H = incerteza expandida do calibrador de torquímetros

i_p = incerteza expandida do certificado de calibração do calibrador de torquímetros e

k_p = fator de abrangência da incerteza i_p .



Figura 1 – passo a passo para expressão da incerteza de medição de torquímetro com confiabilidade de aproximadamente 95%.

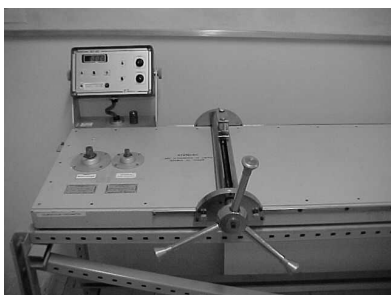


Figura 2 – calibrador de torquímetro com células de torque (100 N.m e 500 N.m)

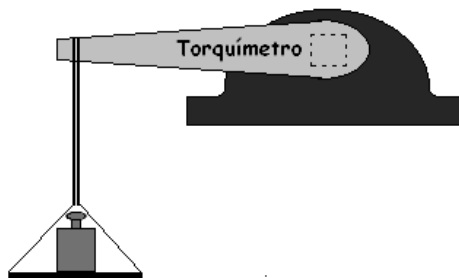


Figura 3 – Desenho de um calibrador de torquímetro com peso morto

2.2 Determinação da incerteza associada à resolução do torquímetro

Na calibração de torquímetro, o valor verdadeiro convencional é colocado no torquímetro (sistema de medição a calibrar) e lido no sistema de medição padrão. No entanto, tomando-se como exemplo um torquímetro tipo I, classe A (ISO 6789, 2003), verifica-se que existe uma incerteza que pode-se dar em função da espessura da marcação da indicação, da espessura e abaulamento do ponteiro, erro de paralaxe ou uma deficiência visual. Constata-se através da figura 4 que a situação é ainda pior em se tratando da escala de kgf.m.

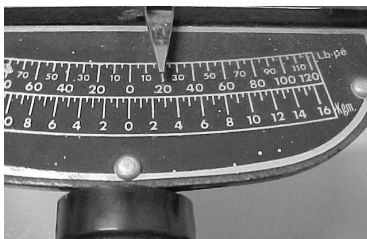


Figura 4 – Aplicação de torque em torquímetro Tipo I, classe A

O limite de variação de posicionamento pode ser dado pela resolução adotada que é a menor diferença entre indicações de um dispositivo mostrador que pode ser significativamente percebida (VIM, 2000). No entanto, para esse tipo de situação é muito pouco provável que as indicações fiquem perto dos limites (resolução adotada “r”), tendendo ao valor verdadeiro convencional. Nesse caso, a melhor distribuição probabilística a ser aplicada é a triangular, conforme figura 5, e a incerteza de medição referente à resolução do instrumento (i_r), com confiabilidade de aproximadamente 68% é descrita conforme equação 3.

$$i_r = \frac{r}{\sqrt{6}} \quad (3)$$

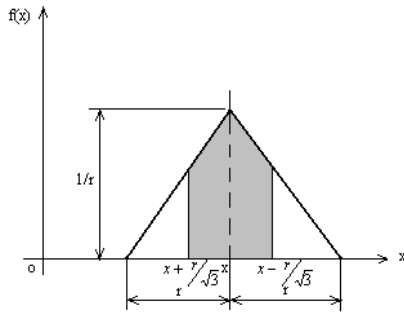


Figura 5 – Gráfico de uma distribuição de probabilidades triangular

2.3 Determinação da incerteza estatística – tipo A

Na calibração de torquímetros, cada observação individual (x_i) em determinado ponto pode diferir em valor, em função de variações aleatórias das grandezas de influência ou efeitos aleatórios. A variância experimental das observações que estima a variância da distribuição de probabilidades de x é apresentada, conforme equação 4 (ISO GUM, 1998).

$$S^2(x_i) = \frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2 \quad (4)$$

onde:

$S^2(x_i)$ = variância da distribuição de probabilidades de x ;

n = número de medições por ponto. Para o caso de torquímetros, $n = 5$ ou 10 .

A variância da média, por sua vez, é apresentada conforme equação 5 e é denominada de variância do tipo A.

$$S^2(\bar{x}) = \frac{S^2(x_i)}{n} \quad (5)$$

Trata-se portanto, de uma grandeza mais fundamental, no entanto, na prática, o desvio padrão é mais utilizado para representar a incerteza estatística, pois é da mesma dimensão de x_i . Logo, especificamente para torquímetros, a equação 6 apresenta a incerteza do tipo A.

$$S(\bar{x}) = \frac{S(x_i)}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

onde:

$S(\bar{x})$ = incerteza estatística – tipo A;

$S(x_i)$ = desvio padrão experimental.

2.4. Determinação dos coeficientes de sensibilidade

A grandeza $u_i(y)$ é a contribuição à incerteza padrão associada à estimativa de saída y , resultante da incerteza padrão associada à estimativa de entrada x_i . Ela é representada pelo produto de c_i e $u(x_i)$. Neste caso particular, como todas as variáveis de influência são independentes, esse coeficiente, conforme apresentado na equação 7 é igual a 1.

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad (7)$$

onde:

c_i = coeficiente de sensibilidade (mostra o quanto a saída f é influenciada pelo fator de entrada x_i);

f = função das variáveis i_H , i_r e $S(\bar{x})$;

x_i = cada uma das fontes de incerteza (i_H , i_r , $S(\bar{x})$);

$u(x_i)$ = i -ésima fonte de incerteza padrão.

2.5. Determinação da incerteza combinada

Uma vez levantadas todas as fontes de incertezas na calibração de torquímetros e atribuídas as respectivas distribuições probabilísticas, parte-se para a determinação de uma única incerteza resultante da combinação das incertezas padrão, ou seja, determina-se a incerteza combinada, conforme equação 8 (ISO GUM, 1998).

$$u_c = \left[\sum c_i^2 u(x_i)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

onde:

$u_c(x)$ = incerteza combinada com confiabilidade de aproximadamente 68%;

U = função descrita de acordo com a equação 1;

Para o caso de torquímetros, como os coeficientes de sensibilidade são iguais a 1, a equação 7 pode ser escrita como apresentado na equação 9.

$$u_c(x) = \sqrt{i_H^2 + i_r^2 + S^2(\bar{x})} \quad (9)$$

2.6. Determinação da incerteza expandida

A incerteza combinada representa um intervalo no qual o valor mais provável de uma determinada medição pode variar, com confiabilidade de aproximadamente 68%. No entanto, na grande maioria das aplicações, como no caso de torquímetros, faz-se necessário expressar essa incerteza com uma confiabilidade maior, que normalmente é de aproximadamente 95%. Em função disto, a incerteza expandida é obtida da incerteza combinada, como mostrado na equação 10, multiplicada por um fator de abrangência, fornecendo um nível de confiança de aproximadamente 95%.

$$U = k \cdot u_c(x) \quad (10)$$

onde:

U = incerteza expandida e

k = fator de abrangência.

2.7. Determinação do fator de abrangência (k)

O fator de abrangência é um coeficiente que é determinado em função da confiabilidade requerida para o intervalo no qual um valor pode variar. No entanto, na grande maioria dos casos, k encontra-se variando entre 2 e 3. A tabela 1 apresenta os níveis de confiança para diferentes valores de k.

Tabela 1. Percentual do nível de confiança para diferentes valores de k, considerando-se a distribuição-t, própria para o espaço amostral utilizado

k	Nível de confiança (%)
1	68,27
2	95,45
3	99,73

Para a obtenção do coeficiente k, faz-se necessária a determinação do número de graus de liberdade efetivos, numa distribuição-t, obtido pela equação de Welch-Satterwaite (ISO GUM, 1998).

2.8. Determinação do número de graus de liberdade efetivos

A equação 11 apresenta a fórmula geral para determinação dos graus de liberdade efetivos.

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(x)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(x)}{v_i}} \quad (11)$$

onde:

v_{eff} = número de graus de liberdade efetivos;

$u_i(x)$ = incerteza padrão associada à i-ésima fonte de incerteza;

$v_i(x)$ = número de graus de liberdade associado à i-ésima fonte de incerteza e

N = número total de fontes de incerteza analisadas.

Especificamente para a calibração de torquímetros, a tabela 2 apresenta o número de graus de liberdade associado a cada fonte de incerteza. Aplicando-se os dados dessa tabela na equação 11, obtém-se, conforme equação 12, o número de graus de liberdade efetivos, aplicado a torquímetros.

Tabela 2: Número de graus de liberdade para cada fonte de incerteza

Fonte de incerteza u_i	v_i
i_H	∞
i_r	∞
$S(\bar{x})$	n-1

$$v_{eff} = (n-1) \cdot \frac{u_c^4(x)}{S^4(\bar{x})} \quad (12)$$

De posse do valor de v_{eff} , obtém-se o valor de k é obtido da tabela da distribuição-t, conforme tabela 3, ou em se tratando da utilização de planilhas utilizando-se o programa Excel[®], pode-se valer da expressão INVT (0,0455; v_{eff}).

Tabela 3: Valores possíveis do fator de abrangência k em função do número de graus de liberdade efetivos

v_{eff}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	∞
k	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,13	2,05	2,00

3. ESTUDO PARA A ESCOLHA DE UM TORQUÍMETRO EM FUNÇÃO DA COMPARAÇÃO ENTRE INCERTEZA DE MEDIÇÃO E TOLERÂNCIA DO PROCESSO

O critério clássico de decisão sobre a aptidão ou não de um determinado instrumento de medição a um processo é comparar a sua incerteza de medição com a tolerância de processo, desde que minimizados os erros sistemáticos que o instrumento apresente, através de ajustes, aplicação direta de correções ou através das curvas de correção obtidas por regressão linear ou polinomial.

A referida comparação, ainda hoje bastante utilizada, diz que, na condição ideal (instrumento de medição apto ao processo), a incerteza de medição é dez vezes menor que a tolerância de processo, podendo chegar a apenas três vezes menor.

Atualmente, a maneira moderna de se comparar a incerteza de medição à tolerância de processo é apresentada na norma ISO 14253-1 (ISO 14253-1, 1998), como pode ser visualizada na figura 6, que mesmo tratando de especificações em produtos geométricos, aplica-se muito bem ao trabalho com torquímetros.

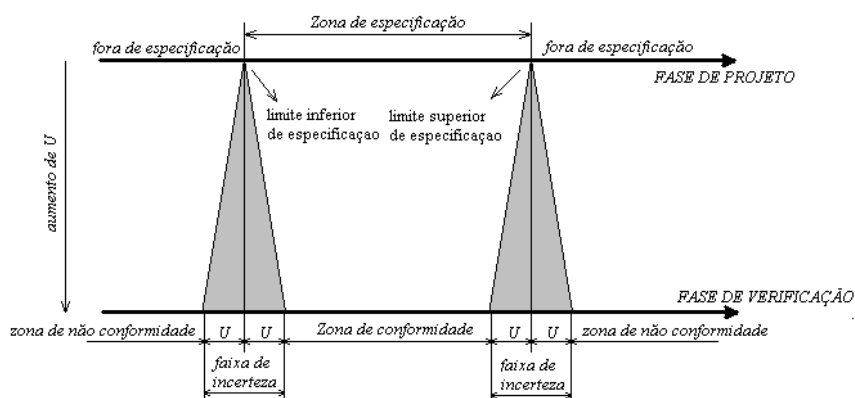


Figura 6 – Modelo moderno de comparação entre incerteza de medição e tolerância de processo.

Através da correta implementação desse modelo, constata-se um sensível ganho na fabricação do produto de acordo com a especificação, o que impacta no comércio e nas disputas (Nielsen, 1999). Analisando-se a figura 6, percebe-se que a zona de conformidade é dada pela tolerância de processo menos duas vezes a incerteza de medição, o que implica numa possibilidade muito remota de aceitação de um produto defeituoso, bem como da rejeição de um produto bom. No exemplo a seguir, será apresentado um estudo de caso para torquímetros, comparando-se os métodos de decisão em um processo produtivo real.

4. ESTUDO DE CASO DO IMPACTO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO DE TORQUÍMETROS EM PROCESSOS PRODUTIVOS

Tomando-se como exemplo a indústria automotiva, especificamente o item bomba de óleo da caixa de marcha de um veículo pesado. Para a fixação de cada parafuso da tampa da referida bomba utiliza-se um torque de $20,0 \pm 3$ N.m, o que significa dizer que referente a esse item, a caixa de marcha é fabricada e montada dentro dos padrões de qualidade, se o parafuso for fixado com torque variando entre 17 e 23 N.m. Logo, tem-se uma tolerância no processo de 6 N.m.

Neste caso, um torque excessivo poderá provocar a quebra instantânea ou em serviço do referido parafuso. Neste último caso, será gerado um vazamento de óleo, o que fatalmente acarretará um dano por completo na caixa de marcha, uma vez que a falta de óleo danificará principalmente os rolamentos e anéis sincronizadores. Por outro lado, um torque inferior ao limite mínimo de especificação também provocará vazamento de óleo na caixa de marcha. E um agravante é que em se tratando especificamente de caixa de marcha, o vazamento é interno, e portanto, imperceptível a olho nu, o que implicaria na colocação de peças defeituosas no mercado.

Supondo-se que na linha de produção, tais parafusos são torquoados utilizando-se um torquímetro tipo II, classe A (ISO 6789:2003, Anexo B), ou seja, um torquímetro de estalo com escala ajustável. A tabela 4 apresenta os valores obtidos da calibração do referido torquímetro, onde SMC representa o sistema de medição a calibrar (torquímetro) e SMP é o sistema de medição padrão (calibrador).

Tabela 4: Valores de calibração de torquímetro de estalo, no sentido horário

INDICAÇÕES DO SMC V.V.C		INDICAÇÕES DO SMP (N.m)					MÉDIA (N.m)	ERROS RELATIVOS (%)		± U (N.m)	K
(lbf.in)	(N.m)	SÉRIE 1	SÉRIE 2	SÉRIE 3	SÉRIE 4	SÉRIE 5		INDICAÇÃO	REPETITIVIDADE		
120,0	13,6	13,8	13,9	13,8	13,8	13,8	13,8	1,62	0,72	1,09	2,00
240,0	27,1	27,9	27,8	27,9	27,8	27,9	27,9	2,80	0,36	0,92	2,00
360,0	40,7	41,9	41,9	41,8	41,9	41,9	41,9	2,90	0,24	0,94	2,00
480,0	54,2	56,2	56,1	56,1	56,1	56,1	56,1	3,54	0,18	0,93	2,00
600,0	67,8	69,6	69,6	69,7	69,6	69,7	69,6	2,71	0,14	0,93	2,00

Analisando-se a tabela 4, verifica-se que o torque nominal a ser aplicado (20 N.m) encontra-se entre os pontos calibrados 13,6 e 27,1 N.m. Neste caso, a incerteza expandida U encontra-se entre 1,09 e 0,92 N.m. Visando-se trabalhar a favor da segurança será considerado neste estudo, U igual a 1,09 N.m.

Utilizando-se o critério clássico, a máxima incerteza que o torquímetro poderia apresentar, na situação limite, era dada conforme apresentado pela equação 12.

$$U_{\max} = \frac{1}{3} \cdot 6 = 2 \text{ N.m} \quad (12)$$

Como $U = 1,09 \text{ N.m}$, por esse critério, o instrumento encontra-se apto ao referido serviço, considerando-se a tolerância de 6 N.m. No entanto, pelo método apresentado pela norma ISO 14253-1, a zona de conformidade, ou seja, a faixa de variação de torque permitida no parafuso é dada pela tolerância, menos duas vezes a incerteza de medição expandida, sendo igual a 3,82 N.m. A figura 7 apresenta a zona de conformidade, comparada com a zona de especificação que é uma faixa definida em projeto.

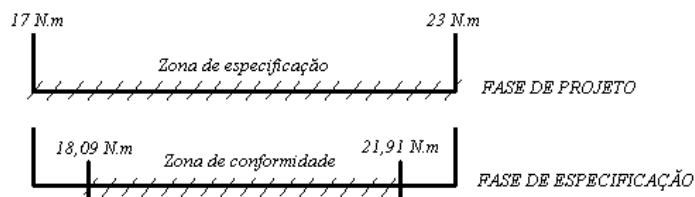


Figura 7 – Comparação entre zona de especificação e zona de conformidade

Neste caso, ao contrário do método clássico, a faixa de utilização do torquímetro passou a ser de 18,09 N.m a 21,91 N.m. Em se tratando do torquímetro em questão, o estalo varia em função da rapidez da aplicação do torque, da fixação do torque (alinhamento dos traços de indicação) ou do próprio mecanismo interno. Logo, tal análise passa a ter uma importância fundamental. Por outro lado, se por exemplo, a incerteza expandida fosse de 3 N.m, o torquímetro nem poderia ser utilizado à referida aplicação, pois a zona de conformidade não mais existiria, devido ao tamanho da faixa de incerteza. Ainda no setor automotivo, tal análise pode ser aplicada a inúmeras partes como é o caso da fixação do parafuso do cinto de segurança que tem provocado uma série de *recalls*.

5. CONCLUSÃO

Através deste trabalho constatou-se, por meio de uma aplicação, um critério de aceitação ou rejeição de um torquímetro com relação a um processo específico, em função da incerteza de medição, visando a fabricação de peças com qualidade adequada, impossibilitando a colocação no mercado de peças defeituosas, bem como a rejeição de peças boas. Percebeu-se que o método clássico não atende completamente ao proposto, uma vez que não leva em consideração a zona de conformidade, havendo uma maior probabilidade de peças defeituosas serem fabricadas, principalmente nas proximidades dos limites de tolerância. Mostrou-se ainda as fontes de incerteza que influenciam no valor de torquímetros e a forma como calcular tal incerteza com 95% de confiabilidade. Fica claro neste caso, a importância da calibração de torquímetros em processos industriais que necessitam desses instrumentos, uma vez que através dessa calibração obtém-se não apenas os erros de indicação do instrumento, mas também os erros aleatórios (incerteza de medição). É importante salientar a necessidade da realização das calibrações em laboratórios idôneos que atendam aos requisitos técnicos e de qualidade necessários (ISO 17025, 2001), e a utilização dos certificados de calibração em tais sistemas produtivos, visando a minimização de tais erros, o que conseqüentemente impacta na lucratividade da empresa.

6. AGRADECIMENTOS

Ao Engenheiro mecânico, professor da Escola Politécnica de Pernambuco, Nylo Gomes Ferreira por toda ajuda e apoio na fase de descrição da aplicação, o que contribuiu significativamente para a finalização deste trabalho.

7. REFERÊNCIAS

ABNT, INMETRO, SBM, 1998, “Guia para a expressão da incerteza de medição – ISO GUM”, Segunda edição brasileira do guide to the expression of uncertainty in measurement, Rio de Janeiro, Brasil.

INMETRO, 2000, “Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia – VIM”, 2ª Edição, Rio de Janeiro, Brasil.

ISO 6789, 2003, “Assembly tools for screws and nuts – hand torque tools – requirements and test methods for design conformance testing, quality conformance testing and recalibration procedure”.

ISO 14253-1, 1998, “Geometrical Product Specifications (GPS) – Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment – part1: Decision rules for proving conformance or non-conformance with specifications”.

Nielsen, H. S., 1999, “ISO 14253-1 Decision rules – good or bad?”, National Conference of Standards Laboratories – Workshop & symposium.

NBR ISO/IEC 17025, 2001, “Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração”.

DETERMINATION OF HAND TORQUE TOOLS UNCERTAINTY IN MEASUREMENT AND UNCERTAINTY INFLUENCE IN PRODUCTION PROCESSES THAT USE THIS INSTRUMENTS

Abstract. The objective of this work is to present the methodology for correct expression of the uncertainty in measurement in hand torque tools calibration, in accordance to ISO GUM [1] and in the experience acquired in years of work with calibration and using this instrument. The experience contributes of sufficiently significant form in the detention of the sources of random errors that really exert influence in the composition of the uncertainty in measurement. Still the methodology will be presented to verify the compatibility of the uncertainty in measurement with the process tolerance with implication in the production performance.

Keywords. Uncertainty in measurement, hand torque tools, tolerance, production.