



Influência da correlação no número de graus de liberdade efetivos para a determinação da incerteza de medição no ensaio de tração

Influence of the correlation in the number of effective degrees of freedom for determination of the uncertainty in measurement in tensile testing



Artigo

Submetido em 14.09.16 | Aceito em 16.03.17 | Disponível on-line em 25.04.18

José Eduardo Ferreira Oliveira *

Instituto Federal de Pernambuco ó campus Recife | *joseferreira@recife.ifpe.edu.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho é apresentar dois estudos de caso de cálculo da incerteza expandida de medição da tensão de resistência mecânica obtida através do ensaio de tração, onde a incerteza combinada considerando-se a correlação entre duas grandezas (força e diâmetro do corpo de prova) gera como consequência, valores do número de graus de liberdade efetivos, menores que 1, impossibilitando assim, a determinação do fator de abrangência, e consequentemente, a obtenção da incerteza expandida através da distribuição t-Student. A partir desta situação, possível de ocorrer durante o cálculo da incerteza expandida de medição, serão apresentadas as soluções adotadas para suprir essa limitação da utilização do método analítico para este cálculo. Será ainda apresentada neste trabalho, a influência do número de corpos de prova ensaiados, bem como dos coeficientes de sensibilidade de cada fonte de incerteza, na qualidade do resultado final do ensaio, o qual é composto pela média dos valores individuais, mais ou menos a incerteza expandida de medição.

Palavras-chaves: *Correlação, incerteza expandida, resistência mecânica, graus de liberdade.*

ABSTRACT

The aim of this work is to present two studies about calculation of expanded uncertainty in measurement of the mechanical strength tensile, obtained by tensile tests where the combined uncertainty due to the strength and the test specimens diameter generate values of the number of effective degrees of freedom less than 1. This makes it impossible to determine the coverage factor and consequently to obtain the expanded uncertainty in measurement by t-Student distribution. In this paper will be presented that solutions could be taken to solve this problem and the influence of the number of tests and sensitivity coefficients in the quality of results.

Keywords: *Correlation, expanded uncertainty, mechanical strength, degrees of freedom*

1.Introdução

A incerteza de medição é um valor que se origina da combinação de vários componentes que podem ser estimados com base na distribuição estatística dos resultados de séries de medições, caracterizadas pelo desvio padrão experimental (incerteza tipo A) e através de distribuições de probabilidades consideradas, com base em informações e na experiência adquirida (incerteza tipo B). Logo, o número de fontes de incerteza de

medição dependerá do conhecimento e da experiência adquirida no processo de medição. A metodologia para a expressão da incerteza de medição padronizada pelo ISO GUM (2012) é apresentada de acordo com a seguinte sequência (OLIVEIRA, 2009):

- ✓ Levantamento das fontes de incerteza de medição;

- ✓ Atribuição da distribuição probabilística para cada fonte de incerteza de medição;
- ✓ Determinação dos coeficientes de sensibilidade;
- ✓ Determinação da incerteza padronizada combinada;
- ✓ Determinação do número de graus de liberdade efetivos;
- ✓ Determinação do fator de abrangência e
- ✓ Determinação da incerteza expandida de medição.

As incertezas tipo A poderão apresentar correlação, a qual deverá ser verificada duas a duas, e, caso essa condição exista, tal efeito deverá ser considerado no cálculo da incerteza combinada.

Dentro deste contexto, serão apresentados dois estudos de caso de cálculo da incerteza expandida de medição da tensão de resistência mecânica obtida através do ensaio de tração, onde a incerteza combinada considerando-se a correlação entre duas grandezas (força e diâmetro do corpo de prova) gera como consequência, valores do número de graus de liberdade efetivos, menores que 1, impossibilitando assim, a determinação do fator de abrangência, e consequentemente, a obtenção da incerteza expandida através da distribuição t-Student. Será apresentado ainda, que soluções poderão ser tomadas para solucionar tal problema, além de um estudo comparativo entre a incerteza combinada obtida considerando-se a correlação e sem o uso da mesma.

2. Revisão Bibliográfica

Todas as medições só são finalizadas se forem acompanhadas por uma declaração da incerteza, as quais dependem dos valores medidos e das suas incertezas componentes. Por outro lado, o desempenho da medição afeta a distribuição dos valores medidos. O valor verdadeiro estimado, obtido a partir do seu valor médio é altamente

confiável em comparação com um único valor medido (SHAMSURI et al., 2016).

De acordo com SILVA (2004), para que se possa realizar o cálculo da incerteza de medição em ensaios, deve-se realizar o seguinte passo a passo:

- ✓ Listar todos os valores que possam influenciar os valores medidos;
- ✓ Fazer uma estimativa preliminar dos valores dos componentes de incerteza, excluindo os insignificantes;
- ✓ Estimar os valores que são atribuíveis a cada componente significativo de incerteza, e expressá-los sob a forma de um desvio padrão;
- ✓ Considerar os componentes e decidir quais são dependentes e se há um componente dominante, levando em consideração os coeficientes de sensibilidade;
- ✓ Adicionar os componentes dependentes que são as grandezas correlacionadas;
- ✓ Adicionar as variâncias dos componentes independentes e retirar a raiz quadrada da soma do quadrado de cada componente, gerando assim, a incerteza combinada;
- ✓ Multiplicar o valor do item anterior por um fator de abrangência k , determinado em função do nível de confiança solicitado e
- ✓ Expressar o resultado final.

2.1. Determinação da incerteza de medição pelo método analítico

A incerteza padronizada combinada considerando-se o efeito da correlação entre fontes de incerteza, combinadas duas a duas é determinada através da Eq.(1) (ISO GUM, 2012).

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial y_i}\right)^2 \times u^2(y_i) + 2 \times \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \frac{\partial f}{\partial y_k} \times \frac{\partial f}{\partial y_j} \times u(y_k) \times u(y_j) \times r(y_k, y_j)}$$

Onde:

- $u_c(y)$ = incerteza padronizada combinada;
- $u(y_i)$ = i-ésima fonte de incerteza padrão;
- $u(y_k)$ = incerteza tipo A das observações y_k ;
- $u(y_j)$ = desvio padrão das observações y_j ;
- n = número de fontes de incerteza padrão e
- $r(y_i, y_j)$ = coeficiente de correlação entre grandezas de entrada y_i e y_j , dado pela Eq. (2)

$$r(y_k, y_j) = \frac{u(y_k, y_j)}{u(y_k) \times u(y_j)} \quad (2)$$

A fração $\partial f / \partial y_i$ mostra o quanto a saída f , que representa uma dada função a ser estudada, é influenciada pelo fator de entrada y_i . A esta fração dá-se o nome de coeficiente de sensibilidade. A fonte de incerteza padrão requer a determinação de tais coeficientes de sensibilidade, os quais são geralmente estimados por meio de derivadas parciais das relações funcionais entre a quantidade de saída (mensurando) e quantidades de entrada (GABAUER, 2000).

Quando o tamanho da amostra é pequeno ($n < 30$), a distribuição da média é melhor aproximada pela distribuição t de Student (STANISLAW et al., 2012). Para se determinar a incerteza expandida com aproximadamente 95% de confiabilidade, deve-se inicialmente calcular o número de graus de liberdade efetivos ν_{eff} , o qual é obtido por meio da Eq.(3) de Welch-Satterthwaite. O valor do número de graus de liberdade associado a cada fonte de incerteza dependerá do tipo de incerteza, ou seja, se ela é do tipo A ou do tipo B. O valor de ν_{eff} é utilizado para a determinação do fator de abrangência k .

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} \quad (3)$$

Onde:

- $u_i(y)$ = i-ésima fonte de incerteza padrão, multiplicada pelo seu respectivo coeficiente de sensibilidade e
- i = graus de liberdade referentes à i-ésima fonte de incerteza padrão.

O fator de abrangência k , por sua vez, é um fator numérico utilizado como multiplicador da incerteza padronizada combinada para obter uma incerteza expandida (UNE-EM ISO 14253-1, 1998). Esse fator é determinado de acordo com a confiabilidade requerida. Na grande maioria dos casos, ele situa-se entre 2 e 3, em função do número de graus efetivos de liberdade (ISO GUM, 2012). Por exemplo, considerando-se um valor de ν_{eff} igual a 3, para um nível de confiança de 95,45%, o valor de k vale 3,31. Por outro lado, considerando um valor de ν_{eff} igual a 100, o valor de k será de 2,025 para a distribuição t-Student. Como em medições dimensionais o espaço amostral é pequeno, ou seja, são realizadas poucas medições para uma mesma dimensão, a curva que melhor descreve tal situação não é uma distribuição normal, mas sim uma distribuição t-Student.

Por sua vez, a incerteza expandida de medição U com 95,45% de confiabilidade é obtida, multiplicando-se a incerteza padronizada combinada pelo fator de abrangência, conforme Eq.(4).

$$U = k \times u_c \quad (4)$$

2.2. Determinação da incerteza de medição por Simulação de Monte Carlo

Ao se utilizar um modelo matemático para descrever um sistema, pode ocorrer de não se conseguir uma solução analítica para o mesmo. Para tais situações, a simulação computacional poderá representar uma saída para a obtenção da solução pretendida e, para o caso específico da

determinação da incerteza de medição, a Simulação de Monte Carlo vem se mostrando como uma alternativa para suprir as limitações do ISO GUM (2012). Ela não leva em consideração a Eq. (3) para a determinação do número de graus de liberdade efetivos. No modelo analítico, as variáveis de entrada são caracterizadas pelas suas respectivas funções densidade de probabilidade, enquanto que no método de Monte Carlo, o formato da distribuição de saída é gerado a partir do modelo matemático, combinando-se amostras aleatórias das variáveis de entrada.

De acordo com COUTO (2008), a Simulação de Monte Carlo aplicada ao cálculo da incerteza de medição não apresenta as seguintes limitações em comparação ao método analítico apresentado pelo ISO GUM (2012):

- ✓ Linearização do modelo matemático;
- ✓ Suposição de distribuição normal do mensurando e
- ✓ Determinação dos graus de liberdade da incerteza combinada.

Esta metodologia é um procedimento numérico que utiliza a geração de números aleatórios para simular os valores das fontes de incerteza, combinando as distribuições, ao invés de propagar erros estatisticamente. Estas simulações podem ser facilmente utilizadas devido ao crescimento da popularidade dos computadores pessoais de alta velocidade (COUTO et al., 2006).

A Análise de Monte Carlo é, portanto, uma ferramenta que combina distribuições, o que vai além do apenas propagar incertezas estatísticas.

3. Materiais e Métodos

A máquina universal para ensaios de tração EMIC possui as seguintes características:

- ✓ Faixa nominal = 0 - 10000kgf (0 a 100kN);
- ✓ Menor divisão = 1kgf;

- ✓ Indicador digital;
- ✓ Incerteza expandida de medição = 3,5N para um fator de abrangência k_t de 2,0.

O paquímetro utilizado para a medição dos diâmetros do comprimento paralelo de cada um dos corpos de prova possui as seguintes características:

- ✓ Faixa nominal = 0 - 150mm;
- ✓ Menor divisão = 0,05mm;
- ✓ Incerteza expandida de medição = 0,03mm para um fator de abrangência k_d de 2,1.

A tensão limite de resistência mecânica, em MPa, é obtida, de acordo com a seguinte equação:

$$\sigma = \frac{4 \times F}{\pi \times d^2} \quad (5)$$

Onde:

F = força axial em N e

d = diâmetro do comprimento paralelo em mm.

Este estudo considerou dois tipos distintos de aço, aqui descritos como material 1 (aço ABNT 1045) e o material 2 (aço ABNT 1050), realizando o ensaio para cinco corpos de prova, conforme apresentado nas Tabelas 1 e 2. O motivo de se utilizar mais de um tipo de material foi para se gerar outro patamar de valor de tensão limite de resistência mecânica, e, conseqüentemente, se poder verificar se para tal situação poderá ocorrer de se ter valores para o número de graus de liberdade efetivos inferiores a 1. Além disto, foram tomadas cinco amostras de cada material, respeitando-se o tamanho mínimo de 3 para a determinação do desvio padrão. A figura 1 apresenta um exemplo de um corpo de prova utilizado no ensaio de tração.

Figura 1. Exemplo de um corpo de prova utilizado no ensaio

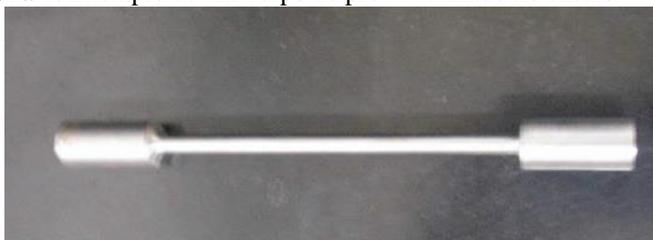


Tabela 1. Valores da medição da força máxima, juntamente com o seu respectivo diâmetro do comprimento paralelo para cada corpo de prova para o material 1 (aço ABNT 1045).

Força (N)	Diâmetro (mm)
17546	5,95
17892	5,95
18105	6,00
18574	6,05
19040	6,10

Tabela 2. Valores da medição da força máxima, juntamente com o seu respectivo diâmetro do comprimento paralelo para cada corpo de prova para o material 2 (aço ABNT 1050).

Força (N)	Diâmetro (mm)
20727	5,80
20914	5,80
20986	5,90
22004	6,10
22186	6,20

Para o cálculo da incerteza de medição foram consideradas as seguintes fontes de incerteza:

- ✓ Incerteza estatística da força aplicada (i_a) (Tipo A);
- ✓ Incerteza herdada da máquina de tração (i_{ht}) (Tipo B com distribuição t-Student);
- ✓ Incerteza devida à resolução da máquina de tração (i_{rt}) (Tipo B com distribuição retangular);
- ✓ Incerteza estatística devida à medição dos diâmetros (i_d) (Tipo A) e

- ✓ Incerteza herdada do paquímetro (i_{hp}) (Tipo B com distribuição t-Student).

Das cinco fontes de incerteza de medição, deverá ser verificada a possibilidade de correlação entre i_a e i_d . O passo a passo para a determinação da incerteza de medição pelo método analítico poderá ser verificado no trabalho de OLIVEIRA (2014). A seguir, serão apresentados os resultados para cada material ensaiado, obtidos pelo método analítico e por Simulação de Monte Carlo.

4. Resultados e Discussão

Os resultados gerados através da Simulação de Monte Carlo foram obtidos através do software *GUM Workbench* e para os dados referentes ao método analítico, foi confeccionada uma planilha do *Microsoft Excel* específica para este estudo. Todas as fontes de incerteza de medição do tipo B possuem infinitos graus de liberdade, enquanto que as do tipo A possuem ão menos um graus de liberdade, sendo ão o número de medições realizadas.

4.1. Dados de incerteza referentes ao material 1 (aço ABNT 1045)

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos considerando-se o efeito da correlação pelo método analítico. É importante salientar que todas as fontes de incerteza padrão apresentadas nesta tabela estão todas em MPa, uma vez que cada fonte já está multiplicada pelo seu respectivo coeficiente de sensibilidade.

Analisando-se a Tabela 3, inicialmente constata-se que há uma forte correlação direta entre a força aplicada e o diâmetro do corpo de prova, igual a 0,977. Outra constatação que chama atenção é que a fonte de incerteza padrão mais

expressiva é ia que vale 9,233MPa, no entanto, a incerteza combinada de 4,580MPa é praticamente a metade desta fonte individual. Isto se dá em função da derivada da tensão em função do diâmetro do corpo de prova $\partial\sigma/\partial d$ que é igual a $-213,86 \text{ N/mm}^3$, fazendo com que o segundo termo da Eq. (1) fique negativo, diminuindo, portanto, o valor da incerteza combinada.

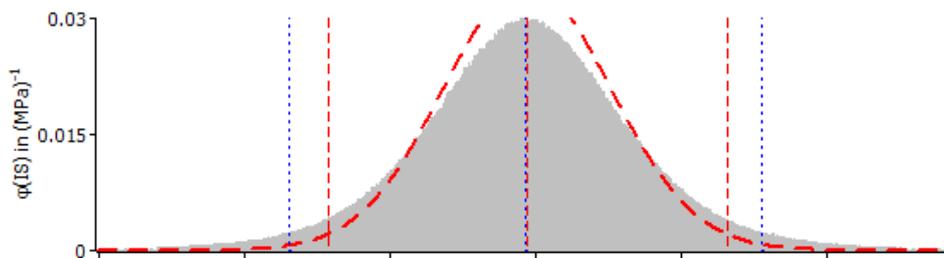
O fator limitante da aplicação do método analítico para o cálculo da incerteza expandida de medição, diz respeito ao valor do número de graus de liberdade efetivos que vale 0,200. Isto impossibilita a determinação do fator de abrangência, que só pode ser obtido com o valor mínimo de k_{eff} igual a 1, o que gera um valor de k igual a 13,97. Como não se tem um valor de k , conseqüentemente não se obtém o valor da incerteza expandida.

Uma solução viável é a utilização da Simulação de Monte Carlo, na qual para esta situação, foram pré-estabelecidos os seguintes parâmetros: 3000000 de iterações e número de colunas 400. O intervalo obtido foi portanto (+33, -32) MPa. A figura 2 apresenta o gráfico da distribuição. A incerteza obtida por este método foi 7,2 vezes maior que a incerteza combinada, obtida pelo método analítico.

Tabela 3. Variáveis envolvidas no cálculo da incerteza de medição pelo método analítico para o aço ABNT 1045.

Incerteza estatística da força aplicada (i_a)	9,233MPa
Incerteza herdada da máquina de tração (i_m)	0,062 MPa
Incerteza devida à resolução da máquina de tração (i_r)	0,010 MPa
Incerteza estatística devida à medição dos diâmetros (i_d)	6,235 MPa
Incerteza herdada do paquímetro (i_{hp})	3,055 MPa
Coeficiente de correlação (r)	0,977
Incerteza combinada (u_c)	4,580 MPa
Graus efetivos de liberdade (eff)	0,200
Fator de abrangência (k)	-
Incerteza expandida (U)	-

Figura 2. Distribuição resultante obtida por Simulação de Monte Carlo.



4.2. Dados de incerteza referentes ao material 2 (aço ABNT 1050)

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos considerando-se o efeito da correlação pelo método analítico.

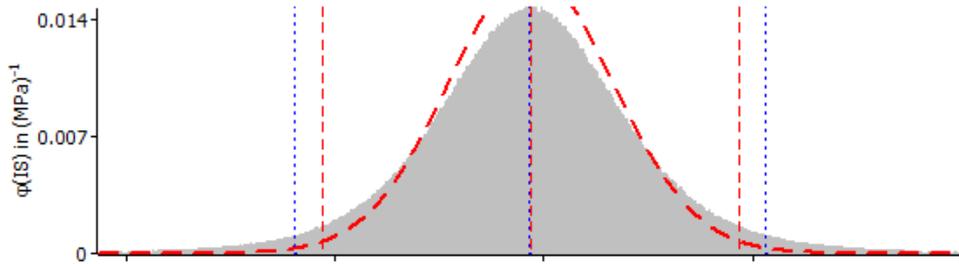
Inicialmente, um aspecto curioso é que a incerteza referente à medição dos diâmetros foi praticamente o dobro da incerteza da força aplicada. Outra questão é que a incerteza herdada da máquina de tração e a incerteza devida a resolução da máquina de tração representam uma contribuição marginal na incerteza final. Comparando-se i_{rt} dos dois aços, constata-se uma diferença entre os dois valores, mesmo se tendo a mesma

máquina de tração. Isto se dá em função dos coeficientes de sensibilidade para as duas situações, o qual depende é função do quadrado do diâmetro médio de cada uma das cinco medições.

Também para este ensaio, como o valor de e_{ff} foi igual a 0,292, ou seja, menor que 1, não foi possível a determinação do fator de abrangência e, consequentemente, da incerteza expandida de medição. A solução também foi a utilização do Método de Monte Carlo, onde foram realizadas 3000000 iterações e o número de colunas também foi 400. O valor obtido foi +68MPa. A figura 3 apresenta a distribuição resultante.

Tabela 4. Variáveis envolvidas no cálculo da incerteza de medição pelo método analítico para o aço ABNT 1050 para cinco ensaios.

Incerteza estatística da força aplicada (i_a)	10,862MPa
Incerteza herdada da máquina de tração (i_{hr})	0,063MPa
Incerteza devida à resolução da máquina de tração (i_{rr})	0,102MPa
Incerteza estatística devida à medição dos diâmetros (i_d)	20,876MPa
Incerteza herdada do paquímetro (i_{hp})	3,671MPa
Coefficiente de correlação (r)	0.982
Incerteza combinada (u_c)	11,043MPa
Graus efetivos de liberdade (e_{ff})	0,292
Fator de abrangência (k)	-
Incerteza expandida (U)	-

Figura 3. Distribuição resultante obtida por Simulação de Monte Carlo.

Um aspecto que chama atenção para a necessidade de uma análise aprofundada a respeito da incerteza de medição é que o número de graus efetivos de liberdade pode variar em função do número de medições. Se forem utilizados apenas os três primeiros valores da tabela 2 para o aço ABNT 1050, os valores obtidos através do método analítico estão apresentados na tabela 5.

Neste caso, verifica-se que a incerteza expandida considerando-se as grandezas correlacionadas foi quase o dobro da incerteza obtida por Simulação de Monte Carlo. Isto se deu

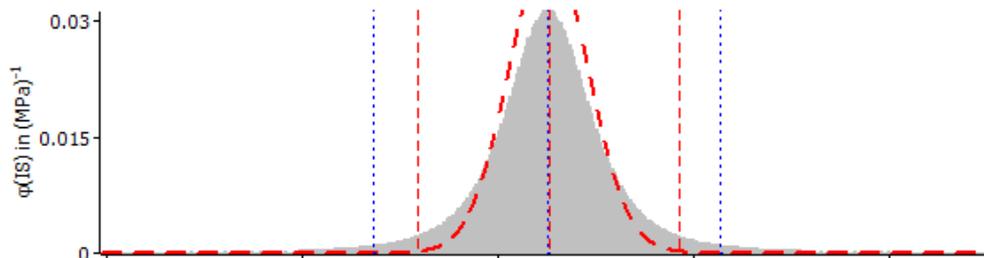
em função do número de graus de liberdade efetivos que foi igual a 1,350, fazendo com que o fator de abrangência fosse igual a 13,97.

Este exemplo leva à conclusão que mesmo se obtendo um valor para a incerteza de medição considerando-se a correlação, deve-se ficar atento para o valor do fator de abrangência, o qual preferencialmente deve se situar entre 2 e 3.

Tomando-se estes três valores e aplicando-se a Simulação de Monte Carlo, o valor obtido foi de ± 44 MPa. A figura 4 apresenta a distribuição resultante para esta situação.

Tabela 5. Variáveis envolvidas no cálculo da incerteza de medição pelo método analítico para o aço ABNT 1050 para três ensaios

Incerteza estatística da força aplicada (i_a)	2,888MPa
Incerteza herdada da máquina de tração (i_m)	0,065MPa
Incerteza devida à resolução da máquina de tração (i_r)	0,106MPa
Incerteza estatística devida à medição dos diâmetros (i_d)	8,927MPa
Incerteza herdada do paquímetro (i_{hp})	3,826MPa
Coefficiente de correlação (r)	0,715
Incerteza combinada (u_c)	8,114MPa
Graus efetivos de liberdade (ν_{eff})	1,350
Fator de abrangência (k)	13,97
Incerteza expandida (U)	113,330MPa

Figura 4. Distribuição resultante obtida por Simulação de Monte Carlo.

5. Conclusões

A principal conclusão é que se utilizando a Simulação de Monte Carlo, não se tem a possibilidade de se cair numa situação onde a influência do número de graus efetivos de liberdade possa comprometer a qualidade do resultado apresentado. Logo, para valores muito pequenos do número de graus de liberdade efetivos, como no caso apresentado na tabela 3, cujo valor é 0,200, o método analítico proposto pelo ISO GUM não poderá ser aplicado, pois não se consegue obter um fator de abrangência k_{eff} para este valor de e_{eff} , e, conseqüentemente, não se obtém um valor para a incerteza expandida de medição. Por outro lado, para os casos apresentados, no ensaio de tração, há uma forte correlação entre a carga aplicada e o diâmetro do comprimento da medida original. Para os dois exemplos apresentados, esta correlação foi direta e perto de 100%.

Outro aspecto importante é que o resultado deste ensaio está fortemente relacionado ao número de ensaios realizados com a mesma matéria prima e também com a qualidade das medições do diâmetro do comprimento da medida original.

Ficou constatado também que a contribuição de cada fonte de incerteza padrão depende, fundamentalmente, do coeficiente de sensibilidade relacionado a essa fonte específica.

Como pode ser verificado nas tabelas 3, 4 e 5, as maiores contribuições de incertezas padrão estão exatamente nas incertezas tipo A, ou seja, nas incertezas estatísticas tanto da força aplicada, quanto das medições dos diâmetros. Esta

conclusão coincide com o trabalho apresentado na mesma linha de ensaio por MANDAVGADE et al. (2011) que afirma que o principal fator de influência na determinação da incerteza de medição das propriedades mecânicas por eles estudadas foi a variação atribuída ao mensurando, ou seja, a repetitividade. Logo, tais colocações levam à conclusão de que para se reduzir sensivelmente a incerteza de medição no ensaio de tração, deve-se controlar a variabilidade tanto nas cargas aplicadas, quanto nos diâmetros medidos. Isso é obtido, controlando-se fatores tais como: melhoria da qualidade do material dos corpos de prova; treinamento de pessoal para os ensaios e para as medições dos diâmetros; controle eficaz das manutenções e calibrações periódicas da máquina de tração e do paquímetro utilizados nos ensaios e maior controle na fabricação dos corpos de prova, bem como de sua fixação na máquina de ensaio.

6. Referências

- COUTO, P. R. G. DIMEC nt-02/v.00. A estimativa da incerteza de medição pelos métodos do ISO/GUM e de simulação de Monte Carlo. INMETRO, Rio de Janeiro, 2008, 34 p.
- COUTO, P. R. G.; DAMASCENO, J. C. & BORGES, R. M. H. Uncertainty estimation of mechanical assays by ISO-GUM 95 and Monte Carlo simulation ó Case study: tensile strength, torque and Brinell hardness measurements. XVIII IMEKO WORLD CONGRESS, Rio de Janeiro, 2006.

GABAUER, W. The Determination of Uncertainties in Tensile Testing. Manual of Codes of Practice for the Determination of Uncertainties in Mechanical Tests on Metallic Materials. Standards Measurement & Testing Project No. SMT4-CT97-2165, Austria, 2000.

ISO GUM - Avaliação de dados de medição: guia para a expressão de incerteza de medição. Duque de Caxias, RJ: INMETRO/CICMA/SEPIN, 2012.

MANDAVGADE, N. K.; JAJU, S. B. & LAKHE, R. R. Evaluation of Uncertainty of Measurement in Tensile Testing. Int J Engg Techsci Vol 2(2) 2011,221-224.

OLIVEIRA, J. E. F. de. Desenvolvimento de um programa computacional para a integração de dados de projeto, fabricação e medição de peças torneadas com ênfase na síntese de tolerâncias dimensionais determinísticas. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

OLIVEIRA, J. E. F. de. Estudo analítico da influência da correlação entre grandezas no cálculo da incerteza de medição da tensão de resistência mecânica. Revista Matéria, vol. 19, nº03, pp. 313 - 324, Rio de Janeiro, 2014.

SHAMSURI, A. A.; AWING, M. I. & TAWIL, M. L. M. Calculation of Measurement Uncertainty for Tensile Strength and Flexural Strength of Thermoplastic. Asian Research Journal of Mathematics.1(3): 1-11, 2016, Article nº.ARJOM.28947. DOI: 10.9734/ARJOM/2016/28947.

SILVA, L. R. O. Evaluation of the uncertainty of measurement of mechanical properties on the tensile testing. Simposio de metrología, Santiago de Querétaro, México, 2004.

STANISLAW, A.; BOCHNIA, J. & KUNDERA, C. Stress and strain measurements in static tensile tests. METROLOGY AND MEASUREMENT SYSTEMS. Index 330930, ISSN 0860-8229.

Metrol. Meas. Syst., Vol. XIX (2012), No. 3, pp. 531-540.

UNE-EN ISO 14253-1. Especificación geométrica de productos (GPS). Parte 1: Reglas de decisión para probar la conformidad o no conformidad com las especificaciones. Norma española, Génova, 1998.