

# A UTILIZAÇÃO DA ESTIMATIVA DE INCERTEZA NA AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA EMPREGADA NOS ENSAIOS MECÂNICOS DE JUNTAS SOLDADAS DE MATERIAIS METÁLICOS<sup>1</sup>

*Monica Cristina Riccio Ribeiro*<sup>2</sup>  
*Tiago Gonçalves Vasques*<sup>3</sup>  
*Maria Aparecida Carvalho Costa*<sup>4</sup>  
*Lincoln Silva Gomes*<sup>5</sup>  
*Marcos Pereira*<sup>6</sup>

## Resumo

A utilização da estimativa dos cálculos de incerteza, exigida pela norma ISO/IEC 17025, pode desempenhar um fator crítico na avaliação da metodologia empregada nos ensaios mecânicos de juntas soldadas de materiais metálicos. Essa avaliação contribui para a melhoria contínua da confiabilidade dos resultados obtidos. Esse trabalho visa a descrição dos cálculos de incerteza utilizados nos ensaios mecânicos de juntas soldadas de materiais metálicos obtida no Centro de Tecnologia Senai – Solda.

**Palavras-chave:** ISO 17025; Cálculo de incerteza; Ensaios mecânicos; Soldagem de materiais metálicos.

## THE UTILIZATION OF ESTIMATE OF UNCERTAINTY IN THE EVALUATION OF METHODOLOGY EMPLOYED IN MECHANICAL TESTS OF WELDED JOINTS OF METALLIC MATERIALS

## Abstract

The utilization of estimate of the uncertainty calculations, required by ISO/IEC 17025, may play a critical factor in the evaluation of the employed methodology in mechanical testing of welded joints of metallic materials. This assessment contributes to the continuous improvement of the reliability of the results. This work aims to describe the uncertainty calculations used in the mechanical tests of welded joints of metallic materials obtained in the Centro de Tecnologia Senai - Solda.

**Key words:** ISO 17025; Uncertainty calculation; Mechanical tests; Welding of metallic materials

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

<sup>2</sup> *Dr. Eng. Metalúrgica (Centro de Tecnologia SENAI – RJ Solda).*

<sup>3</sup> *Técnico em Soldagem (Centro de Tecnologia SENAI – RJ Solda).*

<sup>4</sup> *Especialização Gestão da Qualidade (Centro de Tecnologia SENAI – RJ Solda).*

<sup>5</sup> *Dr. Eng. Materiais (Centro de Tecnologia SENAI – RJ Solda).*

<sup>6</sup> *PhD Eng. Naval (Centro de Tecnologia SENAI – RJ Solda).*

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Princípios Gerais

Segundo a ASME IX, (Qualificação de Soldagem e Brazagem),<sup>(1)</sup> o objetivo da especificação do Procedimento de Soldagem (EPS) é determinar se o projeto de soldagem a ser utilizado é capaz de alcançar as propriedades pretendidas para sua aplicação. Dessa maneira, para a verificação da EPS é determinante a realização ensaios, entre quais se destaca a ensaio de tração. O ensaio de tração consiste na aplicação de um esforço normal em relação à superfície de uma amostra padronizada (corpo de prova), por um equipamento de teste. A uma taxa de deformação constante, a tração imposta no material aumenta gradualmente deformando o corpo de prova ao longo do seu eixo longitudinal até a sua fratura. Para os critérios de aceitação, requeridos por normas para juntas soldadas, avalia-se somente a sua tensão de máxima de ruptura.

A utilização da estimativa dos cálculos de incerteza, exigida pela norma ISO/IEC 17025, pode desempenhar um fator crítico na avaliação da metodologia empregada nos ensaios mecânicos de juntas soldadas de materiais metálicos. Essa avaliação contribui para a melhoria contínua da confiabilidade dos resultados obtidos. Esse trabalho visa a descrição dos cálculos de incerteza utilizados nos ensaios mecânicos de juntas soldadas de materiais metálicos obtida no Centro de Tecnologia Senai – Solda para a qualificação da especificação do Procedimento de Soldagem (EPS).

### 1.2 Conceitos Básicos de Incerteza de medição

#### 1.2.1 Incerteza

Segundo o “*Guia para a Expressão da Incerteza de Medição*”,<sup>(2)</sup> a incerteza do resultado de uma medição reflete a falta de conhecimento exato do valor do mensurado. O resultado de uma medição, após correção dos efeitos sistemáticos reconhecidos, é ainda, tão somente uma *estimativa* do valor do mensurado por causa da incerteza proveniente dos efeitos aleatórios e da correção imperfeita do resultado para efeitos aleatórios e da correção imperfeita do resultado para efeitos sistemáticos.

Na prática, existem muitas fontes possíveis de incerteza em uma medição, incluindo:

- definição incompleta do mensurado;
- realização imperfeita da definição do mensurado;
- amostragem não representativa – a amostra medida pode não representar o mensurando definido;
- conhecimento inadequado dos efeitos das condições ambientais sobre a medição ou medição imperfeita das condições ambientais;
- erro de tendência pessoal na leitura de instrumentos analógicos;
- resolução finita do instrumento ou limiar de mobilidade;
- valores inexatos dos padrões de medições e materiais de referência;
- valores inexatos de constantes e de outros parâmetros obtidos de fontes externas e usados no algoritmo de redução de dados;
- aproximações e suposições incorporadas ao método e procedimento de medição; e
- variações nas observações repetidas do mensurando sob condições aparentemente idênticas.

Essas fontes não são necessariamente independentes e algumas das fontes de a) a i) podem contribuir para a fonte j). Naturalmente, um efeito sistemático não reconhecido não pode ser levado em consideração na avaliação da incerteza do resultado de uma medição, porém contribui para seu erro.

### 1.2.2 Incerteza padrão combinada

A incerteza padrão do resultado de uma medição, quando este resultado é obtido de valores de um número de outras grandezas, é denominada *incerteza padrão combinada* e designada por  $u_c$ .<sup>(2)</sup> A incerteza padrão de  $y$ , onde  $y$  é a estimativa do mensurado  $Y$ , e desta maneira, o resultado da medição, é obtida pela combinação apropriada de incertezas padrão das estimativas de entrada  $x_1, x_2, \dots, x_N$ . Esta *incerteza padrão combinada* da estimativa  $y$  é representada por  $u_c(y)$ .

A *incerteza padrão combinada*  $u_c(y)$ , é a raiz quadrada da positiva da variância combinada  $u_c^2(y)$ , que é dada por:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \quad (1)$$

Onde  $f$  é a relação funcional dada por.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (2)$$

Cada  $u(x_i)$  é uma incerteza padrão avaliada. A incerteza padrão combinada  $u_c(y)$  é um desvio padrão estimado e caracteriza a dispersão dos valores que poderiam, razoavelmente, ser atribuídos ao mensurado  $Y$ .

As derivadas parciais  $\partial f / \partial x_i$  são iguais a  $\partial f / \partial X_i$  avaliadas para  $X_i = x_i$ . Estas derivadas, frequentemente denominadas coeficientes de sensibilidade, descrevem como a estimativa de saída  $y$  varia com alterações nos valores das estimativas de entrada  $x_1, x_2, \dots, x_N$ . Em particular, a alteração em  $y$ , produzida por uma pequena variação  $\Delta x_i$  na estimativa de entrada  $x_i$ , é dada por  $(\Delta y)_i = (\partial f / \partial x_i) (\Delta x_i)$ . Se esta alteração é gerada pela incerteza padrão da estimativa  $x_i$ , a variação combinada  $u_c^2(y)$  pode, desse modo, ser vista como a soma de termos, onde cada um deles representa a variância estimada associada com a estimativa de saída  $y$  gerada pela variância estimada, associada com cada estimativa de entrada  $x_i$ . Isso sugere que se escreva a equação (1) como:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2 \equiv \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (3)$$

Onde:

$$c_i \equiv \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad (4)$$

$$u_i(y) \equiv |c_i| u(x_i) \quad (5)$$

Na prática  $u_c(y)$  depende das incertezas padrão  $u(x_i)$  das estimativas de entrada tanto de grandezas de entrada normalmente distribuídas, como não normalmente distribuídas e os  $u(x_i)$  são obtidos tanto de distribuições de probabilidades baseadas na frequência como da distribuição *a priori*.<sup>(2)</sup>



### 1.2.3 Graus de liberdade efetivos

Em Geral, a distribuição-*t* (distribuição de probabilidade teórica) não irá descrever a distribuição variável  $(y - Y) / u_c(y)$  se  $u_c^2(y)$  é a soma de dois ou mais componentes de variância estimados  $u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 u_i^2(x_i)$ , mesmo se cada  $x_i$  é a estimativa de uma grandeza de entrada  $X_i$  normalmente distribuída. Entretanto, a distribuição desta variável pode ser aproximada por uma distribuição-*t*, com graus liberdade de efetivos  $\nu_{eff}$  obtidos da chamada fórmula de *Welch-Satterthwaite*.

$$\frac{u_c^4(y)}{\nu_{eff}} = \sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i} \quad (6)$$

Ou

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} \quad (7)$$

Com

$$\nu_{eff} \leq \sum_{i=1}^N \nu_i \quad (8)$$

Onde  $u_c^2(y) = u^2(y)$ . A incerteza expandida  $U_p$   $U_p = k_p u_c(y) = t_p(\nu_{eff}) u_c(y)$ , então, fornece um intervalo  $Y = y \pm U_p$  tendo nível da confiança aproximando  $p$ . Onde  $K_p$  é um fator de abrangência  $k$ :

O resultado de uma medição é, então, convenientemente expresso como  $Y = y \pm U$ , que é interpretado de forma a significar que a melhor estimativa do valor atribuível ao mensurado  $Y$  é  $y$ , e que  $y - U$  a  $y + U$  é um intervalo com o qual se espera abranger uma extensa fração da distribuição de valores que podem ser razoavelmente atribuídos a  $Y$ . Tal intervalo é também expresso como  $y - U \leq Y \leq y + U$ .

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho é apresentada a metodologia de cálculo da incerteza do ensaio de tração de juntas soldadas do laboratório de Ensaios Mecânicos do Centro de Tecnologia SENAI - RJ Solda e sua contribuição na qualificação da especificação de procedimento de soldagem.

## 3 RESULTADOS

### 3.1 Apresentação dos Cálculos da Incerteza do Ensaio de Tração

A Tabela 1 apresenta os parâmetros considerados no cálculo da incerteza dos valores de Tensão máxima obtidos no ensaio de Tração do Laboratório de ensaios do Centro de Tecnologia SENAI RJ Solda (CTS-RJ Solda).



**Tabela 1.** Tabela do cálculo de incerteza Padrão Expandida da Tensão do Ensaio de Tração

$u_{(i)}$	COMPONENTES DE INCERTEZA	VALOR $\pm$	Unidade	Distr.	DIV.	$C_{(i)}$	$u_{(i)}$ (kgf/mm <sup>2</sup> )
1	Repetitividade	0,089	kgf/mm <sup>2</sup>	Normal	1,00	1,0000	0,0892
2	Área	0,339	mm <sup>2</sup>	normal	1,00	0,0730	0,0248
3	Resolução	8,0200	kgf	Retang	1,73	0,0011	0,0052
4	Upadrão	108,000	kgf	Normal	2,00	0,0011	0,0612
5	Correção do Erro relativo do Equipamento	503,160	kgf	Normal	2,00	0,0011	0,2849
5							
6							
7							
$p$							
uc	Incerteza padrão Combinada						0,3058
<b>U</b>	<b>Incerteza padrão Expandida (95,45%)</b>				<b>k=</b>	<b>2,00</b>	<b>0,61</b>

Os componentes de incertezas ( $u_i(y)$ ) utilizados nos cálculos são: a repetitividade do ensaio de tração, a incerteza associada com a medição da área da amostra, a resolução da escala da máquina de tração e a incerteza encontrada no padrão utilizado na calibração da célula de carga utilizada na máquina de tração. O valor da incerteza do parâmetro de repetitividade é o resultado do desvio padrão dividido pela raiz do número de amostras ensaiadas. A incerteza da medição da área da amostra ensaiada é encontrada através do desvio padrão dividida pela raiz de  $n$  medições realizadas pelos técnicos executantes do ensaio. A resolução da escala utilizada da máquina também contribui como um componente de incerteza e por fim, a incerteza do padrão utilizado na calibração da célula de carga da máquina universal de tração é adicionada ao cálculo da incerteza padrão combinada. Esse valor é informado pelo certificado do laboratório que calibrou a máquina.

Identificadas os componentes de incerteza e corrigidas com o coeficiente de sensibilidade ajustado,  $C_i$ , (que relaciona a grandeza de saída com a grandeza de entrada), utiliza-se os cálculos descritos nas equações (1-8) para a determinação dos graus de liberdade efetivos e a determinação do fator de abrangência pela tabela da distribuição- $t$  a uma probabilidade de abrangência de 95,45%. Após isso, é calculado o valor de incerteza expandida  $U_p$  definindo assim o intervalo em torno dos resultados de medição que abrange a fração  $p$  (95,45%) da distribuição de probabilidade.

#### 4 DISCUSSÃO

Segundo a Norma ISO 17025 “Requisitos Gerais para a Competência de Laboratórios de ensaio e calibração”,<sup>(3)</sup> os laboratórios de ensaio devem ter e devem aplicar procedimentos para a estimativa das incertezas de medição. A estimativa razoável deve estar baseada no conhecimento do desempenho do método e no escopo da medição, (item 5.4.6.2). A Identificação dos fatores que afetam a incerteza possibilita que o ensaio ou calibração seja repetido em condições o mais próximo possível das condições originais (item 4.13.2.1). Na planilha de cálculo de incerteza do ensaio de tração, implantada no CTS-Solda, observa-se que a repetitividade é um dos fatores principais no cálculo da estimativa da incerteza. Assim, uma forma de diminuir o valor desse componente de incerteza é a adoção de

uma metodologia bem aplicada junto a um procedimento padronizado, conforme descrito pela norma ISO 17025. Além disso, os valores da incerteza fornecem também uma avaliação contínua do método utilizado, do operador que está executando o ensaio e na avaliação dos erros relativos dos equipamentos utilizados. No caso especial da qualificação do procedimento de soldagem, a norma ASME IX (qualificação de soldagem e brazagem),<sup>(1)</sup> não considera a estimativa de incerteza nos testes adotados para a qualificação dos procedimentos de soldagem. Essa norma aprova os ensaios de tração cujos valores de tensão de ruptura sejam iguais ou maiores ao especificado pelo material apresentado na tabela QW/QB 422, com uma tolerância de no máximo de 5%.<sup>(1)</sup> Dessa forma, a apresentação do valor de incerteza nos resultados de tensão máxima de ruptura para a qualificação do procedimento de soldagem fornecerá limites onde as decisões sobre a conformidade a especificação da ASME IX poderá ter grau maior de confiabilidade e segurança na aplicação e utilização dessa norma.

## 5 CONCLUSÃO

A adoção de uma metodologia bem aplicada junto com um procedimento padronizado é capaz de diminuir o valor de incerteza das medidas obtidas. Os valores da incerteza auxiliam basicamente na avaliação contínua do método utilizado, como também na avaliação do operador que está executando o ensaio e dos erros relativos dos equipamentos utilizados. No caso da utilização na qualificação de procedimento de soldagem, a apresentação do valor de incerteza nos resultados de tensão máxima de ruptura fornecerá limites onde as decisões sobre a conformidade a especificação da ASME IX poderá ter grau maior de confiabilidade e segurança na aplicação dessa norma.

## REFERÊNCIAS

- 1 ASME Section IX: Welding and Brazing Qualifications, American Society of Mechanical Engineers, New York, 2008.
- 2 Guia para a Expressão da Incerteza de Medição, Terceira edição Brasileira, INMETRO, Rio de Janeiro, 2003.
- 3 ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005 “Requisitos Gerais para a Competência de Laboratórios de ensaio e calibração”. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, 2005.