

CÁLCULO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO PARA ACREDITAÇÃO DO ENSAIO DE ANISOTROPIA¹

Daniel Antonio Kapper Fabricio²

Jefferson Haag³

Pedro da Silva Hack⁴

Carla Schwengberten Caten⁵

Bill Paiva dos Santos³

Telmo Roberto Strohaecker⁶

Resumo

A avaliação da estampabilidade de chapas metálicas em processos de conformação mecânica depende de muitas análises, entre elas podemos citar a avaliação da anisotropia. Laboratórios como o Laboratório de Metalurgia Física (Lamef) da UFRGS realizam o ensaio para o cálculo do coeficiente de anisotropia plástica baseado na norma ASTM E517:2010, mas nenhum laboratório de ensaios brasileiro é acreditado pelo Inmetro na realização dessa análise. A acreditação de ensaios conforme a norma ABNT NBR ISO/IEC 17025 requer que existam procedimentos e formulários para a estimativa da incerteza de medição de cada ensaio que esteja no escopo de acreditação. O presente trabalho tem o objetivo de estabelecer uma sistemática para a estimativa da incerteza no cálculo do coeficiente de anisotropia plástica de chapas metálicas, segundo o 'Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement' (GUM), visando a sua acreditação no LAMEF. Entre os resultados obtidos, são apresentados os cálculos realizados e o formulário de incerteza proposto, e uma análise de quais fontes mais contribuíram para a incerteza na execução de um ensaio, seguindo a sistemática proposta.

Palavras-chave: NBR ISO/IEC 17025; Incerteza de medição; GUM; Anisotropia.

CALCULATION OF MEASUREMENT UNCERTAINTY FOR THE ACCREDITATION OF ANISOTROPY TEST

Abstract

The drawability evaluation of metallic sheets from forming processes needs many studies and among them there is the analysis of material anisotropy. Laboratories such as the Laboratory of Physical Metallurgy (Lamef) of UFRGS perform tests to estimate the plastic strain ratio according to ASTM E517:2010, but there are no Brazilian testing laboratories accredited by Inmetro in this analysis. The accreditation according to ABNT NBR ISO/IEC 17025 requires procedures and forms to estimate measurement uncertainty of each test on the accreditation scope. This paper aims to establish a method to calculate the uncertainty in the evaluation of plastic strain ration of metallic sheets, following the 'Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement' (GUM), in order to perform its accreditation in LAMEF. The results present the calculations and the form of uncertainty, and an analysis of which sources most contributed to the uncertainty in the execution of one test according to the proposed systematic.

Key words: NBR ISO/IEC 17025; Measurement uncertainty; GUM; Anisotropy.

¹ *Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Acadêmico em Engenharia de Produção, Laboratório de Metalurgia Física, UFRGS, RS, Brasil.*

³ *Engenheiro Metalúrgico, Laboratório de Metalurgia Física, UFRGS, RS, Brasil.*

⁴ *Engenheiro de Produção, Msc., PPGEP, UFRGS, RS, Brasil.*

⁵ *Engenheira de Produção, Professora Doutora, PPGEP, UFRGS, RS, Brasil.*

⁶ *Engenheiro Metalúrgico, Professor Doutor, PPGE3M, UFRGS, RS, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Laboratórios de ensaios/calibrações brasileiros vêm buscando a acreditação pela norma ABNT NBR ISO/IEC 17025⁽¹⁾ visando maior reconhecimento pelos clientes e a rastreabilidade das medições realizadas. Um dos requisitos para tal acreditação é que o laboratório estime a incerteza de medição de todos os ensaios/calibrações de seu escopo. A norma NBR ISO/IEC 17025⁽¹⁾ recomenda o Guia para a Expressão de Incerteza de Medição (GUM)⁽²⁾ para a elaboração de procedimentos e planilhas de incerteza de medição de ensaios/calibrações.⁽¹⁾ Segundo Jornada,⁽³⁾ a correta expressão da incerteza de medição pelos laboratórios de ensaio pode ser considerada um fator fundamental, pois impacta diretamente na interpretação do resultado.

De acordo com o Vocabulário Internacional de Metrologia,⁽⁴⁾ a incerteza de medição é “um parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas”. A norma NBR ISO/IEC 17025⁽¹⁾ permite, nos casos em que o método de ensaio não possibilite um cálculo rigoroso, que o laboratório ao menos identifique todos os componentes de incerteza e que faça uma estimativa razoável,⁽¹⁾ considerando os requisitos do método de ensaio, os requisitos do cliente e a existência de limites nos quais são baseadas as decisões. As etapas do GUM podem ser resumidas nos passos descritos na Figura 1.



Figura 1. Etapas do GUM.⁽²⁾

Em processos de fabricação de produtos metalúrgicos, é importante estudar as propriedades dos materiais para reduzir perdas e defeitos, utilizando os materiais mais adequados a cada processo. Esse tipo de estudo é usualmente conduzido em laboratórios de ensaios, que calculam e emitem laudos apresentando propriedades dos materiais.

Segundo Tigrinho,⁽⁵⁾ as propriedades mecânicas de um material trabalhado podem variar conforme a direção estudada. Esse fenômeno, chamado de anisotropia, aparece por causa da orientação preferencial dos planos e direções cristalinas do metal após uma grande deformação por trabalho mecânico ou devido ao alinhamento de inclusões, vazios, segregação ou alinhamento de partículas de segunda fase. Uma grandeza útil para se avaliar a anisotropia plástica dos materiais é o coeficiente de anisotropia r , que pode ser calculado conforme a Norma ASTM E517:2010.⁽⁶⁾

O Laboratório de Metalurgia Física (Lamef) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) realiza ensaios mecânicos-metalúrgicos para clientes internos e externos. O laboratório decidiu estender seu escopo de acreditação para abranger ensaios focados em processos de fabricação, em especial o ensaio de determinação do coeficiente de anisotropia. Consultando-se o *site* da Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaio (RBLE),⁽⁷⁾ nota-se que, até março de 2013, nenhum laboratório de ensaios brasileiro possuía em seu escopo de acreditação o ensaio de anisotropia. Além disso, há pouca literatura sobre a aplicação do método GUM para o cálculo de incerteza de medição desse ensaio.

Assim, o objetivo principal deste trabalho é propor um procedimento para a estimativa da incerteza de medição do coeficiente de anisotropia. Com isso, espera-se: (i) obter uma planilha de incerteza que possa ser utilizada na rotina de laboratórios que realizam esse ensaio, (ii) avaliar as fontes de variabilidade que mais influenciam na incerteza desse ensaio e (iii) obter a acreditação desse ensaio no Lamef pelo Inmetro.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Segundo a ASTM E517:2010,⁽⁶⁾ o coeficiente de anisotropia plástica (r) é um parâmetro que indica a capacidade de uma chapa metálica em resistir a variações dimensionais de espessura quando sujeito a esforços uniaxiais de tração ou compressão, e está relacionada às orientações cristalográficas preferenciais dentro um metal policristalino. O valor de r , portanto, é considerado um dos parâmetros para medida da estampabilidade de chapas metálicas.

Por definição, o coeficiente r é a razão entre a deformação verdadeira na largura (ε_w) e na espessura (ε_t) de um corpo de prova de tração, após uma deformação longitudinal pré-definida (Equação 1).⁽⁶⁾

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (1)$$

Devido à dificuldade de medir as variações de espessura com precisão, é comumente utilizada uma relação equivalente, baseada no comprimento e largura do corpo de prova (CP), assumindo-se que o volume de um CP permanece constante durante a deformação plástica.⁽⁶⁾ Sabendo-se que $\varepsilon_w = \ln(w_f/w_0)$ e que $\varepsilon_t = \ln(t_f/t_0)$ e utilizando essa propriedade, é possível obter o seguinte modelo de medição para r :

$$r = \frac{\ln(w_o/w_f)}{\ln((l_f w_f)/(l_o w_o))} \quad (2)$$

Onde w_o , l_o e t_o representam, respectivamente, a largura, o comprimento e a espessura iniciais do corpo de prova, e w_f , l_f e t_f representam, nessa ordem, a largura, o comprimento e a espessura finais (após a aplicação da carga trativa). A anisotropia média (r_m) é obtida através da média ponderada dos valores de r em três direções (Figura 2): 0° (paralela), 45° (diagonal), e 90° (perpendicular) à direção de laminação:⁽⁶⁾

$$r_m = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (3)$$

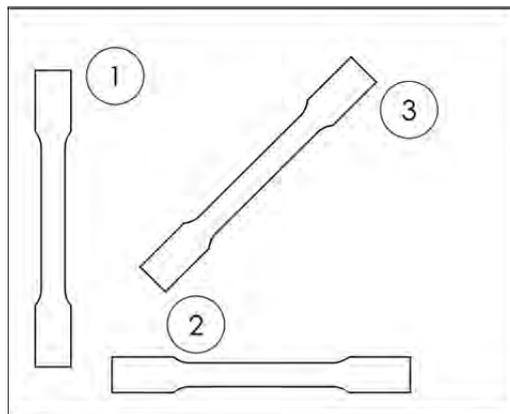


Figura 2. Preparação de corpos de prova para o cálculo de r_m .

As etapas do ensaio de anisotropia de cada corpo de prova podem ser resumidas da seguinte forma:⁽⁶⁾

- caso não se conheça as propriedades mecânicas do material, realizar um ensaio de tração previamente para obter estimativas dos seus valores;
- determinar a largura inicial (w_o) e o comprimento inicial (l_o) do corpo de prova. Dependendo do tipo de corpo de prova utilizado, pode ser necessário realizar três ou mais medidas de cada uma dessas dimensões e utilizar a média das mesmas;
- tracionar o corpo de prova axialmente para além da tensão de escoamento, sem exceder a tensão máxima, utilizando uma taxa de 0,5 mm/min ou menos; e
- retirar a carga do corpo de prova e medir a largura final (w_f) e o comprimento final (l_f).

Para a realização das medições dimensionais foi utilizado um paquímetro universal, do tipo digital, com menor divisão de escala de 0,01 mm. A faixa de medição do mesmo é de 0 a 200 mm, e a incerteza herdada do certificado de calibração mais recente é de 0,01 mm para todas as faixas, com infinitos graus de liberdade efetivos (v_{eff}) e fator de abrangência $k = 2$, também em todas as faixas.

Na execução desse trabalho são previstas quatro etapas: (i) Estudo do modelo de medição da anisotropia e possíveis fontes de incerteza, (ii) Elaboração de planilha de incerteza seguindo as etapas do GUM, (iii) Aplicação da planilha em um ensaio, (iv) Submissão da documentação para o Inmetro.

3 RESULTADOS

3.1 Estudo do Modelo de Medição da Anisotropia e Possíveis Fontes de Incerteza

Segundo a Equação 3, o ensaio de anisotropia busca medir a anisotropia média (r_m) de três amostras de uma mesma chapa. Assim, antes de calcular r_m , realiza-se a medição da anisotropia de cada amostra (r_0 , r_{45} e r_{90}), através de medições de largura e comprimento das mesmas antes e depois de sofrerem uma deformação pré-determinada. Portanto, o procedimento de cálculo de incerteza pode se basear na seguinte lógica: realiza-se todo o cálculo conforme o GUM para cada o cálculo das incertezas expandidas das três amostras (U_{r_0} , $U_{r_{45}}$ e $U_{r_{90}}$), e esses três valores calculados são utilizados como incertezas herdadas para o cálculo da incerteza de r_m .

Cada um dos coeficientes de anisotropia r_x (onde o índice x se refere genericamente a uma das amostras 0° , 45° ou 90°), segundo a Equação 2, é obtido através de quatro medições dimensionais (largura inicial, comprimento inicial, largura final e comprimento final). Todas essas medições podem ser obtidas através de um paquímetro digital, conforme descrito em Material e Métodos. Considerando-se esse equipamento de medição e o método ASTM E517,⁽⁶⁾ podem ser levantadas as fontes de incerteza representadas no Quadro 1, para as variáveis dimensionais de r_x .

Quadro 1. Levantamento das fontes de incerteza na medição de cada r_x

Fonte de incerteza	Variáveis envolvidas	Estimativa do valor
Imperfeições da amostra e dispersão/repetitividade dos resultados	w_o , w_f	Desvio padrão de $n = 3$ medições, as quais foram realizadas em posições diferentes da amostra
Incerteza herdada	w_o , w_f , l_o , l_f	Valor herdado do certificado de calibração do paquímetro
Resolução do instrumento	w_o , w_f , l_o , l_f	Valor de uma divisão de escala do paquímetro

Note-se que foi desprezado o desvio padrão de repetitividade dos comprimentos inicial e final (l_o e l_f), pois usualmente, para os tipos de amostra descritos na norma ASTM E517,⁽⁶⁾ $l \gg w$, de tal modo que as variações de comprimento são muito pequenas ao longo da amostra. Assim, as variações de comprimento podem ser desprezadas, não entrando no cálculo da incerteza.

3.2 Elaboração de Planilha de Incerteza Seguindo as Etapas do GUM

A elaboração da planilha segue as etapas do GUM, apresentadas na Introdução. A definição do modelo matemático e o levantamento das componentes de incerteza já foram apresentados em 3.1. As demais etapas são apresentadas a seguir.

3.2.1 Estimar as incertezas padrão

Para fonte de incerteza, faz-se uma estimativa da mesma e se determina qual a distribuição de probabilidade estatística associada. O Quadro 2 apresenta a distribuição, o divisor apropriado e os graus de liberdade de cada uma das fontes levantadas, para o cálculo da incerteza de cada r_x .

Quadro 2. Estimativa das incertezas padrão no cálculo da incerteza de r_x

Variável envolvida	Fonte	Distribuição de probabilidade	Divisor	Graus de liberdade	Incerteza padrão
w_o	Imperfeições da amostra e dispersão/repetitividade dos resultados	t-Student	\sqrt{n}	n-1	$\frac{\sigma_n}{\sqrt{n}}$
w_o	Incerteza herdada	t-Student	k	v_{eff}	$\frac{herdada}{k}$
w_o	Resolução do instrumento	Retangular	$\sqrt{3}$	infinitos	$\frac{resolução}{\sqrt{3}}$
w_f	Imperfeições da amostra e dispersão/repetitividade dos resultados	t-Student	\sqrt{n}	n-1	$\frac{\sigma_n}{\sqrt{n}}$
w_f	Incerteza herdada	t-Student	k	v_{eff}	$\frac{herdada}{k}$
w_f	Resolução do instrumento	Retangular	$\sqrt{3}$	infinitos	$\frac{resolução}{\sqrt{3}}$
l_o	Incerteza herdada	t-Student	k	v_{eff}	$\frac{herdada}{k}$
l_o	Resolução do instrumento	Retangular	$\sqrt{3}$	infinitos	$\frac{resolução}{\sqrt{3}}$
l_f	Incerteza herdada	t-Student	k	v_{eff}	$\frac{herdada}{\sqrt{3}}$
l_f	Resolução do instrumento	Retangular	$\sqrt{3}$	infinitos	$\frac{resolução}{\sqrt{3}}$

Utilizando-se os dados de entrada do Quadro 2 e seguindo as demais etapas do GUM, são obtidas as incertezas expandidas de cada r_x (U_{rx}), assim como seus respectivos graus de liberdade efetivos ($v_{eff,x}$) e fatores de abrangência (k_x). Esses valores são usados como fontes de incerteza herdadas (ver 3.1) para o cálculo da incerteza de r_m , segundo o Quadro 3.

Quadro 3. Estimativa das incertezas padrão no cálculo da incerteza de r_m

Variável envolvida	Fonte	Distribuição de probabilidade	Divisor	Graus de liberdade	Incerteza padrão
r_0	Incerteza herdada de r_0	t-Student	k_0	$v_{eff,0}$	$\frac{U_{r0}}{k_0}$
r_{45}	Incerteza herdada de r_{45}	t-Student	k_{45}	$v_{eff,45}$	$\frac{U_{r45}}{k_{45}}$
r_{90}	Incerteza herdada de r_{90}	t-Student	k_{90}	$v_{eff,90}$	$\frac{U_{r90}}{k_{90}}$

3.2.2 Calcular os coeficientes de sensibilidade

No modelo de medição de cada r_x (Equação 2) existem quatro variáveis e, portanto, quatro coeficientes de sensibilidade que devem ser determinados (C_{w_o} , C_{w_f} , C_{l_o} e C_{l_f}). As Equações 4 a 7 apresentam os cálculos desses coeficientes, que são derivadas parciais da Equação 2 em relação a cada variável (w_o , l_o , w_f , l_f).

$$C_{w_o} = \frac{\partial r}{\partial w_o} = \frac{\partial}{\partial w_o} \left[\frac{\ln\left(\frac{w_o}{w_f}\right)}{\ln\left(\frac{l_f \cdot w_f}{l_o \cdot w_o}\right)} \right] = \frac{\frac{1}{w_o} \ln\left(\frac{l_f}{l_o}\right)}{\left[\ln\left(\frac{l_f \cdot w_f}{l_o \cdot w_o}\right) \right]^2} \quad (4)$$

$$C_{w_f} = \frac{\partial r}{\partial w_f} = \frac{\partial}{\partial w_f} \left[\frac{\ln\left(\frac{w_o}{w_f}\right)}{\ln\left(\frac{l_f \cdot w_f}{l_o \cdot w_o}\right)} \right] = - \frac{\frac{1}{w_f} \ln\left(\frac{l_f}{l_o}\right)}{\left[\ln\left(\frac{l_f \cdot w_f}{l_o \cdot w_o}\right) \right]^2} \quad (5)$$

$$C_{l_0} = \frac{\partial r}{\partial l_0} = \frac{\partial}{\partial l_0} \left[\frac{\ln\left(\frac{w_0}{w_f}\right)}{\ln\left(\frac{l_f \cdot w_f}{l_0 \cdot w_0}\right)} \right] = \frac{\frac{1}{l_0} \ln\left(\frac{w_0}{w_f}\right)}{\left[\ln\left(\frac{l_f \cdot w_f}{l_0 \cdot w_0}\right)\right]^2} \quad (6)$$

$$C_{l_f} = \frac{\partial r}{\partial l_f} = \frac{\partial}{\partial l_f} \left[\frac{\ln\left(\frac{w_0}{w_f}\right)}{\ln\left(\frac{l_f \cdot w_f}{l_0 \cdot w_0}\right)} \right] = -\frac{\frac{1}{l_f} \ln\left(\frac{w_0}{w_f}\right)}{\left[\ln\left(\frac{l_f \cdot w_f}{l_0 \cdot w_0}\right)\right]^2} \quad (7)$$

No cálculo de r_m (Equação 3) existem três variáveis (r_0 , r_{45} e r_{90}). As Equações 8 a 10 apresentam os cálculos dos coeficientes de r_0 , r_{45} e r_{90} , que são derivadas parciais de r_m em relação a cada uma das variáveis da equação.

$$C_{r_0} = \frac{\partial}{\partial r_0} \left[\frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \right] = \frac{1}{4} \quad (8)$$

$$C_{r_{45}} = \frac{\partial}{\partial r_{45}} \left[\frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \right] = \frac{1}{2} \quad (9)$$

$$C_{r_{90}} = \frac{\partial}{\partial r_{90}} \left[\frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \right] = \frac{1}{4} \quad (10)$$

3.2.3 Avaliar possíveis correlações entre as variáveis

Serão desprezadas eventuais correlações.

3.2.4 Obter a incerteza combinada

A incerteza combinada, seja para r_x , seja para r_m , é obtida através da Lei de Propagação das Incertezas (Equação 11)⁽²⁾:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (11)$$

O termo $u^2(x_i)$ representa o quadrado de cada uma das incertezas padrões calculadas em 3.2.1, e $\partial f / (\partial x_i)$ representa os coeficientes de sensibilidade calculados em 3.2.2. Como não foram consideradas correlações entre as variáveis, o segundo termo da Equação 11 é nulo.

3.2.5 Obter a incerteza expandida

A incerteza expandida U , tanto de r_x como de r_m , é calculada através da multiplicação da incerteza combinada por um fator de abrangência k :⁽²⁾

$$U = k u_c(y) \quad (12)$$

O fator de abrangência é calculado a partir dos graus de liberdade efetivos de todas as fontes de incerteza, considerando-se uma probabilidade de abrangência especificada através de uma distribuição de probabilidade t-Student. Os graus de liberdade efetivos (v_{eff}) são calculados a partir da fórmula de Welch-Satterthwaite,⁽²⁾ considerando os graus de liberdade de cada fonte de incerteza (v_i):

$$v_{\text{eff}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{(u_i)^4}{v_i}} \quad (13)$$

A partir dos v_{eff} obtidos, calcula-se k buscando a estatística t-Student para a probabilidade de abrangência (α) utilizada. Nesse trabalho, será utilizado um valor $\alpha = 95,45\%$. Ou seja, $k = t((1-\alpha), v_{\text{eff}})$. Esse valor pode ser encontrado em tabelas ou através da função INVT do programa Excel.

3.2.6 Arredondar a incerteza e apresentar o resultado da medição

O GUM recomenda que a incerteza calculada e o resultado da medição sejam fornecidos com no máximo dois algarismos significativos.⁽²⁾ Além disso, é importante relatar a unidade (tanto do resultado como da incerteza), os graus de liberdade efetivos calculados e o fator de abrangência.

3.3 Aplicação da Planilha em um Ensaio

Foram obtidos, para cada um dos três corpos de prova, os resultados presentes no Quadro 4.

Quadro 4. Resultados das medições dimensionais e índices de anisotropia plástica

Corpo de Prova	Medida l_f [mm]	Média w_o [mm]	Média w_f [mm]	Medida l_o [mm]	r [adimensional]
0°	92,75	19,98	18,02	80,00	2,3120
45°	92,71	19,98	18,35	80,00	1,3783
90°	92,80	19,98	18,15	80,00	1,8356
				Média	1,7260*

*Média ponderada, conforme a Equação 3.

No caso das medições dimensionais de largura inicial e final (colunas 3 e 4 do Quadro 4), foram realizadas $n=3$ medições para cada corpo de prova. No Quadro, estão apresentadas somente as médias dessas medições.

Os valores r_x e r_m calculados, juntamente com a expressão de suas incertezas expandidas, graus de liberdade efetivos e demais informações indicadas no GUM se encontram no Quadro 5, representando o relato da incerteza conforme o exposto em 3.2.6.

Quadro 5. Resultados finais

Corpo de Prova	Índice de anisotropia (r)	Incerteza expandida (U_c)	Graus de liberdade efetivos (v_{eff})	Fator de abrangência (k)	Probabilidade de abrangência (α)
0°	2,31	0,38	2,9064397	4,5265508	95,45%
45°	1,38	0,062	7,2934745	2,4288091	95,45%
90°	1,84	0,13	4,4422522	2,8693152	95,45%
m^*	1,73	0,065	7,1247561	2,4288091	95,45%

*Não é um corpo de prova, mas um valor calculado a partir dos valores das outras amostras.

3.4 Submissão da Documentação para o INMETRO

A planilha elaborada, assim como os demais documentos necessários para a extensão do escopo de acreditação (procedimentos, certificados de calibração, etc.) foi enviada para o Inmetro. Os documentos necessários para extensão de escopo de laboratórios de ensaio constam no FOR-CGCRE-17.⁽⁸⁾ Após análise, poderá ser realizada uma auditoria e, se aprovado, o Lamef terá o ensaio de anisotropia consolidado em seu escopo.

4 DISCUSSÃO

Na discussão, será realizada uma análise da relação entre as incertezas expandidas calculadas de cada r_x , inclusive r_m , e caso esse valor se mostre elevado, o resultado

da incerteza expandida será desdobrado para cada fonte de incerteza, visando descobrir qual delas teve maior influência.

A incerteza expandida calculada de cada r_x variou entre 3,76% e 16,45% do resultado r_x , como mostra o Quadro 6. O mesmo vale para a razão entre a incerteza expandida de r_m e o valor de r_m .

Quadro 6. Relações de U_r/r

Corpo de prova	Índice de anisotropia (r)	Incerteza expandida (U_r)	Razão U_r/r
0°	2,3120	0,3797	16,45%
45°	1,3783	0,0621	4,49%
90°	1,8356	0,1258	7,07%
m*	1,7260	0,0653	3,76%

*Não é um corpo de prova, mas um valor calculado a partir dos valores das outras amostras.

Considerando-se que as razões U_{r_x}/r_x foram relativamente altas, é importante detalhar as contribuições de incerteza de cada fonte. O Quadro 7 mostra esse detalhamento, através da apresentação das contribuições de incerteza (incerteza padrão multiplicada pelo coeficiente de sensibilidade) de cada fonte.

Quadro 7. Análise da influência de cada fonte de incerteza nas incertezas combinadas de r_x

Variável envolvida	Fonte de incerteza	Contribuição de incerteza para U_{r_0} [mm]	Contribuição de incerteza para $U_{r_{45}}$ [mm]	Contribuição de incerteza para $U_{r_{90}}$ [mm]
l_f	Incerteza herdada	-0,0027915	-0,0011989	-0,0018895
l_f	Resolução do instrumento	-0,0016116	-0,0006922	-0,0010909
l_o	Incerteza herdada	0,0032363	0,0013894	0,0021918
l_o	Resolução do instrumento	0,0018685	0,0008022	0,0012654
w_o	Incerteza herdada	0,01856	0,0095979	0,0135594
w_o	Imperfeições da amostra e dispersão/repetitividade dos resultados	0,0123733	0,0063986	0,0090396
w_o	Resolução do instrumento	0,0107156	0,0055414	0,0078285
w_f	Incerteza herdada	-0,0205784	-0,0104541	-0,0149268
w_f	Imperfeições da amostra e dispersão/repetitividade dos resultados	-0,0763836	-0,0184393	-0,0358795
w_f	Resolução do instrumento	-0,0118809	-0,0060357	-0,008618

O Quadro 8 mostra o mesmo detalhamento para r_m .

Quadro 8. Análise da influência de cada fonte de incerteza nas incertezas combinadas de r_m

Variável envolvida	Fonte de incerteza	Contribuição de incerteza para U_m
r_0	Incerteza herdada de r_0	0,020970
r_{45}	Incerteza herdada de r_{45}	0,012787
r_{90}	Incerteza herdada de r_{90}	0,010961

Segundo o Quadro 8, os corpos de prova de 0°, 45° e 90° tiveram contribuições de incerteza parecidas na constituição da incerteza expandida de r_m . Isso é condizente com o método de cálculo, visto que foram consideradas as mesmas fontes no cálculo de U_{r_x} de cada um dos três corpos de prova.

Analisando-se o Quadro 7, nota-se que a maior contribuição de incerteza dos índices de anisotropia r_0 , r_{45} e r_{90} , para os dados e fontes de incerteza consideradas, foi devido ao desvio de repetitividade nas medições dimensionais de largura (principalmente a final). Algumas possíveis causas são:

- a) Variações dimensionais (imperfeições) na amostra;
- b) Método de medição: dependendo da forma como o operador manuseia o paquímetro, o resultado pode variar;
- c) Variações de condições ambientais entre as medições, ocasionando dilatação/contração térmica; e
- d) Número de medições ($n = 3$) muito pequeno.

As outras fontes que se mostraram mais significativas, além do desvio de repetitividade de w_f , foram as incertezas herdadas referentes a w_f e w_o . O motivo provável de isso ter ocorrido está intrínseco ao método utilizado no cálculo de incerteza (GUM). Uma análise mais detalhada da planilha utilizada mostra que os coeficientes de sensibilidade relacionados a w_f e w_o são 5 a 9 vezes maiores que os coeficientes de l_f e l_o , ou seja, é natural que a contribuição de incerteza das fontes relacionadas às variáveis w_f e w_o seja maior.

Como essa causa é intrínseca ao cálculo, somente as causas (a) a (d) serão detalhadas nessa discussão, visando analisar a sua pertinência e propor ações de melhoria no método de medição da anisotropia.

Em relação a (a), sabe-se que após o processo de usinagem e preparação de amostras sempre permanecem pequenas imperfeições na amostra. Essas imperfeições podem ser reduzidas através da redução dos limites de tolerância na preparação das mesmas.

Caso não se utilize um método de medição padronizado, ocorrem variações entre operadores que realizam medição com paquímetros. Por isso, é importante padronizar o método de manuseio do paquímetro e também estabelecer as posições da amostra onde serão realizadas as medidas. Essas ações, aliadas a treinamento das pessoas que realizarão as medições, provavelmente reduziriam a contribuição de incerteza associada a (b).

Considerando-se que os ensaios são realizados em ambiente laboratorial, a temperatura possui variação pequena entre as medições, ocasionando em dilatação/contração insignificante, dependendo do coeficiente de dilatação térmica do material. Ou seja, o fator (c) pode ser considerado desprezível em relação a fatores como (a) e (b). Ainda assim, estudos mais detalhados podem ser realizados para avaliar a influência da variação térmica em medições dimensionais.

Por fim, pode ser analisado o fator (d), ou seja, o número de medições utilizadas no cálculo do desvio padrão. A incerteza padrão devido ao desvio padrão da média (de repetitividade) é obtida através da relação σ/\sqrt{n} , onde σ representa o desvio padrão calculado e n o número de medições. Experimentalmente, observa-se que, quanto maior o valor de n , menor será a contribuição de incerteza referente ao desvio padrão de repetitividade de uma variável dimensional. Ou seja, se nesse trabalho tivesse sido utilizado um valor de $n > 3$, esse componente tenderia a ser menor, na razão $1/\sqrt{n}$.

Além disso, outras medidas já aplicadas nesse trabalho podem ser aplicadas em trabalhos futuros: seleção de fornecedores de calibrações confiáveis (acreditados pela RBC/Inmetro), utilização de equipamento com pequena divisão de escala e seleção de equipamento com baixo limite de erro.

5 CONCLUSÕES

Foram mostradas e desdobradas todas as etapas do GUM para o cálculo da incerteza do coeficiente de anisotropia plástica segundo a ASTM E517,⁽⁶⁾ sendo muitos desses cálculos apresentados no trabalho. Para facilitar a reprodução dos cálculos em ensaios futuros, foi criada uma planilha em Excel onde constam todos os cálculos realizados.

A planilha foi aplicada em um ensaio, permitindo que se analisasse, dentre as fontes de incerteza consideradas, quais delas mais contribuíram para a incerteza expandida. Isso permitiu que fossem indicadas ações visando reduzir a incerteza do ensaio, tais como: reduzir os limites de tolerância na preparação das amostras; padronizar o método de medição e treinar o pessoal; controlar as condições ambientais; entre outras. No entanto, notou-se que algumas componentes do valor da incerteza expandida não podem ser reduzidas, pois são inerentes ao próprio modelo de cálculo do GUM.⁽²⁾

Por fim, a planilha e demais documentos foram encaminhados para análise do Inmetro visando a extensão de escopo do Lamef para abranger o ensaio de anisotropia.

São listadas as seguintes sugestões de trabalhos futuros:

- incluir outras fontes de incerteza na planilha e analisar se elas seriam relevantes para o resultado final. Algumas sugestões: erro máximo admissível do instrumento, dilatação/contração térmica, desvio de repetitividade de I_o e I_f ;
- realizar estudo de covariância entre as variáveis e, caso seja relevante, adicionar a correlação entre as variáveis na planilha;
- analisar o custo-benefício de se realizar um número maior de medições no cálculo da contribuição de incerteza do desvio de repetitividade de medições dimensionais; e
- obter a acreditação do ensaio no Lamef.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelas bolsas de iniciação científica e de mestrado.

REFERÊNCIAS

- 1 ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO/IEC 17025: Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaios e calibrações. Rio de Janeiro, 2005.
- 2 JCGM - Joint Committee for Guides in Metrology. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). JCGM 100:2008, Issue 1, 2008.
- 3 JORNADA, D. H. Implantação de um guia orientativo de incerteza de medição para avaliadores de laboratório da Rede Metrológica RS. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre UFRGS, 2009.
- 4 JCGM. International vocabulary of metrology (VIM) – Basic and general concepts and associated terms. JCGM 200:2008, Issue 3, 2012.
- 5 TIGRINHO, L. M. T. Influência da lubrificação na estampagem via análise de deformações obtidas em uma chapa de aço de alta estampabilidade. Dissertação de Mestrado. Curitiba, UFPR, 2005.

- 6 ASTM - American Society for Testing and Materials (ASTM International). ASTM E517-00: Standard Test Method for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal. Pennsylvania, 2010.
- 7 INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. Site institucional – Consulta ao Catálogo da RBLE. Disponível em: <www.inmetro.gov.br/laboratorios/rble>. Acesso em: 06 mar. 2013.
- 8 _____. FOR-CGCRE-017: Relação de documentos para solicitação da acreditação/extensão de laboratórios de ensaio, de acordo com a norma ABNT NBR ISO/IEC 17025. Revisão 02, 01 mar. 2012.