



ANÁLISE DE INCERTEZA PARA CALIBRAÇÃO FOTOELÁSTICA

Braitner Lobato da Silva

Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, CEP 70910-910, Brasília, DF
lobatodecristo@yahoo.com.br

Jorge Luiz de Almeida Ferreira

Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, CEP 70910-910, Brasília, DF
jorge@unb.br

Resumo: *O uso da fotoelasticidade como ferramenta experimental tem ressurgido como uma importante ferramenta para a validação de modelos numéricos. Para tanto, os modelos a serem usados devem ser calibrados a fim de terminar o fator de sensibilidade ótica. O presente trabalho tem como objetivo avaliar as incertezas inerentes ao processo de calibração por tração de uma placa plana com furo central feita de policarbonato. As possíveis fontes de erro foram comparadas e a incerteza de medição determinada em 6,28% com a garantia de 95% de confiança.*

Palavras-chave: *Análise de incerteza, Calibração fotoelástica.*

1. INTRODUÇÃO

Atualmente as técnicas experimentais têm ressurgido no cenário mundial como ferramentas de validação de metodologias numéricas na análise de tensões. Para tanto, destacamos a fotoelasticidade por possibilitar a visualização completa dos níveis de tensão. Todavia, essa técnica experimental carece da calibração de seus materiais fotoelásticos. Nesse ínterim surge a necessidade de se estimar quão precisos são os resultados a fim de garantir a confiabilidade dos ensaios experimentais.

1.1 Calibração Fotoelástica

Dentre as técnicas experimentais disponíveis a Fotoelasticidade é uma das mais versáteis e destaca-se pelo fato de permitir a visualização dos campos de tensões elásticas e a quantificação de suas intensidades. Além disso, ela sobressai porque determinados materiais isotrópicos apresentam duplo índice de refração, ou birrefringência, quando submetidos a um determinado carregamento mecânico (Dally e Riley, 1991).

Quando esses materiais são observados sob luz polarizada, um padrão de franjas surge como uma série de faixas coloridas ou monocromáticas. Cada faixa representa um grau de birrefringência, correspondendo ao estado de tensão e deformação do material naquele ponto. Assim, o padrão de franja pode ser lido como um mapa topográfico da distribuição de tensões e deformações ao longo da superfície analisada.

Desta forma, a distribuição de tensões nos pontos de interesse pode ser interpretada mediante avaliação da ordem de franja isocromática local. Trabalhando no regime elástico, cessado o esforço aplicado, as deformações são aliviadas e a estrutura do material volta à situação inicial.

A avaliação quantitativa dos resultados fotoelásticos é dependente da calibração do material fotoelástico. Ou seja, a determinação dos níveis de tensão por fotoelasticidade depende da determinação do fator de sensibilidade ótico do material fotoelástico, f_{σ} .

1.2 Incerteza de Medição

Todos os instrumentos, padrões e aparelhos jamais serão perfeitamente precisos. Ou seja, independente de como, quando e onde o instrumento está sendo utilizado, ele sempre cometerá erro, por menor que seja. Caso uma série de repetidas medições seja feita, os resultados nem sempre serão iguais. Portanto, estima-se uma incerteza para todo e qualquer instrumento ou equipamento de medição.

Em qualquer aplicação a incerteza de medição pode ser uma característica inerente de erros aleatórios e/ou sistemáticos, ou ainda de variáveis específicas do processo de medição ou ainda de características únicas do equipamento utilizado. Segundo o Vocabulário de Metrologia (Inmetro, 2003), a incerteza é definida como um parâmetro associado ao resultado de uma medição que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser fundamentalmente atribuídos ao mensurando.

A falta do conhecimento exato do mensurando gera uma dúvida no resultado da medição. Na prática, existem muitas fontes possíveis de incerteza em uma medição, incluindo a definição incompleta do mensurando; a realização imperfeita da definição do mensurando; uma amostragem não-representativa e o conhecimento inadequado dos efeitos das condições ambientais sobre a medição ou medição imperfeita das condições ambientais. Tem também o erro de tendência pessoal na leitura de instrumentos analógicos; a resolução finita do instrumento; os valores inexatos dos padrões de medição e materiais de referência; os valores inexatos de constante e de outros parâmetros obtidos de fontes externas; as aproximações e suposições incorporadas ao método e procedimento de medição; as variações nas observações repetidas do mensurando sob condições aparentemente idênticas (Peixoto e Almeida, 2003).

Existem dois tipos básicos de incerteza de medição, que são baseados em duas análises diferentes: incerteza de medição tipo A e tipo B. A incerteza do tipo A é a incerteza avaliada a partir da análise de uma série de observações, realizada conforme a estatística clássica. A incerteza tipo B é a incerteza avaliada por quaisquer outros métodos, que não os métodos estatísticos clássicos como o fator de segurança, o nível de confiabilidade, os erros específicos, os erros sistemáticos diversos, a incerteza de um instrumento digital devido à resolução entre outros aspectos. Em geral, para estimar a incerteza tipo B os métodos empregados correspondem à estatística *bayesiana* que consiste em admitir uma distribuição de probabilidades, *a priori*, para a variável aleatória.

2. MATERIAIS

De acordo com a Fig. (1), o instrumento ótico usado foi o polariscópio de transmissão P-150 da Riken Keike Fine Instruments CO e o corpo de prova foi fabricado com uma placa plana de policarbonato, PSM-1, com um furo circular e com as seguintes dimensões: 250 x 45 x 6,35 mm, ver a Fig. (2).



Figura 1. Polariscópio de transmissão.

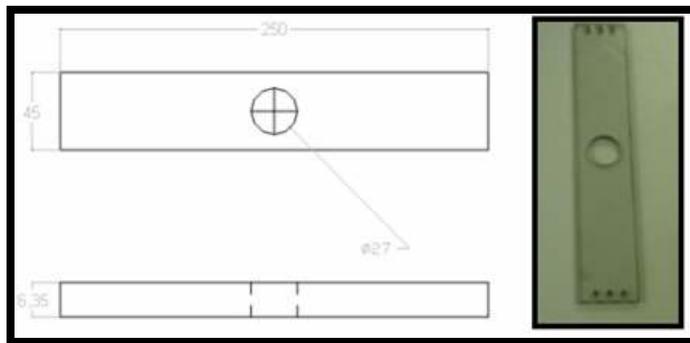


Figura 2. Geometria do corpo de prova.

3. PROCEDIMENTOS

3.1 Experimentais

O polariscópio foi carregado gradativamente com 48,9; 97,8; 146,7; 195,6 e 244,5 N para avaliar qualitativamente o progresso do padrão de franjas. Para cada nível de solicitação observou-se a ordem de franja nula para identificar qual configuração apresentava melhor visualização desta ordem.

O analisador foi rotacionado e a ordem de franja de número 0 foi deslocada até uma seção com tensão uniformemente distribuída. A leitura da rotação foi tomada por 10 vezes de maneira a aumentar a confiabilidade da mesma. A obtenção da ordem de franja, N , para a região de tensão nominal, se deu através do método de compensação de Tardy, de acordo com (Silva, 2007).

Em se tratando de um estado uniaxial plano de tensões, onde a direção de σ_1 é a mesma da aplicação da carga e $\sigma_2 = 0$, pode-se determinar pela lei de Brewster, através da Eq. (1), (Vishay, 1975):

$$f_{\sigma} = \frac{P}{w.N} \quad (1).$$

3.2. Avaliação das Incertezas

O procedimento do cálculo de incerteza é feito da seguinte forma: (i) especificar o mensurando, (ii) identificar as fontes de incerteza, (iii) quantificar os componentes de incerteza excluindo os valores insignificantes, (iv) identificar quais incertezas são dominantes e se existe uma componente dominante, (v) somar algebricamente as componentes dependentes. Em seguida, (vi) somar as variâncias das componentes independentes com a componente resultante do item anterior, no caso da não existência de uma componente dominante extrair a raiz quadrada dessa soma gerando a incerteza combinada, (vii) calcular a incerteza expandida e (viii) relatar o resultado final.

3.3. Componentes de incerteza a serem consideradas

A análise de incertezas para os ensaios de calibração inclui uma relação de todas as fontes de incertezas junto com as incertezas padrão associadas da medição. Para garantir maior clareza, são apresentados os dados relevantes para esta análise, na forma de tabelas. A Tabela (1) apresenta os parâmetros independentes e dependentes do material nos ensaio à temperatura ambiente.

3.4. Diagrama de Causa e Efeito

A análise minuciosa dos fatores que influenciam o resultado analítico pode ser representada pelo diagrama de causa e efeito. Esta ferramenta é bastante útil, pois facilita a identificação das possíveis fontes de incerteza na medição das grandezas mensuradas. A Figura (3) apresenta o diagrama de causa e efeito para a determinação do fator de sensibilidade ótico, f_{σ} . O vetor central representa o mensurando e as suas ramificações são as contribuições dos diferentes fatores que afetam o resultado da análise. A Tabela (2) explicita a Fig. (3).

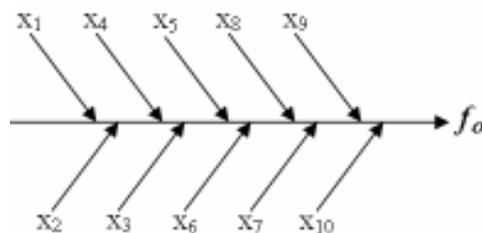


Figura 3. Diagrama de causa e efeito das fontes de incerteza associadas à calibração de materiais fotoelásticos.

Tabela 1. Componentes de incerteza a serem considerados nos ensaios à temperatura ambiente.

Fonte de incerteza	Causa	Método de avaliação	Distribuição de probabilidade	Divisor apropriado
Incerteza herdada da calibração do material fotoelástico	Exatidão limitada na calibração. Incerteza de medição na calibração padrão.	Importada dos resultados de calibração como uma incerteza expandida ($U_{95\%}$)	Normal	Fator de abrangência declarado nos resultados de calibração
Resolução do analisador e do paquímetro	Valor de uma divisão de escala ou capacidade de interpolação limitada	Valor da divisão de escala, capacidade de interpolação do operador ou valor de uma divisão do nônio.	Uniforme	$\sqrt{3}$
Desvio padrão experimental da média	Natureza do material ensaiado	A função estatística usada para sua caracterização é o desvio padrão amostral dos n valores que compõem a série de medições.	Normal	\sqrt{n}
Preparação do corpo de prova: aplicação do carregamento	Manipulação do corpo de prova	Valor da divisão de escala, capacidade de interpolação do operador ou valor de uma divisão do nônio.	Uniforme	$\sqrt{3}$
Temperatura do ensaio	Limites de temperatura estabelecidos pelo laboratório	$\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta T$, onde: ΔL : dilatação linear do material α : coeficiente de dilatação do material ΔT : diferença entre a temperatura final e inicial do ensaio	Uniforme	$\sqrt{3}$

Tabela 2. Descrição das fontes de incerteza a serem consideradas.

Fontes de Incerteza	
Símbolo	Descrição
Instrumental	
x ₁	Posicionamento das lentes do polariscópio
x ₂	Erro de zero do analisador
x ₃	Resolução do analisador
x ₄	Resolução do paquímetro
Corpo de prova	
x ₅	Erros na aplicação do carregamento
x ₆	Tensões residuais pré-existent
x ₇	Variações nas propriedades mecânicas
x ₈	Variação de temperatura
Experimental	
x ₉	Erro na identificação das ordens de franja
x ₁₀	Erro de leitura da rotação do analisador (repetitividade)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Mediante a verificação das imagens mostradas na Fig. (4), optou-se pelo carregamento trativo de 152,1 N, pois este apresentou maior facilidade de visualizar o deslocamento da ordem de franja nula com o giro do analisador. Através dos dados experimentais mostrados na Tab. (3), obtem-se a ordem de franja média, N , equivalente a $0,48 \pm 0,01$. Sabendo que w é 0,045m e com o auxílio da Eq. (1), temos que o fator de sensibilidade ótico do material para calibração trativa é $f_{\sigma T} = 6926 \pm 435$ Pa/(fr.m).

Tabela 3 Resultados de medição da rotação e ordem de franja da calibração por tração.

Medida	θ (°)	$\bar{\theta}$ (°)	σ_{θ}	σ_{θ} (%)	N (°)	\bar{N}	σ_N	σ_N (%)
1	87	86,4	2,271	2,628	0,483	0,480	0,013	2,628
2	85				0,472			
3	83				0,461			
4	88				0,489			
5	89				0,494			
6	87				0,483			
7	85				0,472			
8	83				0,461			
9	88				0,489			
10	89				0,494			

As fontes de incerteza de medição correspondentes aos ensaios realizados estão descritas na Tab. (2) e a avaliação das mesmas é apresentada na Tab. (4). Para tanto, foram utilizadas as regras gerais estabelecidas pelo Guia Internacional de Medição para avaliar e expressar a incerteza de medição dos ensaios fotoelásticos.

Sabendo que u_B e U são as incertezas combinada padrão e expandida, as incertezas citadas são dadas pelas Eqs. (2) e (3):

$$u_B = \sqrt{u_{A10}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + u_{B4}^2 + u_{B5}^2 + u_{B9}^2 + u_{B10}^2} \quad (2);$$

$$U = u_B \cdot k \quad (3);$$

onde k é um fator de abrangência determinado para uma dada distribuição de probabilidade que define o intervalo de confiança do resultado.

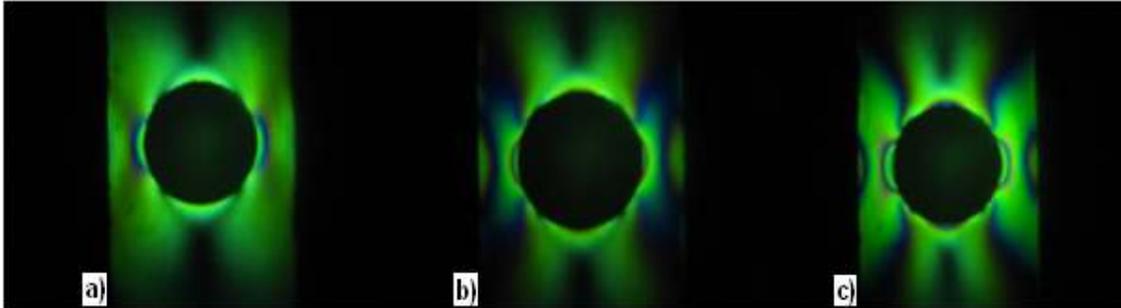


Figura 4. Placa plana com furo central sob a) 103,0 N b) 152,1 N c) 201,1 N de carregamento trativo.

Tabela 4. Avaliação das fontes de incerteza.

Efeitos aleatórios						
Fonte	Tipo A u_{Ai} (%)	Distribuição de probabilidades	Divisor	Dividendo	Tipo B u_{Bi} (%)	ν_i
x1	0,000	--	--	--	0,000	--
x2	--	retangular	$\sqrt{3}$	0,5 °	0,289	∞
x3	--	retangular	$\sqrt{3}$	1 °	0,577	∞
x4	--	retangular	$\sqrt{3}$	0,0001 m	5,8e-5	∞
x5	--	retangular	$\sqrt{3}$	1 N	0,578	∞
x6	0,000	--	--	--	0,000	--
x7	0,000	--	--	--	0,000	--
x8	0,000	--	--	--	0,000	--
x9	--	retangular	$\sqrt{3}$	0,5	0,289	∞
x10	2,628	normal	$\sqrt{10}$	--	0,831	9
graus de liberdade efetivo:						10
					u_{BT} :	2,904
t' student (95%): 2,28					U_T :	6,284

A incerteza expandida que define um intervalo de confiança de 95% foi de 6,28 %. A Figura (5) mostra a comparação entre as fontes de incerteza mais significativas para o ensaio de calibração do material fotoelástico. A partir dela, infere-se com mais clareza que os erros do tipo A associados à aquisição dos dados da ordem de franja (x10) são os que mais influenciam na incerteza do tipo B (u_B) e conseqüentemente na incerteza expandida (U).

A identificação precisa das ordens de franja não é possível, pois esses erros são de natureza humana. Além disso, têm-se também os erros de paralaxe associados à leitura da rotação do analisador que influenciam diretamente na determinação da ordem fracionária de franja. Estes erros podem ser eliminados com a utilização de equipamentos e metodologias que façam a aquisição dos dados digitalmente. Dessa maneira os erros destacados serão minimizados rigorosamente.

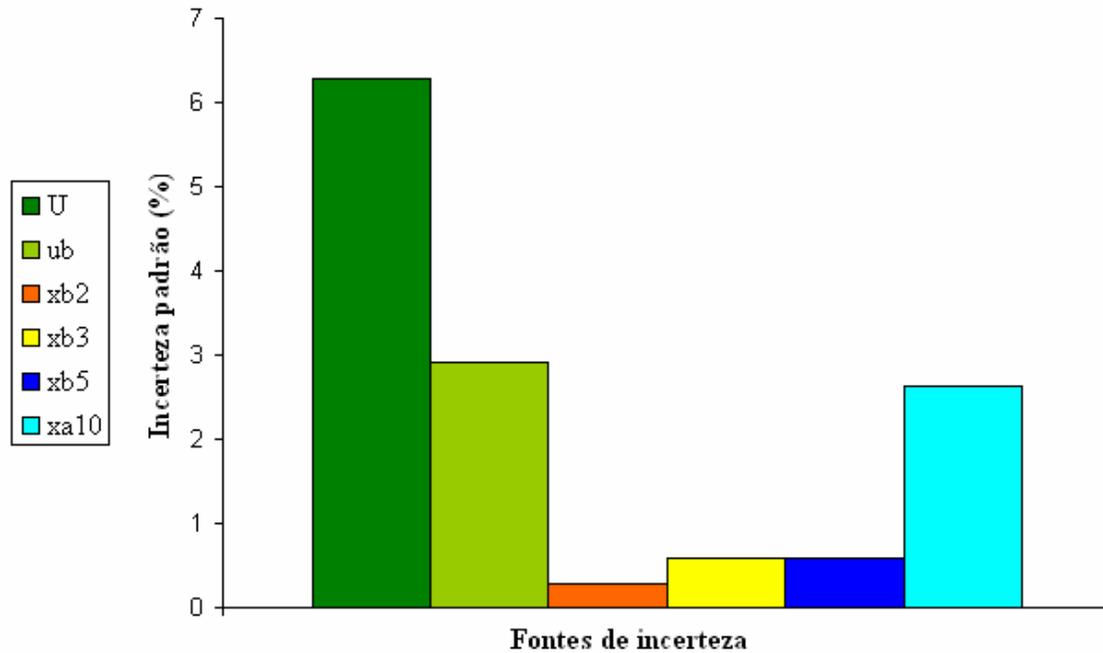


Figura 5. Comparação da incerteza padrão entre as fontes de incerteza.

5. CONCLUSÕES

A análise de incerteza para ensaios fotoelásticos não é muito comum devido à ausência de normas que os regulamentem. Todavia, é de extrema importância determinar a confiabilidade dos resultados experimentais. Especialmente para aplicações que envolvam a validação de modelos numéricos. O presente trabalho não considera a metodologia adotada como sendo perfeita. A mesma é passiva de ser otimizada. Não tem o intuito de encerrar o assunto, mas sim de acentuar a necessidade de determinar a confiabilidade da calibração dos materiais fotoelásticos e conseqüentemente garantir melhores resultados para a análise experimental de tensões. Este trabalho se diferencia na descrição e na análise de importantes fontes de erro associadas à calibração fotoelástica. Os resultados encontrados foram satisfatórios.

6. AGRADECIMENTOS

Louvido seja Deus por todos os benefícios que Ele tem nos dado. Agradecemos ao Grupo de Mecânica dos Sólidos (GAMMA) do ENM/UnB pelo apoio e ao CNPq pelo fomento.

7. REFERÊNCIAS

- Dally, James; Rilly, Willian. Experimental Stress Analysis. 3.ed. Singapura: McGraw-Hill, Inc, 1991.
- Inmetro, “Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia”, 2003, 3 ed. ISBN 85.87090-90-9. Rio de Janeiro. 75p.
- Peixoto, José G. P., Almeida, Carlos E., “Avaliação da incerteza na implantação de um sistema de calibração na faixa da mamografia”, 2003, In: METROLOGIA 2003 – Metrologia para a vida, Sociedade Brasileira de Metrologia, Recife, Pernambuco, Brasil. Setembro.
- Silva, B. L., 2007, “Validação de modelos numéricos através da fotoelasticidade”, Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, pp 18-19.
- Vishay Intertechnology, Inc – Measurements Group. “Calibration of Photoelastic Plastics for Two-and Three-Dimensional Model Analysis: Technical Data Bulletin T-402”. Photoelastic, Inc. 1975.

ANALYSIS OF UNCERTAINTY FOR PHOTOELASTIC CALIBRATION

Braitner Lobato da Silva

University of Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, CEP 70910-910, Brasília, DF
lobatodecristo@yahoo.com.br

Jorge Luiz de Almeida Ferreira

University of Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, CEP 70910-910, Brasília, DF
jorge@unb.br

***Abstract:** The use of the photoelasticity as experimental tool has been returning as an important tool for the validation of numeric models. For so much, the models to be used should be gaged in order to finish the factor of optic sensibility. The present work has as objective evaluates the inherent uncertainties to the calibration process for traction of a plane plate with central hole done of polycarbonate. The possible mistake sources were compared and the uncertainty of certain measurement in 6,28% with the warranty of 95% of trust*

***Keywords:** Analysis of Uncertainty, Photoelastic Calibration.*