

CONTRIBUIÇÕES À DETERMINAÇÃO DE COEFICIENTES DE CALIBRAÇÃO ATRAVÉS DE SIMULAÇÕES EM ELEMENTOS FINITOS APLICADOS NA MEDIÇÃO DE TENSÃO RESIDUAL PELO MÉTODO DO FURO CEGO

Rodrigo Blödorn, rodrigo.blodorn@labmetro.ufsc.br^{1,2}
Lucas Araujo Bonomo, abonomo.lucas@gmail.com²
Matias Roberto Viotti, matias.viotti@labmetro.ufsc.br²
Rolf Bertrand Schroeter, rolf.schroeter@ufsc.br¹
Armando Albertazzi Gonçalves Jr., a.albertazzi@ufsc.br²

¹LMP, Laboratório de Mecânica de Precisão

²LABMETRO, Laboratório de Metrologia e Automação

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, Brasil CEP 88040-970 Cx.Postal: 5053

Resumo: A medição de tensão residual pelo Método do Furo Cego (MFC) é regulamentada pela norma ASTM E837.13a para uma variação de diâmetros de furo e profundidades de inspeção. Para calcular a distribuição das tensões medidas, coeficientes de calibração são aplicados de acordo com o diâmetro do furo e o tipo de roseta extensométrica usada na medição das deformações, que são uma consequência do alívio de tensão. Estes coeficientes podem ser determinados experimental ou numericamente. A norma é baseada em um furo cego ortogonal à superfície da amostra e com uma geometria de fundo plano. No entanto, as ferramentas de corte comumente usadas no MFC são fresas de topo odontológicas, que normalmente têm um chanfro na quina. Consequentemente, chanfros ou filetes são diretamente transferidos para o fundo do furo cego que, por sua vez, não são considerados pelos coeficientes de calibração tabelados. Simulações numéricas em elementos finitos através do software ANSYS® foram realizadas. Variações consideráveis foram observadas entre os coeficientes de calibração obtidos para um furo cego cilíndrico e um com chanfro no fundo.

Palavras-chave: Tensão residual, Método do Furo Cego, Coeficientes de Calibração, Análise de Elementos Finitos.

1. MEDIÇÃO DE TENSÃO RESIDUAL E O MÉTODO DO FURO CEGO

Tensões residuais são consequências comuns de todos os processos de fabricação. Sua presença pode ser vantajosa, como no caso de tensões residuais compressivas na superfície do material, o que aumenta a vida em fadiga da peça. Mas podem ser desvantajosas quando, por exemplo, somadas ao carregamento de trabalho da peça causam a falha estrutural do material.

Existem diferentes métodos de medição de tensão residual e sua aplicação depende principalmente: a) da natureza do campo de tensões que se deseja medir, b) do tipo de tensões (macroscópicas, microscópicas ou submicroscópicas), c) do tempo e recurso disponíveis, d) da incerteza necessária na medição, e) da geometria da região (dimensões e forma), e f) do local de medição (em campo ou no laboratório). As diferentes técnicas de medição de tensões residuais podem ser classificadas em métodos Semi-destrutivos, Destrutivos e Não-destrutivos, conforme mostrado na Tab. (1).

Tabela 1. Principais métodos de medição de tensões residuais (Lu, 1996).

Classificação	Métodos de medição	Observações
Semi-destrutivos	Furo Cego	Execução de um furo, alívio localizado de tensão.
Destrutivos	Remoção de Camadas (Deflexão)	Camadas retiradas por ataque químico. Pode estar aliada ao Método de Difração de Raios-X (método não-destrutivo).
	Seccionamento	Cortes parciais longitudinais ou transversais ao eixo de peças axisimétricas.
Não-destrutivos	Difração de Raios-X	Variação das distâncias entre os planos atômicos.
	Difração de nêutrons	Análogo ao Método de Raios-X, no entanto, com maior profundidade de penetração.
	Ultrassom	Variação da velocidade de ondas ultrassônicas no interior do material.
	Magnético	Relação entre propriedades magnéticas.

O MFC para medição de tensões residuais é atualmente regulamentado pela norma ASTM E837.13a (2013). Essa norma adota um modelo baseado em um furo perfeitamente cilíndrico e com eixo paralelo à direção normal do plano de medição. A geometria do fundo deve ser plana, perpendicular à parede do furo cego. As deformações geradas ao redor do furo pelo alívio das tensões é medida através de um conjunto de rosetas extensométricas. Na Figura (1) pode-se observar o furo cego após a redistribuição das tensões presentes no material ao redor deste. As deformações medidas são expressas em tensões por meio de um conjunto de coeficientes numéricos tabelados na norma ASTM E837.13a (2013). No entanto, é com base na geometria de furo cego ideal que estão baseados os coeficientes de calibração (ver Fig. (2a)).



Figura 1. Medição de tensão com perfil uniforme abaixo da superfície da amostra (Schajer, 2013).

Alguns estudos apresentados na literatura recentemente evidenciam que a geometria do furo é diferente do previsto (Scafidi *et al.*, 2009; Scafidi *et al.*, 2011 e Blödorn *et al.*, 2017), o que em primeira análise já indica a necessidade de alguma adequação aos coeficientes de calibração apresentados na norma.

A norma ASTM E837.13a (2013) apresenta tabelas de coeficientes de calibração para diferentes diâmetros de furo. Deste modo, é aceitável admitir que haja uma relação entre o volume de material removido, ou seja, o volume do furo cego, com o valor do coeficiente. Além disso, as deformações medidas na superfície ocorrem como consequência ao rearranjo do material em função ao alívio de tensão provocado pela presença do furo cego neste. Por fim, conclui-se que uma geometria de furo cego diferente da prevista pela norma, por menor que seja, influencia na obtenção de diferentes valores de deformação na sua borda.

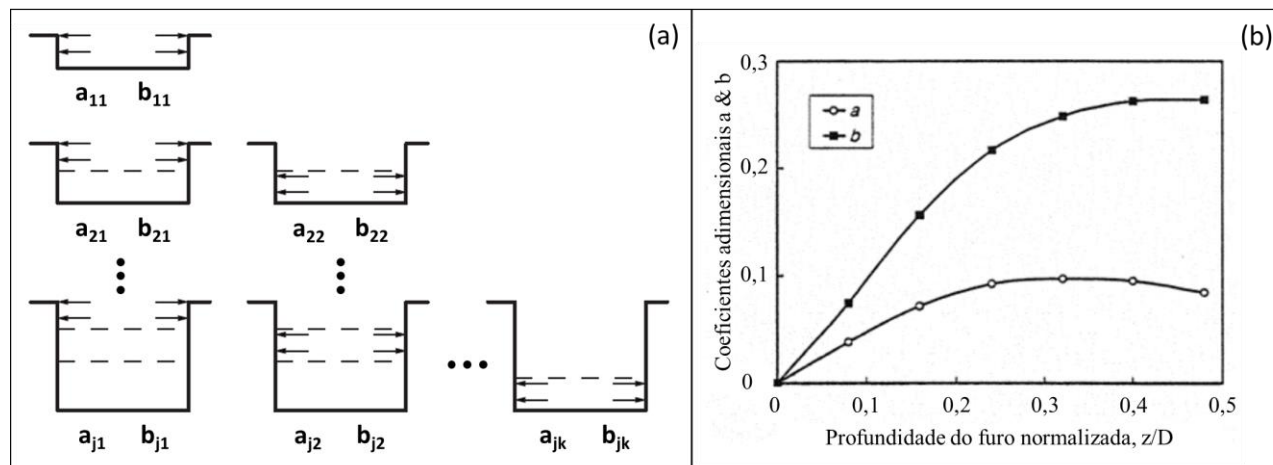


Figura 2. Coeficientes de calibração: (a) Matriz de coeficientes $\bar{a}$ e $\bar{b}$ para tensão não-uniforme (ASTM E837.13a, 2013) e (b) Coeficientes de calibração para profundidade do furo normalizada, onde 'z' representa a profundidade e 'D' o diâmetro do furo cego (Kim *et al.*, 2011).

2. O MODELO NUMÉRICO

Visando seguir o método descrito pela norma ASTM E837.13a (2013), simulações por meio do Método dos Elementos Finitos (FEM) são propostas utilizando o *software* comercial ANSYS©. As análises das simulações resultarão na obtenção de novos coeficientes de calibração mais adequados ao MFC. Principalmente por se tratar de uma simulação realizada com métodos computacionais mais robustos.

O modelo consiste basicamente em uma barra de dimensões: 30mm de comprimento, 30mm de largura e 10mm de espessura, com um furo cego inserido em seu centro. Devido à simetria do problema, foi considerada apenas um quarto da geometria inicial nas simulações.

Em uma Primeira Etapa a geometria do furo cego é a de um cilindro perfeito, como previsto pela norma ASTM E837.13a (2013). Essa primeira rodada de simulações permite conferir a validade do modelo numérico, avaliando o resultado obtido com os coeficientes tabelados pela referida norma. Após a modelagem geométrica, feita no próprio módulo *Mechanical APDL*® do ANSYS®, e a geração da malha, chegou-se a um modelo com aproximadamente 440 000 nós, distribuídos em 321 000 elementos. Vale destacar que o elemento utilizado foi o SOLID186, um elemento de 20 nós disponível na biblioteca do *software* utilizado. Esse elemento permite a modelagem por meio de elementos tetraédricos que se adequam a qualquer geometria. O tamanho médio das arestas dos elementos foi definido como 0,5mm nas proximidades do furo e 1,5mm nas regiões bem afastadas. Na Figura (3) pode-se ver uma vista em detalhe do furo cilíndrico modelado e na Fig. (4) uma vista isométrica identificando as regiões onde a malha é refinada.

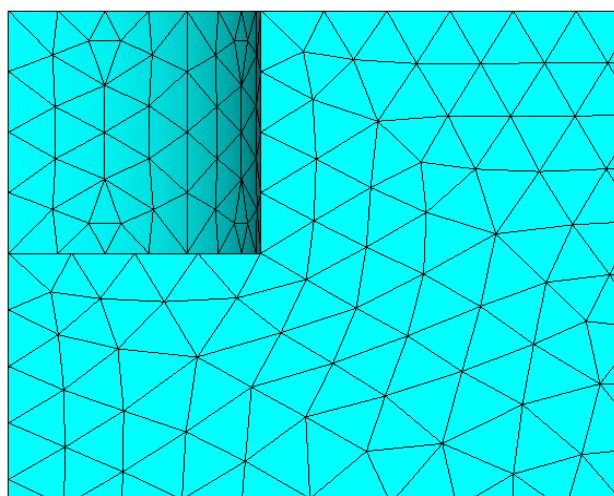


Figura 3. Furo cego cilíndrico modelado no ANSYS® para determinação dos coeficientes de calibração.

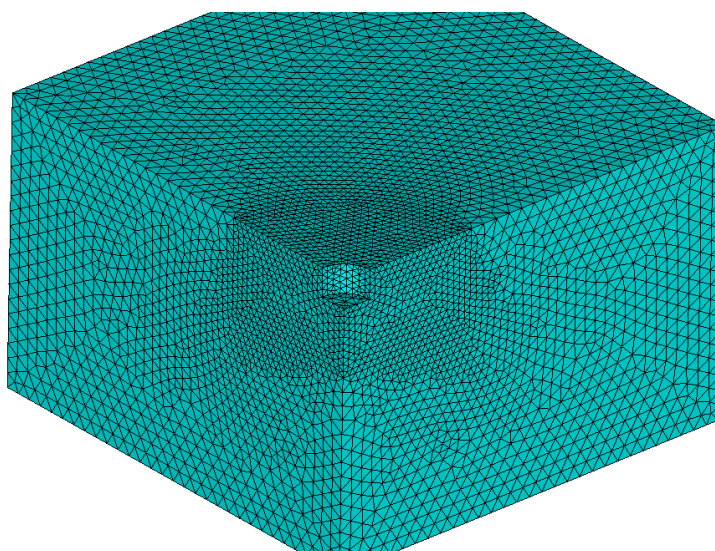


Figura 4. Vista isométrica do modelo para estudo do caso do furo cego cilíndrico modelado no ANSYS® para determinação dos coeficientes de calibração.

Na Segunda Etapa, a geometria do furo cego é a de um cilindro, entretanto, com um chanfro no fundo do furo (ver Fig. (5)). Como descrito em Blödorn *et al.* (2015) e Blödorn *et al.* (2017), a ferramenta de corte empregada para a usinagem do furo cego é uma fresa de topo de uso odontológico, que apresenta um chanfro na extremidade de cada um dos seus seis gumes, ou seja, na quina. Essa particularidade da ferramenta de corte induz à produção de um furo cego com um pequeno chanfro no fundo e, diferentemente do esperado, opõe-se à geometria de furo cego requerida pelos coeficientes de calibração tabelados.

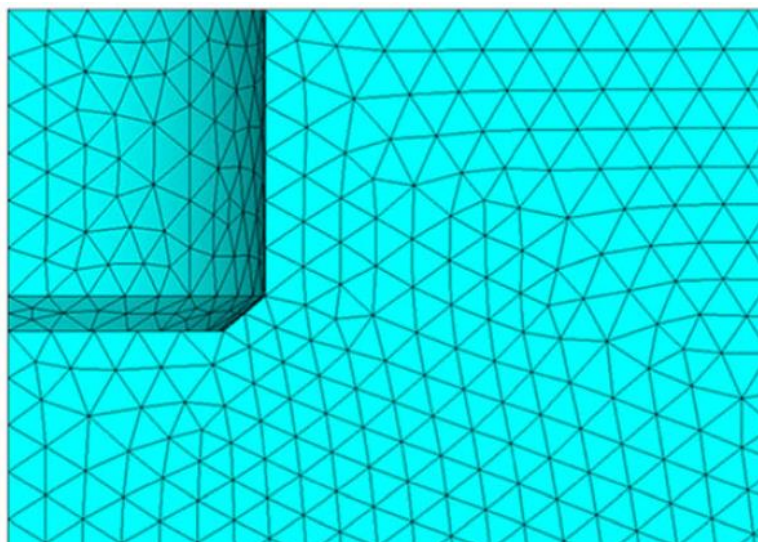


Figura 5. Furo cego com chanfro no fundo modelado no ANSYS© para determinação dos coeficientes de calibração.

Para a determinação dos coeficientes de calibração, deve-se partir de um estado de tensões conhecido. Após uma análise breve do equacionamento apresentado na norma para o cálculo de tensões uniformes chega-se a dois estados de carregamento que permitem calcular os coeficientes $\tilde{a}$ e $\tilde{b}$. Esses estados estão representados na Fig. (6). O primeiro deles, chamado na literatura de equiaxial (onde $\sigma_x = \sigma_y$), permite o cálculo do coeficiente $\tilde{a}$. O segundo, conhecido como puro cisalhamento (onde $\sigma_x = -\sigma_y$), devido ao estado de tensões que surge no plano a 45° dos eixos de aplicação das forças, permite a avaliação numérica do coeficiente $\tilde{b}$. É importante notar que as forças aplicadas nas direções indicadas devem ser iguais em módulo.

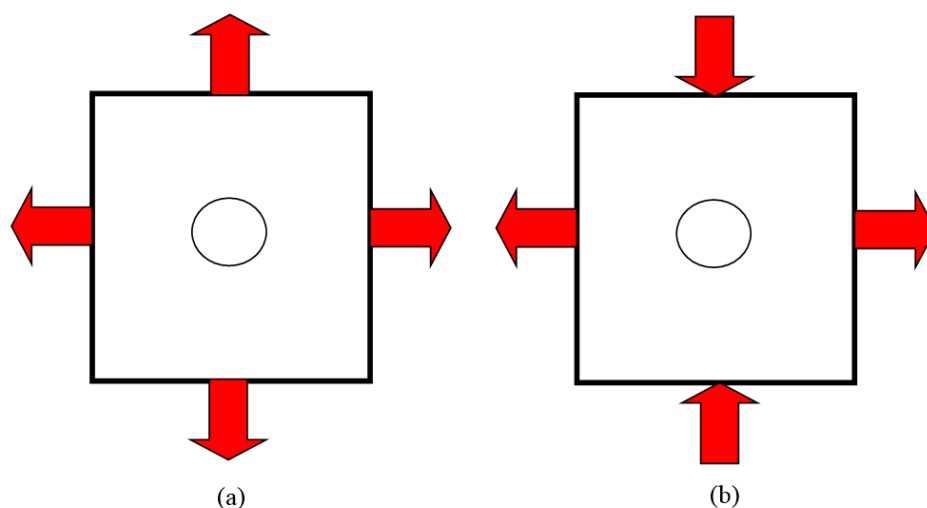


Figura 6. Carregamentos que permitem o cálculo dos coeficientes: (a) Equiaxial e (b) Puro cisalhamento.

O carregamento deve ser aplicado na borda do furo, dentro do furo e perpendicular à parede. É nessa condição que se pode simular exatamente o efeito percebido por um extensômetro hipotético localizado na superfície adjacente à borda do furo (como mostrado na Fig. (1)). Porém, a aplicação do carregamento na parede do furo torna-se uma tarefa complexa no caso do furo chanfrado, devido à presença do plano inclinado. Para contornar esse inconveniente pode-se fazer o uso do princípio da superposição, devido à linearidade do problema, da forma como foi proposto por Schajer (1981). Para tal, subtrai-se o estado de tensão obtido de uma placa sem furo do estado de tensão de uma placa com o furo, ambos com carregamento na extremidade externa do modelo, obtendo assim o estado de tensão desejado, como ilustrado na Fig. (7).



Figura 7. Representação gráfica do princípio da superposição aplicado ao sistema.

Esse mesmo procedimento será utilizado para a determinação dos coeficientes de calibração para o furo cego cilíndrico e para o furo cego com fundo chanfrado.

3. RESULTADOS

Os resultados das simulações podem ser visualizados na Tab. (2) e, na forma de gráfico, na Fig. (8). Os coeficientes de calibração que se encontram na norma ASTM E837.13a (2013) são normalizados para determinadas relações de diâmetro do furo cego e diâmetro da roseta extensométrica utilizada na medição das deformações. Para a determinação dos coeficientes de calibração que serão usados nessa comparação, deve-se multiplicar o valor tabelado pelo quadrado do quociente entre o diâmetro do furo cego usinado pelo diâmetro mínimo do furo cego para a roseta do tipo A, o qual consta na norma. Deste modo, pode-se perceber que qualquer desvio, por exemplo, no diâmetro do furo cego usinado irá gerar inconsistência no coeficiente determinado pela operação descrita anteriormente. Assim, determinar o coeficiente correspondente à geometria do furo cego em utilização é, sem dúvida, a opção mais acertada.

Tabela 2. Comparativo dos Coeficientes de Calibração tabelados versus novos Coeficientes de Calibração para um furo cego cilíndrico com diâmetro Ø 1,60mm.

Profundidade [mm]	Coeficientes tabelados ASTM E837-13a (2013)		Novos coeficientes simulados para furo cego cilíndrico		Diferença percentual	
	$\bar{a}$	$\bar{b}$	$\bar{a}$	$\bar{b}$	$\bar{a}$	$\bar{b}$
0,10	0,00886	0,01773	0,00953	0,01707	+7,56	-3,73
0,20	0,02105	0,04100	0,02233	0,03963	+6,08	-3,33
0,30	0,03546	0,06870	0,03648	0,06525	+2,89	-5,02
0,40	0,04986	0,09751	0,05064	0,09197	+1,57	-5,68
0,50	0,06316	0,12742	0,06390	0,11825	+1,18	-7,20
0,60	0,07535	0,15512	0,07572	0,14300	+0,49	-7,82
0,70	0,08643	0,18172	0,08584	0,16556	-0,68	-8,89
0,80	0,09086	0,20499	0,09424	0,18563	+3,72	-9,44
0,90	0,10305	0,22604	0,10100	0,20313	-1,99	-10,1
1,00	0,10859	0,24488	0,10629	0,21816	-2,11	-10,9

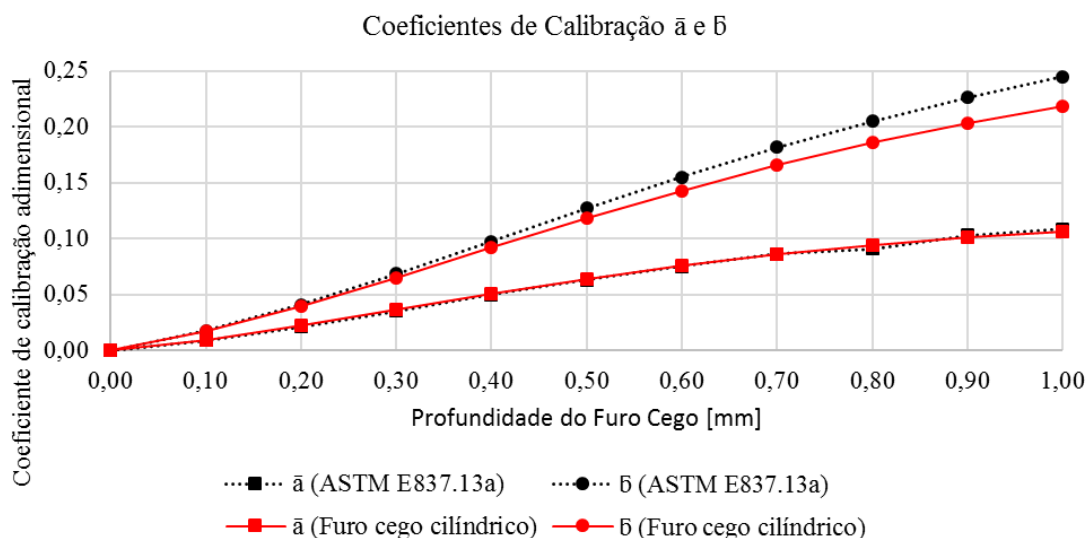


Figura 8. Comparativo dos Coeficientes de Calibração tabelados versus Coeficientes de Calibração recalculados para um furo cego cilíndrico com diâmetro Ø 1,60mm.

Nota-se a partir da análise da Tab. (2) que os coeficientes recalculados apresentam pequenas discrepâncias dos tabelados na norma. Uma hipótese inicial para justificar tal diferença é a aproximação feita quando se calculam os coeficientes através da norma, como já comentado anteriormente, pelo produto do quadrado do quociente dos diâmetros desejados pelo tabelado mais próximo. Complementarmente a isso vale destacar que os coeficientes da norma são os mesmos desde a década de 1980, ou seja, foram calculados há bastante tempo. Considerando-se que atualmente os avanços científicos tanto na área dos elementos finitos como computacionais permitem a obtenção de resultados bem mais precisos em termos de modelos numéricos.

Outro resultado que merece ser destacado é a maior diferença obtida para o coeficiente $\bar{b}$ em relação ao tabelado pela norma. Pode-se justificar isso pela maior distância da linearidade da variação desse coeficiente com relação ao quociente do quadrado dos diâmetros, devido a sua maior complexidade (estado de puro cisalhamento) quando comparado ao modelo requerido para o cálculo do coeficiente $\bar{a}$ (estado equiaxial).

Com relação aos coeficientes calculados com o modelo de furo real, ou seja, com chanfro no fundo, nota-se a partir da Tab. (3) e Fig. (9) que os valores encontrados são inferiores aos propostos para o furo ideal do modelo adotado pela norma. Após uma rápida análise no equacionamento para o cálculo de tensões residuais pelo Método do Furo Cego, verifica-se que a derivada da tensão pelos coeficientes é negativa, isto é, quanto menor o coeficiente, maior a tensão calculada. Considerando-se que há menos material removido, uma tensão menor seria medida, logo o coeficiente tem que diminuir para compensar essa diminuição na deformação medida. Essa diferença se deve a dois fatores principais: a diferença de material removido, uma vez que a presença do chanfro implica em menos material removido, logo menos tensões aliviadas e; ao diferente fator de concentração de tensões que surge devido às bordas do furo, mais suaves no caso do furo chanfrado.

Tabela 3. Comparativo dos Coeficientes de Calibração tabelados versus novos Coeficientes de Calibração para um furo cego com chanfro no fundo com diâmetro Ø 1,60mm.

Profundidade [mm]	Coeficientes tabelados ASTM E837-13a (2013)		Novos coeficientes simulados para furo cego com chanfro no fundo		Diferença percentual	
	$\bar{a}$	$\bar{b}$	$\bar{a}$	$\bar{b}$	$\bar{a}$	$\bar{b}$
0,10	0,00886	0,01773	0,00598	0,01303	-32,5	-26,5
0,20	0,02105	0,04100	0,01727	0,03363	-18,0	-18,0
0,30	0,03546	0,06870	0,03011	0,05758	-15,1	-16,2
0,40	0,04986	0,09751	0,04346	0,08366	-12,9	-14,2
0,50	0,06316	0,12742	0,05643	0,11039	-10,6	-13,4
0,60	0,07535	0,15512	0,06843	0,13647	-9,18	-12,0
0,70	0,08643	0,18172	0,07910	0,16113	-8,47	-11,3
0,80	0,09086	0,20499	0,08829	0,18371	-2,83	-10,4
0,90	0,10305	0,22604	0,09596	0,20395	-6,88	-9,77
1,00	0,10859	0,24488	0,10218	0,22178	-5,90	-9,43

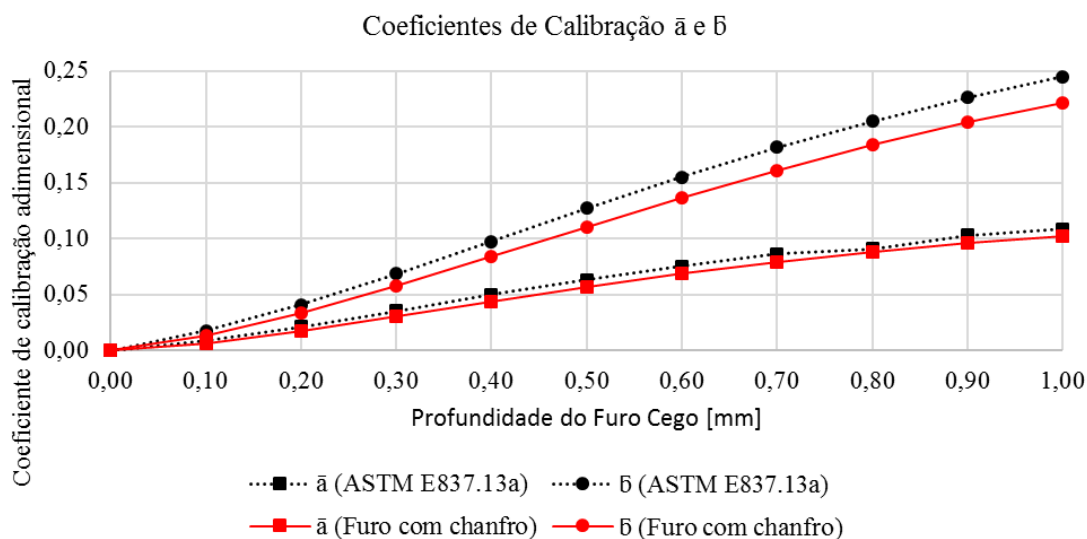


Figura 9. Comparativo dos Coeficientes de Calibração tabelados versus Coeficientes de Calibração recalculados para um furo cego com chanfro no fundo com diâmetro Ø1,60mm.

A Figura (10) ilustra um comparativo entre os coeficientes de calibração recalculados neste trabalho para o furo cego cilíndrico e para o furo cego com chanfro no fundo, ambos para um diâmetro de furo de Ø1,60mm. Se forem observados os valores dos coeficientes recalculados apresentados na Tab. (2) e Tab. (3), nota-se que para os primeiros quatro incrementos permanece uma diferença expressiva entre eles. Mas essa diferença se deve ao fato da presença do chanfro no furo, que muda completamente sua geometria nestes incrementos iniciais (Blödmann *et al.*, 2017). Do quinto ao décimo incremento a diferença cai consideravelmente, uma consequência da diminuição da sensibilidade, uma vez que as deformações sofridas na superfície são menores quando se aumenta a profundidade do furo, além de que a influência da concentração de tensões torna-se menos significativa, o que também contribui para essa diminuição na diferença entre os coeficientes. Nota-se também que o último coeficiente é maior para o caso do furo chanfrado, o que aparentemente contradiz o anteriormente discutido nesse trabalho. Porém deve-se considerar que há dois fatores agindo na mudança desse coeficiente, a menor quantidade de material removido, tendendo a diminuir o coeficiente e a diferente concentração de tensões, tendendo a aumentar o coeficiente. Para o último coeficiente, a ação da diferença na concentração de tensões se torna mais significativa que a diferença de material removido, aumentando o coeficiente em relação ao do furo ideal.

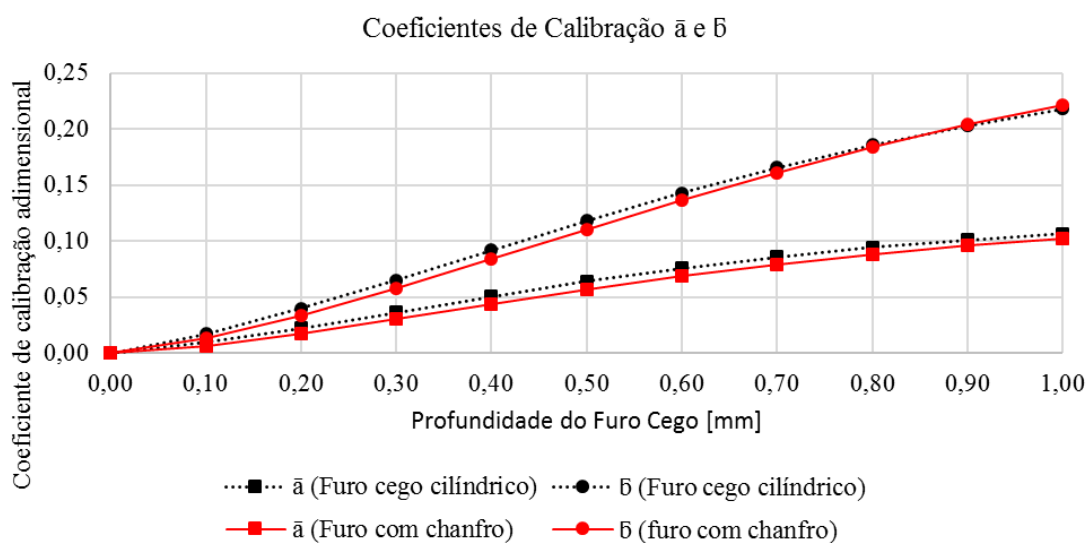


Figura 10. Comparativo dos Coeficientes de Calibração recalculados para um furo cego cilíndrico e furo cego com fundo chanfrado com diâmetro Ø 1,60mm.

4. CONCLUSÕES

Esse trabalho comprovou a necessidade de uma nova abordagem para a operação do MFC utilizando de diâmetros não tabelados pela norma ASTM E837-13a (2013), indicando que a aproximação pelo produto dos coeficientes tabelados com o quadrado do quociente dos diâmetros tabelados e desejados pode resultar em uma diferença superior a 10% para o coeficiente $\bar{b}$.

Além disso, uma abordagem para o caso do furo chanfrado foi apresentada, indicando que para cada geometria de furo cego coeficientes de calibração mais apropriados deveriam ser determinados. No estudo apresentado, um furo cego com fundo chanfrado, foi observado que a diferença entre o volume de material que reside no fundo do furo influencia fortemente no valor numérico dos coeficientes comparado aos tabelados, para um furo cego cilíndrico – sem chanfro – e, conseqüentemente, implicará em distorções nos valores de tensão medidos.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) por ter disponibilizado sua infraestrutura; ao CNPq pela concessão de bolsa de Iniciação Científica e Tecnológica (CNPq/PIBIC) e ao PRFH-034/Petrobras pelos recursos financeiros para compra de materiais e concessão de bolsa de doutorado.

6. REFERÊNCIAS

ASTM INTERNATIONAL, 2013, ASTM E837 – 13a – Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method. West Conshohocken, 16 p.

- Blödorn, R., Viotti, M.R., Schroeter, R.B. and Albertazzi Jr., A.G., 2015, "Analysis of Blind-Holes Applied in the Hole-Drilling Method for Residual Stress Measurements", *Experimental Mechanics*, Vol. 55, No. 9, pp. 1745–1756.
- Blödorn, R., Bonomo, L.A., Viotti, M.R., Schroeter, R.B. and Albertazzi Jr., A.G., 2017, "Calibration Coefficients Determination Through FEM Simulations for the Hole-Drilling Method Considering the Real Hole Geometry", *Experimental Technics*, Vol. 41, No. 1, pp. 37-44.
- Kim, C., Yang, W-H., Heo, S.P., 2001, "Influence of Inclined Holes in Measurement of Residual Stress by the Hole Drilling Method", *KSME International Journal*, Vol. 15, No. 12, pp. 1647-1654.
- Lu, J., 1996, "Handbook of Measurement of Residual Stresses", Fairmont Press, Lilburn, USA, 238 p.
- Scafidi, M., Valentini, E. and Zuccarello, B., 2009, "Effect of the Hole-bottom fillet radius on the residual stress analysis by the Hole Drilling Method", *The 8th International Conference on Residual Stress (ICRS-8)*, pp. 264-270.
- Scafidi, M., Valentini, E. and Zuccarello, B., 2011, "Error and Uncertainty Analysis of the Residual Stresses Computed by Using the Hole Drilling Method", *Strain*, Vol. 47, No. 4, pp. 301-312.
- Schajer, G.S. "Application of finite element calculations to residual stress measurements." *Journal of engineering materials and technology* 103.2 (1981): 157-163.
- Schajer, G.S., 2013, "Practical Residual Stress Measurement Methods", 1. Ed., John Wiley&Sons Ltd, United Kingdom, 328 p.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

CONTRIBUTIONS TO CALIBRATION COEFFICIENTS EVALUATION VIA FINITE ELEMENT ANALYSIS IN RESIDUAL STRESS MEASUREMENT BY THE HOLE DRILLING METHOD

Rodrigo Blödorn, rodrigo.blodorn@labmetro.ufsc.br^{1,2}
Lucas Araujo Bonomo, abonomo.lucas@gmail.com²
Matias Roberto Viotti, matias.viotti@labmetro.ufsc.br²
Rolf Bertrand Schroeter, rolf.schroeter@ufsc.br¹
Armando Albertazzi Gonçalves Jr., a.albertazzi@ufsc.br²

¹LMP, Precision Engineering Laboratory

²LABMETRO, Metrology and Automatization Laboratory

Federal University of Santa Catarina, Florianópolis/SC, Brasil Zip code 88040-970 PO Box: 5053

Abstract: Residual stress measurements via Hole Drilling Method (HDM) are ruled by ASTM E837.13a standard, comprising a wide range of hole diameters and inspection depths. To evaluate the measured stress distribution, calibration coefficients are applied according to the hole diameter and strain gauge rosette type used to measure strains, which are a consequence of stress relief. These constants can be determined experimentally or numerically. The standard considers a blind hole with a flat bottom orthogonal to the measured surface. However, the cutting tools commonly employed on the HDM are dental end mills, which usually have corner chamfers. Consequently, chamfers or fillets are directly transferred to the blind hole bottom which, in turn, are not taken into account by the standardized calibration coefficients. Numerical analyses by Finite Element Modeling were performed using ANSYS®. Considerable variations were observed when comparing the calibration coefficients obtained for cylindrical blind hole and for blind holes with chamfered bottom.

Keywords: Residual stresses, Hole Drilling Method, Calibration Coefficients, Finite Element Analysis.