

ESTUDO DE APLICABILIDADE DA TÉCNICA ESPI (ELECTRONIC SPECKLE PATTERN INTERFEROMETRY) COMBINADA COM O MÉTODO DO FURO-CEGO PARA MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS EM JUNTAS SOLDADAS

Olga Liskevych, olga.liskevych@ufes.br¹

Elton Mesquita de Almeida, eltonmesquitaalmeida@gmail.com³

Gabriel Fracalossi Feijó, gabriel.feijo@edu.ufes.br^{1,2}

Marcelo Camargo Severo de Macêdo, marcelo.macedo@ufes.br^{1,2}

¹Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharia Mecânica/Centro Tecnológico, Vitória - ES, Brasil

²Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) - UFES, Vitória - ES, Brasil

³LABENDEM, Centro de Pesquisa, Inovação e Desenvolvimento - CPID, Cariacica - ES, Brasil

Resumo: A avaliação de tensões residuais em juntas soldadas conta com uma variedade de métodos experimentais não destrutivos e semi-destrutivos, cada um com sua performance, custo, complexidade, precisão e exatidão de resultados obtidos. Entre eles, destaca-se uma técnica óptica de interferometria (ESPI - Electronic Speckle Pattern Interferometry) combinada com o método do furo-cego, que já vem demonstrando resultados consistentes para medição de tensões em diversos materiais nas condições de acabamento liso e de relativa planicidade. O objetivo desse estudo foi avaliar a aplicabilidade da referida técnica nas juntas soldadas, levando em consideração as condições alteradas dos cordões de solda em relação ao metal base original, tais como convexidade de reforço, irregularidade superficial, alteração de propriedades mecânicas e distribuição específica das tensões residuais nos cordões de solda. Para esta análise, primeiramente, o equipamento usado no estudo foi calibrado com medidas a partir de aplicação de carga conhecida em amostras planas e, em seguida, os testes foram realizados nas juntas soldadas com material de adição e sem material de adição. Os resultados demonstraram uma boa exatidão, precisão e sensibilidade de medições das tensões nas superfícies lisas, apresentando erro médio de 5,8% e o coeficiente de variação médio de 6%. Já nos cordões de solda a precisão foi alterada para os valores baixos das tensões medidas, mas ainda demonstrando coeficiente de variação aceitável (menor que 15%) para pior condição de medição (na junta soldada com material de adição). A incerteza relatada para as medições realizadas no cordão de solda com deposição de material foi maior em comparação com o cordão de solda produzido sem material de adição. De uma maneira geral, com certos cuidados (por exemplo, em relação a profundidade de medição), a técnica óptica de interferometria (ESPI - Electronic Speckle Pattern Interferometry) combinada com o método do furo-cego pode ser aplicada em juntas soldadas com alta confiabilidade de resultados.

Palavras-chave: tensões residuais, soldagem, técnica ESPI, técnica furo-cego

1. INTRODUÇÃO

A medição das tensões residuais (TR) em juntas soldadas ainda é um grande desafio tanto na área de controle de qualidade na soldagem, quanto na área de ensaios não destrutivos. Embora a sua relevância já foi relatada diversas vezes para tais fatores, como estabilidade dimensional e deformações dos componentes soldados (Cabral et al., 2013), sua resistência à fadiga (Kudryavtsev & Kleiman, 2017) e a fissuração a quente (Hagenlocher et al., 2020), as principais normas na engenharia de soldagem (por exemplo, AWS, 2010 e ASME, Seção IX, 1999) não obrigam os usuários a avaliar as TR para qualificação e implementação de procedimentos de soldagem.

Por outro lado, a medição de TR conta com uma variedade de métodos experimentais não destrutivos e semi-destrutivos, cada um com sua performance, custo, complexidade, precisão e acurácia dos resultados obtidos. Guo e colaboradores (2021) na sua revisão abrangente e detalhada de avanços recentes em métodos que avaliam as TR distinguem as técnicas para medição destinadas as camadas internas e as camadas superficiais dos materiais estudados. Entre esses últimos, o método de furo-cego (*hole drilling method*) se destaca por sua praticidade, acurácia (erro máximo relatado por autores é de 10%) e até normalização (ASTM, 2008). Basicamente, a técnica consiste em usinar um pequeno furo na superfície do componente a ser analisado provocando um alívio das tensões existentes que atuam no volume de

material removido. Esse alívio de tensões resultará em uma mudança nos estados de deformação em pontos da região no entorno do furo, que podem ser registrados, por exemplo, por extensômetros. Por fim, estas deformações são relacionadas através dos modelos matemáticos às TR existentes no material antes da usinagem.

Segundo a análise dos autores (Guo et al., 2021), há uma série de fatores que contribuem para o erro das medições nesse método, entre eles, profundidade do furo e sua possível excentricidade, sensibilidade e aderência do extensômetro utilizado. Com intuito de reduzir e até eliminar a influência desses parâmetros operacionais, foram desenvolvidas técnicas de medição sem contato, por exemplo, uma técnica óptica de interferometria ESPI (*Electronic Speckle Pattern Interferometry*). Esta técnica é baseada na aquisição das imagens dos padrões de franjas (*speckles*) produzidas devido às deformações causadas por alívio de tensões durante a furação do material estudado. Posteriormente, estas imagens são processadas numericamente, por exemplo, como demonstrado por Schajer & Steinzig (2005), com objetivo de correlacionar os deslocamentos/deformações resultantes com o estado de tensão original. A referida técnica já foi usada para medição de TR nas superfícies planas e não soldadas (Upshaw et al., 2011; Steinzig et al., 2014; Rahimi & Violatos 2022), demonstrando uma boa acurácia das medições. Por exemplo, Steinzig e Takahashi (2003) estudando a técnica ESPI combinada com o método do furo-cego para medição de TR em diferentes materiais, relataram o erro de medição de 3,5 % para amostras de alumínio e 5% para amostras de aço.

Para atingir os resultados de alta confiabilidade, alguns cuidados devem ser tomados na hora de realização de ensaios no que se refere ao acabamento da superfície (por exemplo, a reflexividade não pode ser muito alta), estabilização do laser usado para produzir o padrão de interferência e parâmetros de furação. Em relação a estes últimos, o estudo realizado por Barile e colaboradores (2014) em uma liga de titânio indica que a precisão das medições é afetada pela velocidade de rotação da ferramenta de furação, sendo reduzida de forma diretamente proporcional com a redução da velocidade de rotação. Os autores explicam esse fenômeno pela redução de qualidade do furo com forma irregular e rebarbas presentes para rotações menores (por volta de 5000 rpm) e relatam uma melhor repetitividade dos resultados com velocidades de rotação da broca acima de 50000 rpm. As conclusões semelhantes foram relatadas por Upshaw et al. (2011) para ligas de alumínio.

Outros parâmetros de furação que podem contribuir para pior acurácia das medições são o diâmetro do furo e a sua profundidade. De acordo com a capacidade de iluminação, resolução da câmera e magnitudes de deslocamento, os diâmetros de furação que apresentam melhores qualidades de medição são na faixa 0,5 mm a 3 mm (Stresstech Oy, 2016). Para diâmetros abaixo de 0,5 mm a câmera usada no sistema de medição para registro das imagens alcança o seu limite de ampliação, logo, o sinal de medição diminui rapidamente com o diâmetro do furo. Contudo, os furos com dimensões acima de 3 mm são menos iluminados, portanto erros relacionados a iluminação da amostra são mais acentuados para furos maiores. Além disso, furos menores são mais fáceis de se gerar com melhor qualidade de imagem. No que tange a profundidade do furo, o sinal referente a superfície é inversamente proporcional a este parâmetro de usinagem, sendo assim indicado um limite de profundidade de 0,6 para a razão entre a profundidade máxima e o diâmetro (Stresstech Oy, 2016).

Como pode ser visto, a aplicação da técnica ESPI em conjunto com o método do furo-sego tem sido bastante estudada para medição de TR em diversos materiais nas condições de acabamento liso e de relativa planicidade. Entretanto, as características típicas dos cordões de solda produzidos principalmente por fusão e com adição de material, tais como convexidade de reforço, irregularidade superficial, alteração de propriedades mecânicas do material submetido a operação de soldagem e distribuição específica das tensões residuais para juntas soldadas podem causar consequências para a precisão e acurácia dos resultados de medição, que muitas vezes são essenciais para segurança e vida útil das estruturas soldadas.

Como os relatos de utilização da referida técnica nessas condições não foram encontrados na literatura, o objetivo desse trabalho é avaliar a aplicabilidade da técnica ESPI em conjunto com o método do furo-cego nas juntas soldadas, levando em consideração as condições alteradas dos cordões de solda em relação ao metal base original. Com a tal análise, espera-se contribuir para otimização dos parâmetros de ensaios dependendo das condições de cordões de solda e, consequentemente, melhorar a precisão e exatidão dos resultados de medição de TR utilizando a referida técnica.

2. METODOLOGIA

O presente estudo foi dividido em duas etapas: inicialmente, uma calibração do equipamento foi realizada com objetivo de verificar a exatidão e precisão das medições, assim como a sensibilidade da resposta fornecida por sistema de medição usado para aplicação da técnica ESPI em conjunto com o método do furo-sego. A exatidão, representando um grau de concordância entre o valor medido das tensões e o valor de referência (VIM, 2012), foi avaliada por um erro de medição. Como o valor de referência foi usada a tensão induzida ao corpo de prova por dispositivo de calibração. A precisão foi avaliada pela repetitividade dos resultados de medições realizadas sob as mesmas condições e expressa via coeficiente de variação, calculado através da relação entre o desvio padrão e a média das medições. E sensibilidade, por sua vez, foi definida como quociente entre a variação de uma indicação do equipamento e a variação correspondente do valor da grandeza medida (VIM, 2012). Para isso, variou-se a tensão induzida através do dispositivo para calibração variando o deslocamento do centro da barra flexionada em 1 mm e verificou-se a variação das tensões residuais medidas por equipamento.

A segunda etapa resumiu-se na medição das TR nas juntas soldadas produzidas com e sem material de adição. Devido a inviabilidade de determinar o erro de medição (por causa de ausência de padrão de junta soldada) e, consequentemente, analisar a influência da união via soldagem na acurácia do método de medição estudado, a avaliação foi feita através da precisão (através do coeficiente de variação) e incerteza de medição para cada cordão de solda separadamente.

2.1. Descrição da técnica ESPI combinada com furo-cego

Para medição das TR foi utilizada uma técnica ESPI (Eletronic Speckle Pattern Interferometry) combinada com método do furo-cego, cujo princípio de funcionamento encontra-se descrito detalhadamente nos trabalhos de Steinzig & Takahashi (2003) e Ponslet & Steinzig (2003). O equipamento utilizado para esse fim está situado no Laboratório de Ensaios não Destrutivos Multidisciplinar do Centro de Pesquisa, Inovação e Desenvolvimento do Estado do Espírito Santo (LABENDEM/CPID). A Figura 1 representa os seus componentes: um laser, câmera, furadeira e suporte para fixação do corpo de prova.

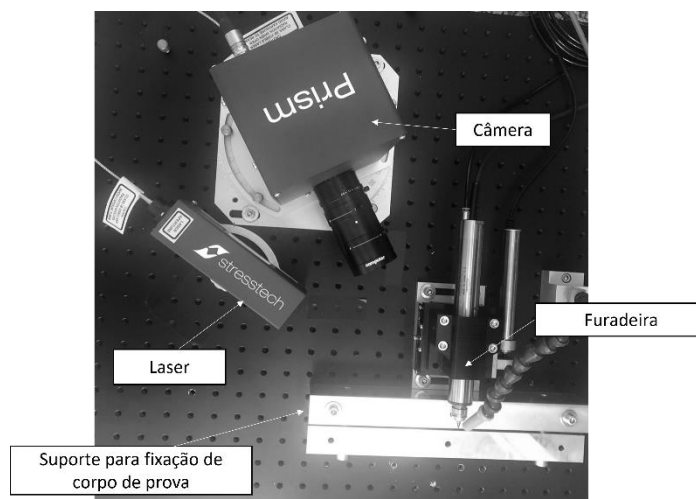


Figura 1. Equipamento para medição de tensão residual (combinação de técnicas ESPI e furo-cego).

Durante os ensaios tanto de calibração, quanto de medição de TR em juntas soldadas, um furo com 0,8 mm de diâmetro e 0,4 mm de profundidade foi aberto na superfície do material por meio da furadeira utilizando a velocidade de rotação da ferramenta de 25000 rpm. Esses parâmetros são recomendados na literatura (Barile, C. et al., 2014; Stresstech Oy, 2016) para atingir uma boa qualidade de furos.

O equipamento utilizado conta com um feixe de luz (laser) com todas as propriedades conhecidas. Este feixe é dividido em dois, sendo que o primeiro é lançado no corpo de prova e refletido para a câmera. Já o segundo, de referência, passa por um sistema de mudança de fase piezoelétrico e posteriormente é direcionado para o mesmo sistema óptico. Quando a amostra sofre o alívio de tensão através do furo, o feixe de luz refletido pelo corpo de prova sofre uma ligeira alteração, enquanto o feixe de referência permanece intacto. Isso causa uma mudança de fase do feixe refletido, registrando um novo padrão de granulado (pixels). Da diferença de padrões de granulado (pixels), antes e depois da furação, ou seja, antes e depois do alívio de tensão, obtém-se um padrão de franjas, conhecidas como franjas de correlação (*speckles*), como pode ser visto na Fig. 2. Através do algoritmo do sistema e por meio das franjas de correlação consegue-se obter os mapas de fase, a partir do qual determina-se o deslocamento da superfície da amostra e dessa forma determinando a tensão presente no material antes da furação.

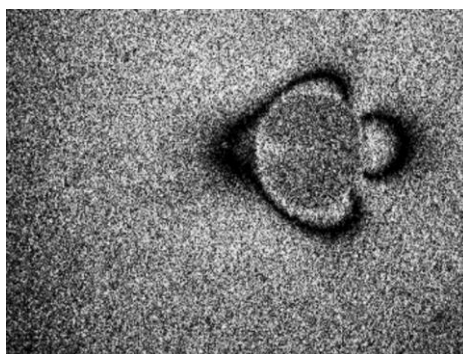


Figura 2. Franjas (*speckles*) provocadas por alívio de tensões durante a usinagem do furo, que são registrados e processados como interferogramas digitais.

A cada incremento de furação, que para os fins deste estudo foi de 0,05 mm para profundidade total do furo de 0,4 mm, as imagens foram capturadas (um exemplo é dado pela Fig. 3) com mudanças de padrão de interferometria devido a alteração de estado de tensões no material usinado. Posteriormente, essas imagens foram processadas por algoritmo do software do equipamento que fornece como resposta os valores de tensão longitudinal (σ_x), transversal (σ_y) e de cisalhamento (τ), conforme ilustrado na Fig. 4. Para os fins desse estudo, apenas a tensão σ_x foi levada em conta.

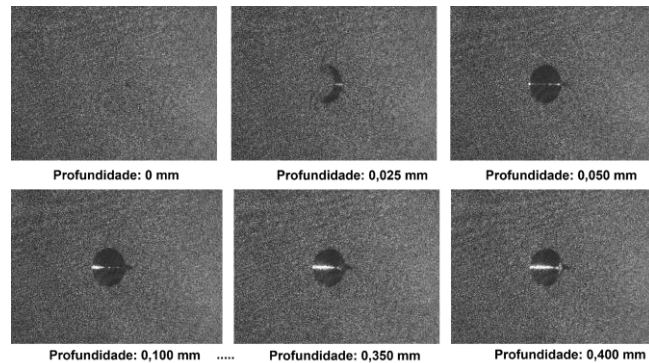


Figura 3. Padrão de imagens a cada incremento de furação processados para obter os valores de tensões presentes no material ensaiado.

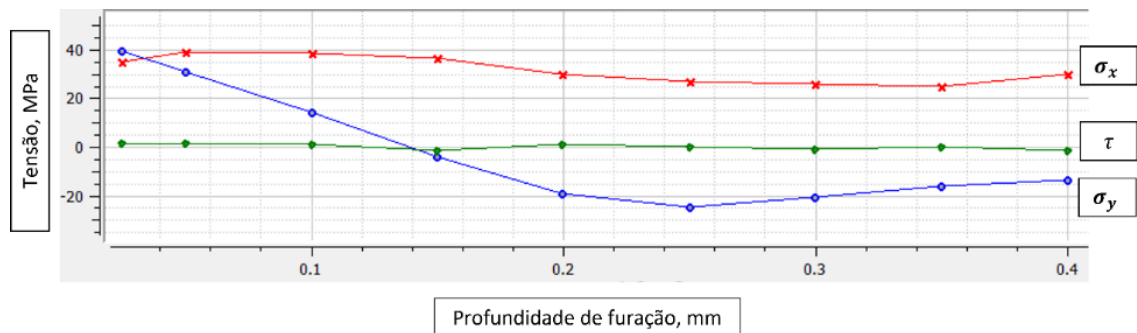


Figura 4. Representação de resultados de medição de TR longitudinais σ_x , transversais σ_y e cisalhantes τ em função de profundidade do furo.

2.2. Calibração do equipamento

Para os fins de calibração, primeiramente na barra padrão com dimensões de $400 \times 25,4 \times 5$ mm foram medidas as tensões na condição como recebido, denominadas como tensões de referência σ_{ref} . Essas tensões foram descontadas posteriormente com objetivo de eliminar a interferência das tensões provenientes dos processos de fabricação e tratamentos anteriores nos resultados de calibração.

Em seguida, um dispositivo de flexão a quatro pontos ilustrado na Fig. 5 foi usado para induzir uma tensão empurrando dois roletes internos 1 e 2 contra dois roletes externos 3 e 4. A deflexão da barra padrão resultante foi medida na sua parte central com auxílio de relógio comparador com resolução de 0,01 mm e capacidade de 0 a 10 mm. Dessa maneira, foi possível calcular a tensão elástica máxima σ_{max} na superfície do material flexionado segundo a Eq. (1).

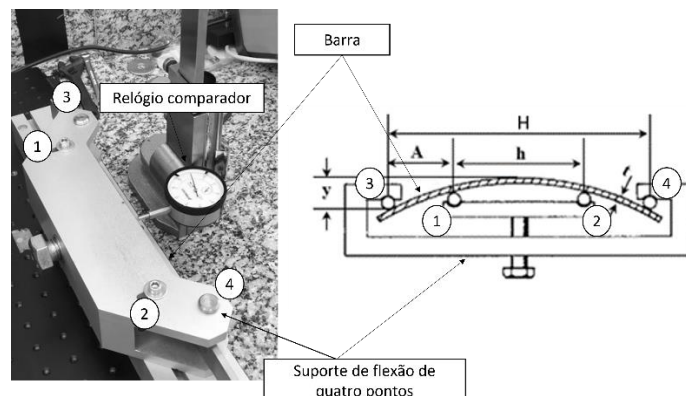


Figura 5. Montagem de dispositivo de flexão a quatro pontos para calibração.

$$\sigma_{max} = \frac{12Ety}{3H^2 - 4A^2} \quad (1)$$

onde σ_{max} é a tensão máxima resultante da deflexão na superfície do material, E é o módulo de elasticidade de material do corpo de prova, t é a espessura da barra padrão, y é a deflexão máxima medida com o relógio comparador, H e A são as distâncias entre os roletes 3 e 4, e 1 e 3, respectivamente. As deflexões y induzidas a barra foram de 3, 4 e 5 mm e os valores utilizados para as constantes E, t, H, A são indicados na Tab. 1.

Tabela 1. Constantes usadas para cálculo de tensão máxima σ_{max} na superfície da barra padrão sob deflexão.

E (GPa)	t (mm)	H (mm)	A (mm)
207	5	250	62,5

Posteriormente, a tensão máxima σ_{max} calculada pela Eq. 1 foi corrigida em função da profundidade de furação (Δt), segundo a Eq. (2). Esse passo foi feito por motivo da distribuição de tensão induzida não ser igual ao longo da espessura da barra flexionada, e como posteriormente os valores experimentais de tensões foram determinados para cada profundidade de furação, a tensão teórica σ_t também deveria seguir o mesmo padrão. A tensão na barra na condição como recebido também foi descontada para a análise. O erro de medição inerente ao método/equipamento foi determinado como a diferença entre os valores teóricos e experimentais das tensões.

$$\sigma_t = \left(\frac{t}{2} - \Delta t \right) \sigma_{max} \quad (2)$$

2.3. Soldagem de corpos de prova

O corpo de prova sem adição de material foi produzido no Laboratório de Desenvolvimento de Aplicações de Laser e Ótica (DEDALO) da Divisão de Fotônica (EFO) do Instituto de Estudos Avançados (IEAv) por processo de soldagem a laser (LBW) de alumínio AA6013-T4 tendo 200 mm de comprimento, 100 mm de largura e 1,3 mm de espessura. O procedimento foi realizado sem gás de proteção mantendo a potência do laser e a velocidade de soldagem em 200 W e 3 mm/s, respectivamente.

Já o corpo de prova com material de adição foi produzido no Laboratório de Soldagem da Universidade Federal do Espírito Santo por processo GMAW de aço A36 com 5 mm de espessura utilizando um eletrodo ER70S-6 de 1,0 mm de diâmetro e o gás de proteção composto por 75% de Ar e 25% de CO₂. Os parâmetros de soldagem foram mantidos constantes ao longo do procedimento, tensão sendo de 27 V, corrente de 120 A (CC+) e a velocidade de soldagem de 21,0 mm/s.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Resultados de calibração

Os resultados da tensão teórica σ_t obtidos pela Equação 2 para cada deflexão e para diferentes profundidades de sua localização são apresentados na Tab. 2. Como pode ser visto, a intensidade de tensão induzida diminui distanciando-se da superfície (tensão máxima calculada foi relatada para 0 mm de profundidade) e aumenta à medida que a deflexão vai aumentando, o que está de acordo com o esperado.

Tabela 2. Valores da tensão teórica σ_t calculados para diferentes profundidades de acordo com deflexões induzidas por dispositivo de flexão a quatro pontos.

Profundidade de furação (mm)	Tensão teórica σ_t (MPa)		
	Deflexão de 3 mm	Deflexão de 4 mm	Deflexão de 5 mm
0	216	288	361
0,05	212	283	354
0,10	208	277	347
0,15	204	272	339
0,20	199	266	332
0,25	195	260	325
0,30	191	254	318
0,35	186	248	311
0,40	182	243	303

Os valores das tensões determinadas experimentalmente na barra padrão σ_{exp} com deflexões induzidas por dispositivo de quatro pontos são apresentados na Tab. 3 e sua distribuição está demonstrada na Fig. 6. Como pode ser observado, os valores medidos nas profundidades 0,05-0,15 apresentam desvios significativos para todas as deflexões induzidas. Isso pode ser explicado pelo tratamento superficial dado ao material anteriormente e a mudança consequente do módulo de elasticidade para todas as camadas superficiais. Por outro lado, os valores das tensões medidas no fundo do furo (profundidade de 0,40 mm) também podem sofrer alterações devido à dificuldade do sistema óptico de capturar as imagens nítidas nessas profundidades. Portanto, para os fins de calibração serão considerados apenas os valores das tensões medidas nas profundidades intermediárias (0,20 – 0,35 mm).

Tabela 3. Valores de tensão experimental σ_{exp} para diferentes profundidades de medição de acordo com deflexões induzidas por dispositivo de quatro pontos.

Profundidade de furação (mm)	Tensão experimental σ_{exp} (MPa)		
	Deflexão de 3 mm	Deflexão de 4 mm	Deflexão de 5 mm
0,05	222,0	309,0	308,0
0,10	77,0	263,0	305,0
0,15	99,2	236,2	313,2
0,20	191,2	273,2	318,2
0,25	182,4	269,4	280,4
0,30	194,0	257,0	263,0
0,35	197,0	251,0	254,0
0,40	212,0	223,0	234,0

Obs.: das tensões medidas foram descontadas as tensões de referência medidos para deflexão de 0 mm (na condição de material como recebido)

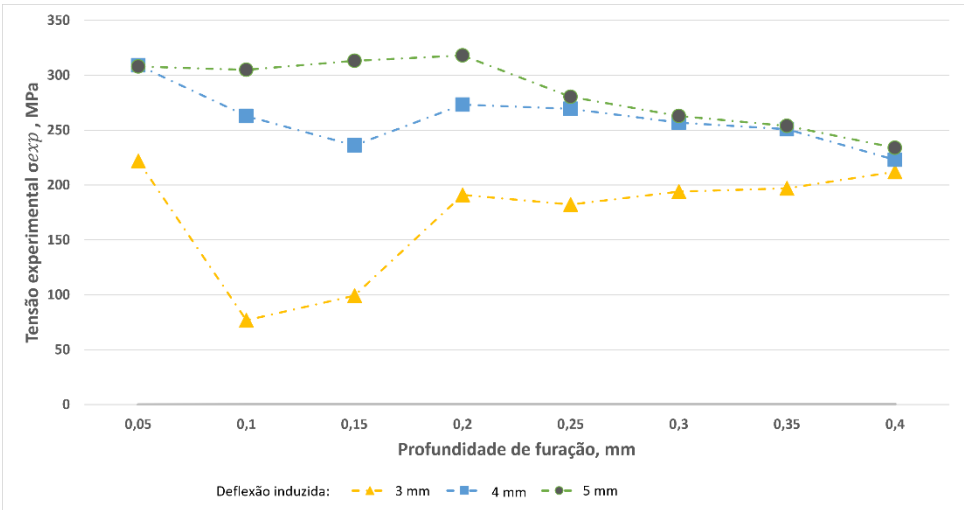


Figura 6. Tensões medidas σ_{exp} em função de deflexão induzida e profundidade de furação.

Os erros de medição definidos pela diferença entre os valores teóricos da tensão σ_t e valores experimentais σ_{exp} se encontram na Tab. 4 para diferentes profundidades de furação, em valores absolutos e relativos. O erro médio para as deflexões 3, 4 e 5 mm foi de 4,5%, 2,3% e 10,8%, respectivamente, resumindo em 5,8% de erro médio de medição para ensaio de calibração (os resultados compatíveis de 5% já foram relatados por Steinzig e Takahashi, 2003). Esse erro pode ser associado às incertezas do relógio comparador, determinação do módulo de elasticidade usado para cálculos de σ_t , variabilidade de propriedades do material da barra padrão, assim como as fontes de erros do próprio equipamento relatados anteriormente.

Tabela 4. Erro de medição determinado pela diferença entre os valores de tensões experimentais σ_{exp} e teóricos σ_t .

Profundidade de furação (mm)	Deflexão de 3 mm		Deflexão de 4 mm		Deflexão de 5 mm	
	MPa	%	MPa	%	MPa	%
0,20	8	4	-8	3	14	4
0,25	13	6	-10	4	45	14
0,30	-4	2	-3	1	55	7
0,35	-11	6	-3	1	56	18

A avaliação de precisão da técnica ESPI combinada com método do furo-cego pode ser feita por meio dos dados apresentados na Tab. 5. Os coeficientes de variação calculados a partir dos valores das tensões medidas σ_{exp} para a mesma tensão induzida (deflexão de 2 mm) apresentaram os valores menores de 15%, critério usado para definir uma precisão (repetitividade) boa dos ensaios. O coeficiente de variação médio, então, foi de 6%.

Tabela 5. Coeficiente de variação determinado a partir de tensões medidas σ_{exp} nas mesmas condições de deflexão (2 mm).

Profundidade de furação (mm)	Tensão medida σ_{exp} (MPa)					
	Furo 1	Furo 2	Furo 3	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
0,20	120	127	135	127	6	5
0,25	169	200	181	183	13	7
0,30	156	181	181	173	12	7
0,35	157	175	172	168	8	5

Ainda a partir dos dados da Tab. 3 pode ser feita a conclusão sobre a sensibilidade do equipamento. Para as profundidades intermediárias (de 0,20 a 0,35 mm), uma variação em 20 % entre as deflexões de 3 mm e 4 mm resultou numa variação de 20 % (64,25 MPa) nas tensões medidas σ_{exp} . Da mesma forma, uma variação em 25 % entre as deflexões de 4 mm e 5 mm resultou em variação de 25 % (65 MPa) nas tensões medidas. Ou seja, o equipamento em questão possui uma boa sensibilidade, tendo em vista a correlação entre a variação de uma indicação do equipamento e a variação correspondente do valor da grandeza medida.

3.2. Análise de TR nas juntas soldadas

Os corpos de prova produzidos com adição de material por processo GMAW e sem adição de material por processo LBW são demonstrados na Fig. 7 com respectivos furos feitos na zona fundida e no metal base dos cordões de solda (3 furos para cada região). As Tabelas 6 e 7 apresentam os resultados de medição das TR realizados com a técnica ESPI combinada com método do furo-cego nas juntas soldadas com adição de material (processo GMAW) e sem adição de material (processo LBW), respectivamente.

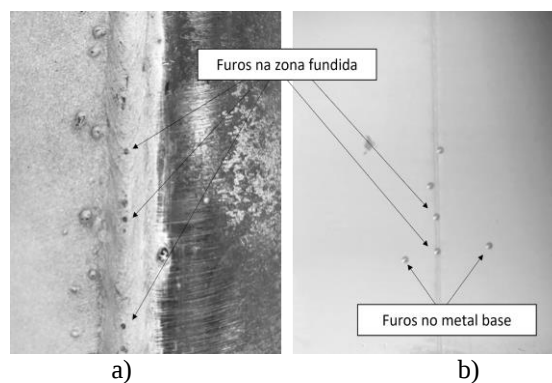


Figura 7. Locais de furação para ensaio de medição de TR na junta com deposição de material (a) e sem deposição de material (b).

Obs. A tonalidade dos corpos de prova é devida a tinta branca, cuja função é diminuir a reflexividade da superfície

Tabela 6. Valores de tensões experimentais σ_{exp} (MPa) medidas nas juntas soldadas produzidas com material de adição.

Profundidade de furação (mm)	Tensão medida σ_{exp} no Metal Base (MPa)						Tensão medida σ_{exp} na Zona Fundida (MPa)					
	Furo			Média	DP	CV (%)	Furo			Média	DP	CV (%)
	1	2	3				1	2	3			
0,20	-9	14	7	2,19	9,64	35	170	205	233	202,7	25,77	13
0,25	-15	12	-2	-0,93	10,98	72	164	235	228	209,0	31,95	15
0,30	-17	9	1	-1,36	10,70	86	172	201	216	196,3	18,26	9
0,35	1	-8	8	0,18	6,59	69	166	160	227	184,3	30,27	16

Tabela 7. **Valores de tensões experimentais σ_{exp} (MPa) medidas nas juntas soldadas produzidas sem material de adição.**

Profundidade de furação (mm)	Tensão medida σ_{exp} no Metal Base (MPa)						Tensão medida σ_{exp} na Zona Fundida (MPa)					
	Furo			Média	DP	CV (%)	Furo			Média	DP	CV (%)
	1	2	3				1	2	3			
0,20	-1	-3	2	-0,7	3,45	50	97	117	106	106,7	10,02	9
0,25	-3	-11	10	-1,3	6,91	54	102	108	103	104,3	3,21	3
0,30	7	-5	-8	-2,0	7,71	23	110	115	99	108,0	8,19	8
0,35	-5	-12	-9	-8,7	3,96	41	106	107	112	108,3	3,21	3

Algumas tendências podem ser observadas nos dados apresentados. Primeiramente, para todas as profundidades de medição e para ambos os corpos de prova, as tensões medidas na região do metal base foram significativamente menores quando comparadas as tensões na região da zona fundida. Essa distribuição está de acordo com os modelos teóricos propostos (por exemplo, em AWS Welding Handbook, 2001 e por Scotti, 2014) e é explicada por maiores gradientes de temperaturas e maiores tensões térmicas consequentes desenvolvidos no centro do cordão durante a soldagem. Entretanto, ressalta-se que a comparação direta entre as tensões residuais medidas nas juntas produzidas com e sem material de adição não seria coerente, pois os processos, materiais, intensidades de fontes de calor, parâmetros geométricos da junta etc. foram diferentes para soldagem dos corpos de prova, inviabilizando assim tal análise.

Em relação as características analisadas da técnica ESPI combinada com método do furo-cego, pode ser observado o seguinte: o coeficiente de variação foi significativamente maior para as medições realizadas nas regiões do MB, tanto para as juntas soldadas com material de adição, quanto sem. Isso aconteceu devido aos valores baixos (praticamente, nulos) de tensões presentes nas regiões que não sofreram o impacto da soldagem. Como consequência, quaisquer variações de tensão devido a heterogeneidade do material analisado ou perturbações do próprio sistema de medição resultaram em desvio padrão elevado e coeficiente de variação na faixa de 66% nos corpos de prova de aço soldados por GMAW e na faixa de 42% nos corpos de prova de alumínio soldados por LBW, valores que indicam uma precisão baixa da técnica para esta faixa de tensões (flutuantes em torno de zero).

Em contrapartida, as medições de TR nas regiões de ZF resultaram em coeficientes de variação médios de 13% e 6% para soldas feitas com e sem material de adição, respectivamente. Como esperado, uma maior irregularidade do cordão de solda, sua convexidade e maiores variações nas propriedades em decorrência das transformações metalúrgicas ocorridas nas juntas soldadas por processo GMAW tiveram maior impacto na precisão das medições de TR, enquanto o coeficiente de variação das medições realizadas nos cordões produzidos por LBW teve o mesmo resultado de calibração do equipamento (6%), realizada em uma superfície lisa e plana. Mas de qualquer maneira, em ambos os casos esses valores (menores de 15%) indicam uma precisão boa das medições realizadas no centro dos cordões de solda (região de maiores valores de tensões segundo os modelos teóricos).

Quanto a incerteza de medição para os ensaios realizados, a mesma foi definida sendo de $\pm 2,17$ MPa para região de MB e de $\pm 3,62$ MPa para ZF nas soldas produzidas com material de adição. Já para juntas soldadas a laser (sem material de adição), a incerteza de medição foi de $\pm 1,64$ MPa para região de MB e $\pm 1,70$ MPa para ZF, apresentando melhores índices de acurácia.

4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados apresentados, as seguintes conclusões podem ser tomadas em relação a aplicabilidade da técnica ESPI em conjunto com o método do furo-cego nas juntas soldadas:

- A técnica possui uma boa exatidão, precisão e sensibilidade de medições das tensões nas superfícies lisas, apresentando erro médio de 5,8% e o coeficiente de variação médio de 6%;
- Certos cuidados devem ser tomados em relação a medição das tensões nas profundidades iniciais do material estudado: ou o tratamento superficial realizado previamente na amostra deve ser bem conhecido, ou então os pontos iniciais de medição devem ser descartados para não levar aos resultados enganosos;
- Para valores baixos de tensões (flutuantes em torno de zero), a precisão de medição é bem menor quando comparada com as tensões acima de 100 MPa;
- Utilização da técnica para medição de tensões residuais no cordão de solda produzido sem material de adição não alterou significativamente a precisão das medições;

- e) Já a precisão de medições feitas no cordão de solda com deposição de material foi menor, mas ainda dentro do aceitável (coeficiente de variação menor que 15%);
- f) A incerteza de medição relatada para as medições realizadas no cordão de solda com deposição de material foi maior em comparação com o cordão de solda produzido sem material de adição;
- g) De uma forma geral, a utilização da técnica de medição de tensões residuais ESPI em conjunto com o método do furo-cego apresenta resultados consistentes, coerentes com modelos teóricos e dados previamente apresentados na literatura, podendo ser aplicada em juntas soldadas tanto com, quanto sem material de adição;

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao LABENDEM (Laboratório de Ensaios Não Destrutivos Multidisciplinar no Centro de Pesquisa, Inovação e Desenvolvimento do Estado do Espírito Santo) e ao projeto de ação transversal FINEP do governo do estado do Espírito Santo, assim como ao Laboratório de Metrologia (LabMetro) e ao Laboratório de Soldagem da Universidade Federal do Espírito Santo, pela infraestrutura oferecida e pela oportunidade de realização desse trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- ASME, American Society of Mechanical Engineers, Boiler and Pressure Vessel Code, Section IX: Welding, Brazing and Fusion Qualifications, New York – EUA, 1999;
- ASTM, American Society for Testing of Materials, Standard Test Method for Determining residual Stresses by Hole-Drilling Strain-gage Method. E 837-01, 2008;
- AWS, American Welding Society, D1.1. Structural Welding Code – Steel, 2010, 536 p., Miami – EUA, ISBN: 978-0-87171-772-6;
- AWS, Welding Handbook – Vol 1: Welding Technology, Chapter 7: Residual Stresses and Distortion, *American Welding Society*, 9^o Edition, 2001, 891 p., pp. 298 – 308, ISBN: 0-87171-657-7;
- Barile, C. et al., 2004. “Analysis of the effects of process parameters in residual stress measurements on Titanium plates by HDM/ESPI”. *Measurement*, v. 48, p. 220-227.
- Cabral, T. S., Braga, E. M., Mendonça, E. A. M., Scotti, A., 2013. “Influência dos procedimentos e modos de transferência no processo MAG na redução de deformações em painéis de estruturas navais”. *Soldagem e Inspeção*, 18(4), 339–348. <https://doi.org/10.1590/S0104-92242013000400006>;
- Guo, J., Fu, H., Pan, B., & Kang, R., 2021. “Recent progress of residual stress measurement methods: A review”. *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 34, Issue 2, pp. 54–78. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.10.010>;
- Hagenlocher C.; Wagner J.; Michel J.; Weber R.; Bachmann M.; Karadogan C.; Liewald M.; Graf T., 2020. “The influence of residual stresses on laser beam welding processes of aluminium sheets”. *Proceedings in 11th CIRP Conference on Photonic Technologies*, pp. 713-717;
- Kudryavtsev, Y. e Kleiman, J., 2017. “Fatigue of welded elements: residual stresses and improvement treatments”. *Welding in the World*, v. 51, n. I, p. 255;
- Ponslet, E. & Steinzig, M., 2003. “Residual stress measurement using the hole drilling method and laser speckle interferometry Part II: Analysis technique”. *Experimental Techniques*, 27(4), 17–21. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2003.tb00117>;
- Rahimi S., Violatos, S. R. I., 2022. “Comparison Between Surface and Near - Surface Residual Stress Measurement Techniques Using a Standard Four - Point - Bend Specimen”. *Experimental Mechanics*, 223–236. <https://doi.org/10.1007/s11340-021-00779-6>;
- Schajer, G. S. and Steinzig, M., 2005. “Full-Field Calculation of Hole-Drilling Residual Stresses from ESPI Data”, *Experimental Mechanics*, Vol.45, No.6, pp.526- 532;
- Scotti, A., 2014. “Modelos de cinco barras e de uma barra para geração de tensões térmicas na ZF, ZAC e MB durante soldagem a arco”. *Soldagem & Inspeção*, 19(1), 82–90. <https://doi.org/10.1590/s0104-92242014000100010>;
- Steinzig, M., & Takahashi, T., 2003. “Residual stress measurement using the hole drilling method and laser speckle interferometry part IV: Measurement accuracy”. *Experimental Techniques*, 27(6), 59–63. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2003.tb00141.x>;
- Steinzig, M., Upshaw, D., & Rasty, J., 2014. “Influence of Drilling Parameters on the Accuracy of Hole-drilling Residual Stress Measurements”. *Experimental Mechanics*, 54(9), 1537–1543. <https://doi.org/10.1007/s11340-014-9923-x>;
- Stresstech Oy, Prism technical guide, 4. ed., v.2, 2016;
- Upshaw, D., Steinzig, M., & Rasty, J., 2011. “Influence of drilling parameters on the accuracy of hole-drilling residual stress measurements”. *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, 8, 95–109. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0225-1_12;
- VIM, Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO, 2012;

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

APPLICATION OF THE ESPI (ELECTRONIC SPECKLE PATTERN INTERFEROMETRY) TECHNIQUE COMBINED WITH THE HOLE-DRILL METHOD FOR RESIDUAL STRESS MEASUREMENT IN WELDED JOINTS

Olga Liskevych, olga.liskevych@ufes.br¹

Elton Mesquita de Almeida, eltonmesquitaalmeida@gmail.com³

Gabriel Fracalossi Feijo, gabriel.feijo@edu.ufes.br^{1,2}

Marcelo Camargo Severo de Macêdo, marcelo.macedo@ufes.br^{1,2}

¹Federal University of Espírito Santo, Mechanical Engineering Department, Vitória - ES, Brazil

² Postgraduate Program in Mechanical Engineering (PPGEM), Vitória - ES, Brazil

³ LABENDEM Center of Research, Innovation and Development – CPID, Cariacica – ES, Brazil

Abstract: Residual stress evaluation in welded joints counts with a variety of destructive and non-destructive methods, each one with its performance, cost, complexity, precision and accuracy of obtained results. Among them, an optical technique ESPI (*Electronic Speckle Pattern Interferometry*) combined with a hole drilling method has been demonstrating consistent results of stress measurement in different materials at plane and well finished surface conditions. The purpose of this work, thereby, is to verify an applicability of referred technique in welded joints, taking into account altered conditions of the beads when compared to the base metal, such as reinforcement convexity, surface irregularity, change of mechanical properties and specific residual stress distribution in welded samples. For this analysis, first of all, a calibration of the equipment was performed with the known strain application. Afterwards the residual stress measurement tests were carried out on the joints welded with and without addition of material. The results obtained with calibration show good accuracy, precision and sensibility, demonstrating a mean error at the range of 5,8% and mean coefficient of variation about 6%. Meantime, measurement precision at the weld beads was alternated for the low stress values, but still demonstrating acceptable coefficient of variation (smaller than 15%) for the less favorable condition (welded bead produced with adding material). An uncertainty for the sample welded with adding material was reported to be higher when compared to the sample produced without adding material. In general, with some specific cautions (such as depth of measuring), the optic technique ESPI (*Electronic Speckle Pattern Interferometry*) combined with a hole drilling method can be applied in welded joints with high reliability of results.

Keywords: residual stress, welding, ESPI technique, hole drilling method