

CONAEND&IEV-071

DETECÇÃO DE DEFEITOS EM JUNTAS ADESIVADAS DE TUBOS COMPÓSITOS COM SHEAROGRAFIA, TERMOGRAFIA E ULTRA-SOM

Daniel P. Willemann¹, Carla A. Marinho², Sérgio Damasceno Soares², Armando Albertazzi³,
Paulo C. F. Henriques⁴, Daniel H. B. Hofmann³, Dênis T. Goto³, Luiz G. Schweitzer³

Copyright 2008, ABENDE e PROMAI

Trabalho apresentado durante o CONAEND&IEV2008 – Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção & Conferencia Internacional sobre Evaluación de Integridad y Extensión de Vida de Equipos Industriales, em São Paulo/SP, no mês de junho de 2008.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Sinopse

Tubos de materiais compósitos começam a ser usados em vários segmentos industriais, incluindo a indústria do petróleo. A união entre tubos compósitos adjacentes é freqüentemente realizada através de adesivos, e desta forma, a inspeção de juntas adesivadas visando a detecção de falhas de adesão torna-se imperiosa. Neste contexto, tubos e curvas fabricados em resina epóxi reforçada por fibra de vidro foram unidos por adesivo, na configuração ponta-e-bolsa, formando circuitos fechados (*spools*). Durante a montagem destes circuitos, defeitos artificiais (áreas sem adesivo ou *disbondings*) foram inseridos nas suas juntas para avaliação da capacidade de detecção de falhas de adesão por diferentes técnicas de inspeção não-destrutivas. O presente trabalho apresenta e discute resultados obtidos com a técnica óptica "shearografia" e apresenta correlações com ensaios de ultra-som pulso eco e termografia ativa. Conclui-se que a shearografia apresenta grande potencial de aplicação na inspeção de juntas adesivadas, pois detectou todos os defeitos artificialmente inseridos e também defeitos reais presentes nas junções das amostras ensaiadas.

1. Introdução

O texto inicia com a descrição sucinta da técnica óptica denominada shearografia e sua utilização na detecção de defeitos em estruturas de materiais compósitos. Os corpos de prova, equipamentos e procedimentos experimentais utilizados em laboratório são também descritos. Em seguida, são apresentados os principais resultados obtidos com shearografia, bem como algumas correlações com as técnicas de ultra-som pulso eco e termografia ativa. Finalmente, as conclusões do trabalho são apresentadas e terminam com uma reflexão sobre os próximos caminhos a serem percorridos para a definitiva aplicação desta técnica não-destrutiva em campo.

¹ PHOTONITA Ltda. – Photonical Instruments for Technical Applications

² Centro de Pesquisas da PETROBRAS - CENPES

³ UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

⁴ PETROBRAS/UN-RIO/ENGP/EMI

2. Shearografia aplicada à detecção de falhas

A shearografia é uma técnica interferométrica capaz de perceber pequenas deformações ocorridas nas superfícies dos materiais ocasionadas após a aplicação de um determinado carregamento (1).

Apesar de ser uma técnica interferométrica e, por este motivo, de grande sensibilidade, sua principal vantagem é a sua capacidade de ser operada fora do ambiente laboratorial (2-3). Na figura 1 apresenta-se um exemplo de imagem obtida por shearografia utilizada na detecção de descolamentos em revestimentos compósitos em campo (4). A concentração de franjas, destacada na figura pela elipse, indica a presença de pequenas falhas de adesão na borda de uma manta compósita.



Figura 1- Resultado obtido em campo com shearografia

Um sistema de shearografia é composto principalmente pelos seguintes módulos: visualização e aquisição de imagens (Cabeçote), iluminação e carregamento. Na figura 2 mostra-se o módulo de visualização e aquisição de imagens composto basicamente por uma câmera digital de alta resolução associada a alguns elementos ópticos e a iluminação da superfície através de um laser.

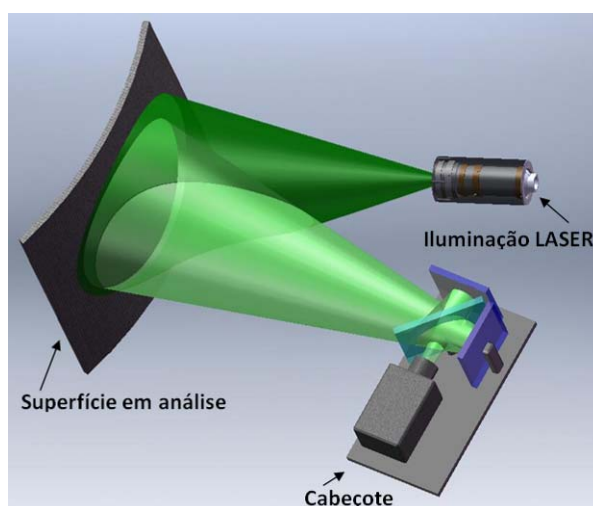


Figura 2- Configuração básica de um sistema de shearografia

O tipo de carregamento a ser utilizado depende essencialmente da estrutura a ser analisada e pode ser térmico, por vácuo, por pressão interna e até vibracional (4).

O procedimento de inspeção por shearografia consiste em três passos fundamentais para a obtenção da imagem com o resultado:

- a) Aquisição de imagem de referência da superfície da estrutura em análise;
- b) Aplicação do carregamento à estrutura em análise;
- c) Aquisição da imagem da superfície da estrutura no estado deformado;
- d) Processamento das imagens e obtenção do resultado por meio de software específico.

Falhas nas estruturas de material compósito provocam descontinuidades no campo de deformações da superfície após a aplicação do carregamento. Estas descontinuidades são percebidas pela shearografia na forma de franjas, indicando a presença de falhas, como exposto na figura 1.

3. Corpos de Prova

Os corpos de prova utilizados nesta pesquisa foram *spools* preparados com tubos e curvas de material compósito (resina epóxi reforçada com fibras de vidro), com diâmetro nominal de 4” polegadas e montados conforme ilustrado na figura 3.

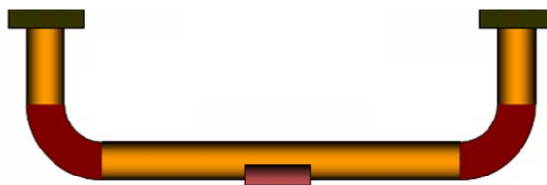


Figura 3- Configuração dos *spools* utilizados como corpos de prova

Os tubos e curvas foram unidos por adesivo, na configuração ponta-e-bolsa, e durante sua montagem foram inseridos defeitos artificiais nas junções. O objetivo desta pesquisa foi o de verificar a capacidade da shearografia na detecção de falhas de adesão nestas estruturas tubulares.

4. Metodologia

Inicialmente, em virtude dos bons resultados obtidos na inspeção de reparos compósitos sobre dutos de aço (1), esperava-se empregar carregamento térmico para identificar descontinuidades em juntas adesivadas, mas após vários testes com este tipo de carregamento, nenhum resultado satisfatório foi obtido.

Tendo em vista a dificuldade encontrada na utilização do carregamento térmico, um novo *setup* foi montado e passou-se a utilizar o carregamento por pressão hidrostática. Flanges foram projetados e usinados para que o carregamento hidrostático pudesse ser aplicado aos corpos de prova.

Na figura 4 apresentam-se algumas imagens da montagem experimental utilizada na análise das juntas.

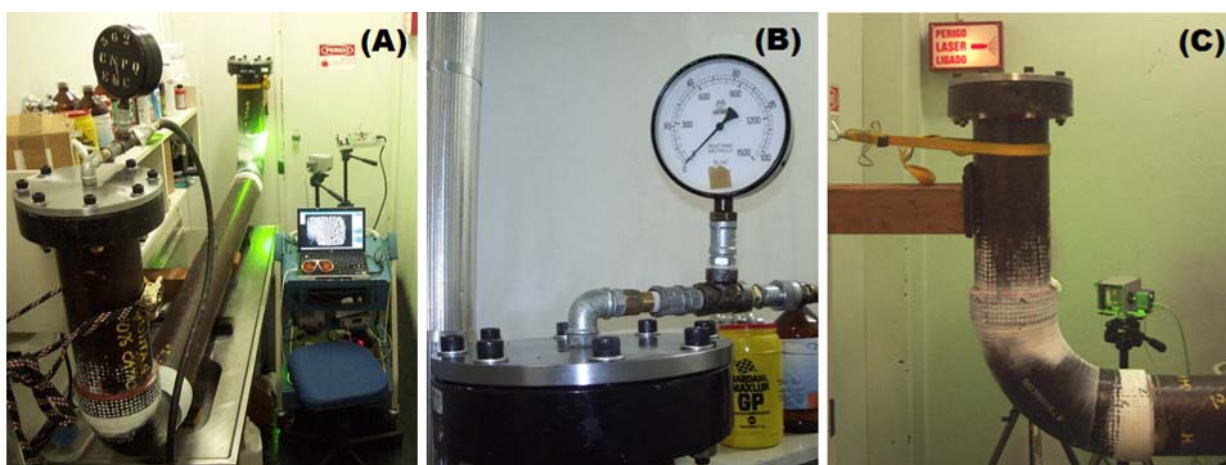


Figura 4. (A) vista geral da montagem; (B) detalhe do flange e manômetro; e, (C) extremidade do corpo de prova fixada à parede.

Conforme mostrado na figura 4A e 4C, corpos de prova foram apoiados sobre a bancada e suas extremidades foram fixadas às paredes através de cintas de poliéster e ganchos.

Para as medições com shearografia, utilizou-se o cabeçote desenvolvido no LABMETRO/UFSC e uma unidade de laser DPSS com 400 mW de potência e comprimento de onda de 532 nm (cor verde). Detalhes de projeto do cabeçote de medição podem ser encontrados em (1) e (4).

O cabeçote e o laser foram colocados em tripés separados e nenhum dispositivo anti-vibração foi utilizado durante os testes (figura 5). As superfícies analisadas foram pintadas com tinta branca para uniformizar a iluminação laser. O valor do *shear* (deslocamento lateral da imagem (2)), determinado em testes preliminares nos corpos de prova, foi de 10 mm para todas as análises, nas direções longitudinal e transversal dos *spools*.

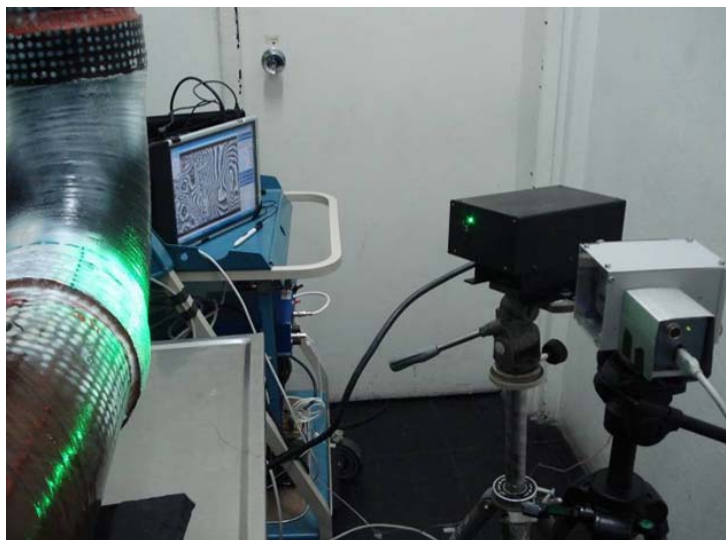


Figura 5 – Posicionamento da iluminação laser e do cabeçote de shearografia

A diferença de pressão (Δp) média utilizada durante os testes foi de aproximadamente 0,49 MPa ($5 \text{ kgf/cm}^2 \sim 4,9 \text{ bar} \sim 71 \text{ psi}$). A aplicação de um Δp positivo ou negativo praticamente não muda o padrão de franjas da estrutura. Ocorre apenas, uma inversão no sentido da variação do nível de cinza das franjas. Isto significa que se na aplicação de variação positiva as franjas variam do branco para o preto, e na aplicação negativa a variação será do preto para o branco, conforme apresentado na figura 6.

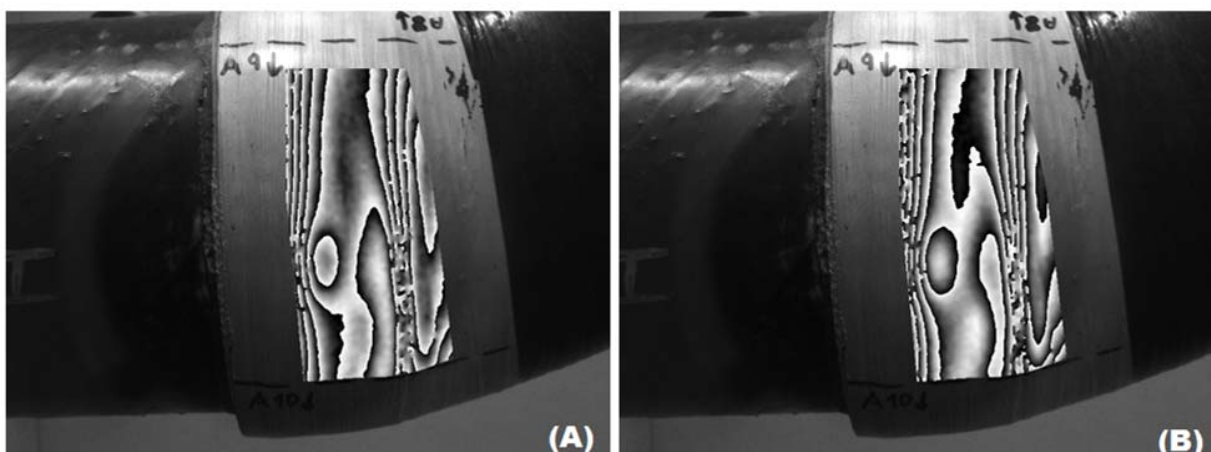


Figura 6 – $\Delta p \sim 8 \text{ kgf/cm}^2$ - (A) carregamento positivo; (B) carregamento negativo.

Os corpos de prova foram identificados pelas siglas CP2, CP3 e CP5 de acordo com as marcações feitas pelo CENPES/PETROBRAS no momento da fabricação dos *spools*. O número de seções analisadas foi determinado com base na quantidade de defeitos artificiais inseridos em cada um dos *spools*.

5. Resultados

Com base nas imagens obtidas através da shearografia, para uma correta interpretação e análise dos resultados deve-se considerar que:

1. A shearografia é uma técnica óptica que mede pequenas deformações nas superfícies analisadas.
2. No momento em que são submetidos a uma diferença de pressão interna, os tubos compósitos mudam levemente a sua forma, gerando um campo de deformações relativamente uniforme na ausência de defeitos (figura 7).

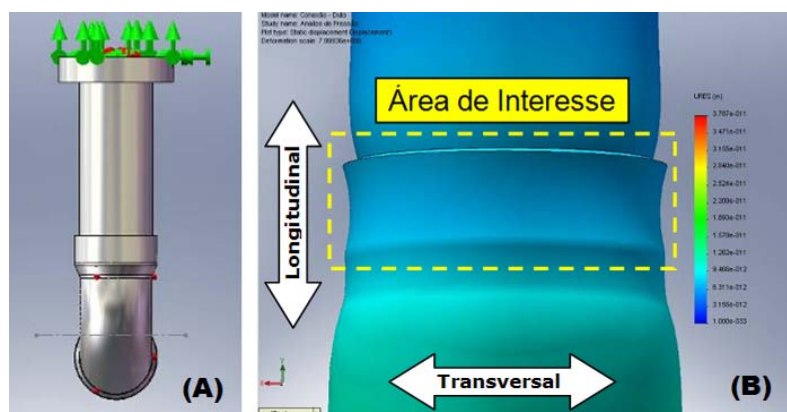


Figura 7 – (A) Modelo da junta compósita em CAD; e, (B) detalhe da análise qualitativa das deformações através do método dos elementos finitos: Deformações uniformes na área de interesse.

De acordo com a análise por elementos finitos, quando a shearografia é aplicada na análise de juntas compósitas isentas de falhas de adesão, o padrão de franjas é também relativamente uniforme, conforme mostrado na figura 8.

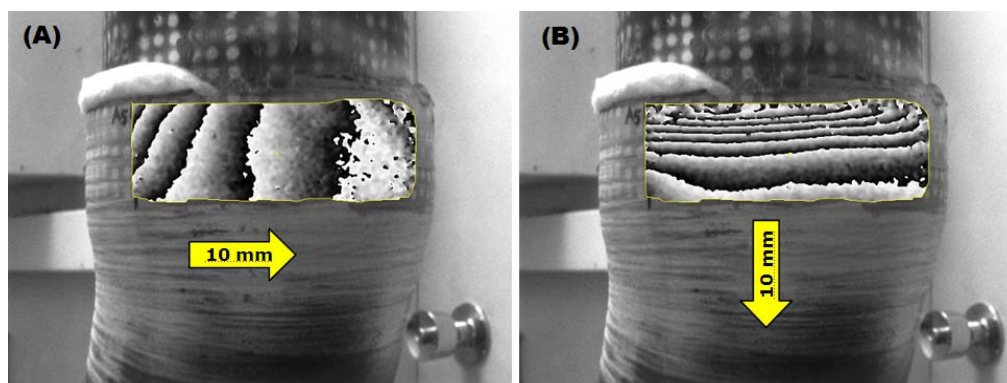


Figura 8 – Padrões de franjas de interferência obtidos em juntas compósitas sem falhas de adesão: (A) *shear* transversal (B) *shear* longitudinal.

Assim sendo, com a presença de falhas de adesão nas juntas compósitas, descontinuidades (variações) nos padrões de franja são observadas, conforme indicado nos resultados a seguir:

1. Na figura 9 apresenta-se o resultado obtido na área n. 7 do CP2. Este resultado, quando comparado aos padrões uniformes mostrados na figura 8, apresenta descontinuidades, principalmente na análise transversal da junta (figura 9 (B)). A indicação de defeito é clara em ambas as direções analisadas e condiz com a marcação de defeito artificialmente inserido. Dependendo da direção do *shear* utilizado na inspeção, as falhas de adesão se manifestam de diferentes formas, ou seja, os padrões de franjas obtidos para uma mesma falha não são iguais em ambas as direções. Como exemplo, tem-se o padrão tipo “borboleta”

(clássico da shearografia (2)), encontrado na figura 9 (B), que não se apresenta da mesma forma na análise longitudinal, apesar de ser a mesma falha.

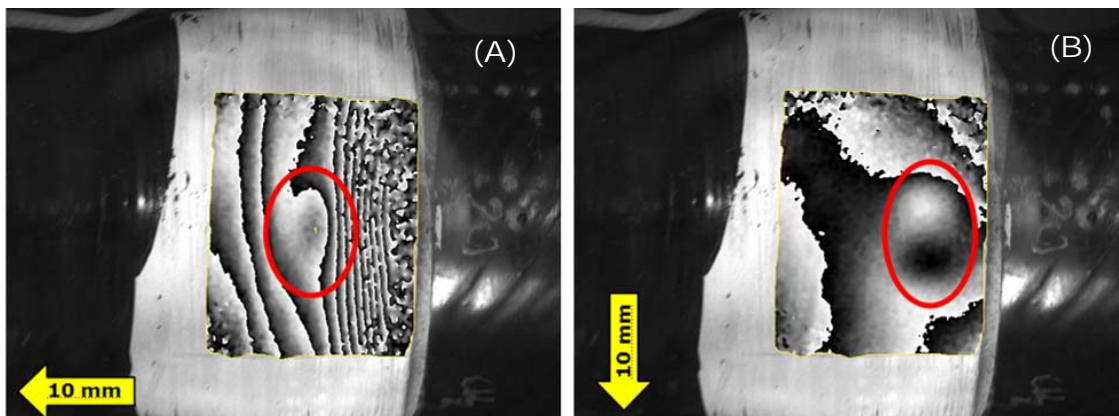


Figura 9 – Resultado CP2 – área 7 – clara indicação da presença de falha.

2. Na figura 10, os resultados obtidos na área n. 1 do CP3 são apresentados. Novamente as indicações de defeito são claras quando comparados aos padrões de franjas de regiões sãs.

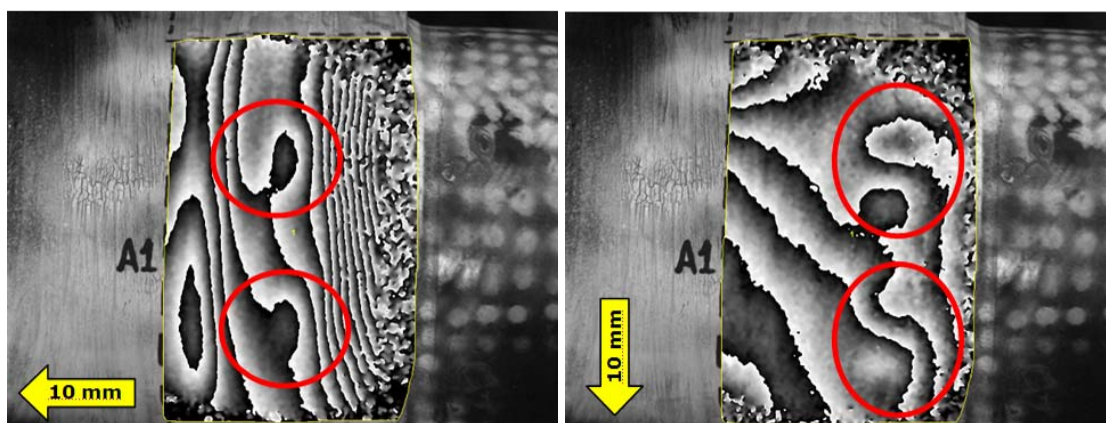


Figura 10 – Resultado CP3 – área 1 – clara indicação da presença de falhas.

3. Na Figura 11 são apresentados os resultados da falha inserida na região n.1 do CP5. Notam-se sempre grandes variações do padrão de franjas, indicando a falta de adesão na junta analisada.

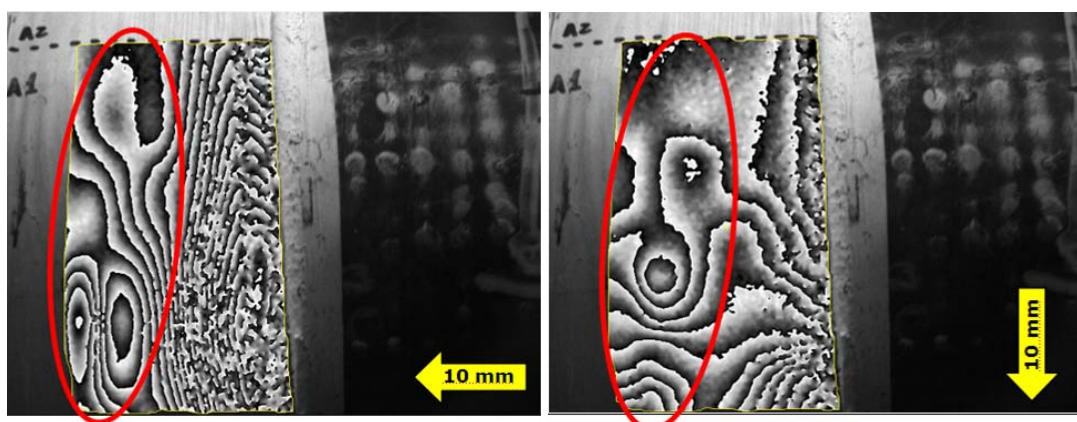


Figura 11 – Resultado CP5 – área 1 – clara indicação da presença de falhas.

As falhas indicadas nas figuras 9, 10 e 11 foram artificialmente inseridas nos corpos de prova.

Nesta pesquisa, foram realizadas quarenta análises com carregamento hidrostático, igualmente divididas entre longitudinais e transversais. Do total, duas indicações de falso-positivo foram observadas: uma no *spool* de n. 3 (área 4) e outra no *spool* de n. 5 (área 3); figuras 12 e 13, respectivamente. Denomina-se resultado falso-positivo, a observação de falhas em áreas sem a marcação da presença de falhas artificialmente inseridas.

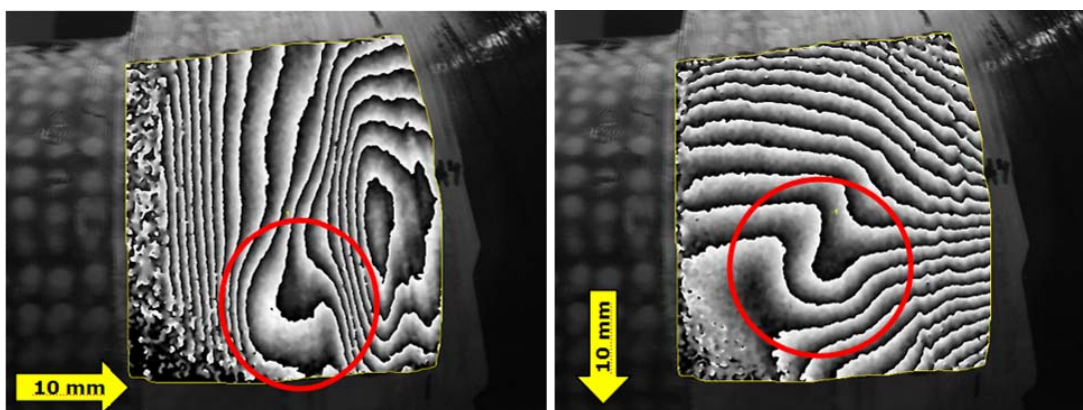


Figura 12 – Resultado CP3– área 4 – indicação da presença de falha em área sem inserção de defeitos artificiais (falso-positivo).

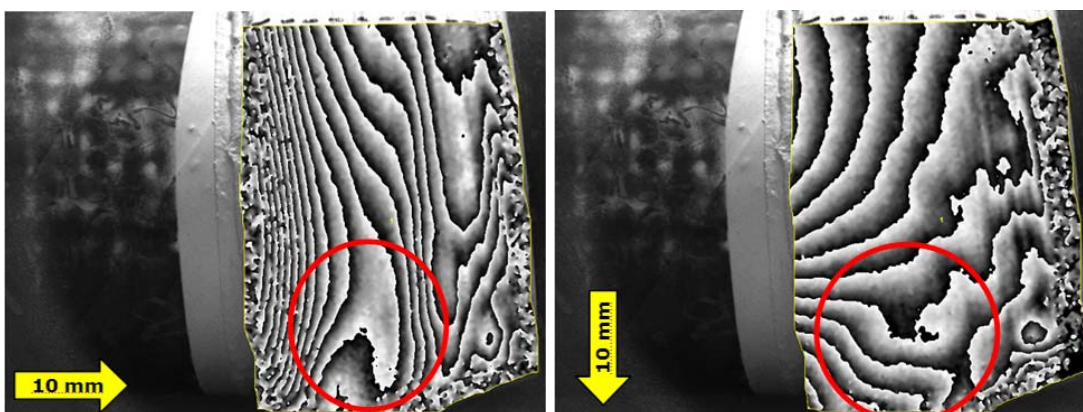


Figura 13 – Resultado CP5 – área 3 – indicação da presença de falha em área sem inserção de defeitos artificiais (falso-positivo).

Seis análises foram efetuadas com carregamento térmico, mas nenhum resultado significativo foi alcançado. Por esta razão, este método de carregamento foi logo desconsiderado para este tipo de estrutura.

6. Análise dos Falsos Positivos

Para avaliar as causas que levaram os ensaios com shearografia a apontar defeitos em regiões virtualmente sãs, aqui denominados de “falsos-positivos”, o corpo técnico do CENPES/PETROBRAS realizou ensaios complementares com ultra-som pulso eco e termografia ativa.

As metodologias adotadas em cada uma das técnicas basearam-se na experiência adquirida pelo CENPES/PETROBRAS. Ressalta-se que o trabalho com ultra-som e termografia na inspeção de compósitos conduzido pela equipe do CENPES/TMEC também se encontra em fase de desenvolvimento. A termografia ativa, da forma simples como está sendo avaliada neste primeiro momento, apresenta desempenho dependente das dimensões das amostras, localização dos defeitos e da existência de características superficiais que possam influenciar no fluxo de calor. No entanto, seu emprego na atividade de correlação visou apenas à obtenção de mais informações para análise dos pontos.

6.1. Ultra-som Pulso Eco

Utilizou-se um equipamento de ultra-som com um cabeçote normal monocristal frequência 1 MHz. Outros transdutores monocristais também apresentam bom desempenho na inspeção destes materiais. Porém, durante a calibração do equipamento de ultra-som, observou-se que o modelo utilizado apresentava a melhor relação sinal ruído para o material em questão.

Um bloco escalonado de resina epóxi reforçada por fibras de vidro, com espessuras de 3,10mm - 5,80mm - 8,45mm, foi empregado na calibração do equipamento de ultra-som. Estas espessuras foram determinadas com uso de paquímetro universal. A primeira reflexão teve seu eco maximizado a 100% da tela (ganho de 55,5dB).

Em seguida, foram medidas as espessuras da curva e do tubo. Estima-se que a reflexão proveniente da espessura do tubo na região da junta ponta-e-bolsa, seja aproximadamente a soma das espessuras individuais (tubo e curva), experimentando ainda o acréscimo da camada de adesivo.

Devido à variação dimensional observada em componentes fabricados a partir de materiais compósitos, a medição de espessura do tubo e da curva foi repetida em cada caso previamente à inspeção.

Com a definição da posição da janela de medição, a inspeção foi feita através de um critério passa-não-passa. Pontos onde o eco de fundo não atingisse o limiar foram considerados como áreas sem adesivo.

6.2. Termografia Ativa

Na termografia ativa, a superfície a ser inspecionada é exposta a uma excitação térmica seguida de uma aquisição de dados (imagens/termogramas) do estágio de aquecimento e/ou resfriamento (observação da distribuição de temperatura) ao longo do tempo. O estímulo térmico pode ser aplicado de diversas formas, segundo tempos previamente determinados.

Nestes experimentos, utilizou-se uma câmera termográfica e uma fonte de calor utilizando lâmpada halógena para aquecimento por irradiação. Cada área foi irradiada durante 30 segundos e a observação da superfície foi realizada pelo período de 1 minuto, durante o resfriamento.

6.3. Correlação entre as técnicas

A correlação entre técnicas de ensaios não destrutivos foi feita a partir de três resultados obtidos nos ensaios com shearografia:

1. **CP5 – área 1:** área com indicação de defeito artificial e confirmada pela shearografia como área com falha de adesão (verificação)
2. **CP5 – área 3:** área sem indicação de defeito artificial e apontada pela shearografia como área com falha de adesão (falso-positivo 1)
3. **CP3 – área 4:** área sem indicação de defeito artificial e apontada pela shearografia como área com falha de adesão (falso-positivo 2)

Com o intuito de analisar os sinais obtidos pelo ultra-som e pela termografia em casos de falha de adesão nas juntas ponta-e-bolsa, a primeira correlação foi realizada na área 01 do CP5, ou seja, em uma área onde um defeito artificial tinha sido inserido. As áreas desenhadas na figura 14 indicam a posição da falha de adesão indicada por cada método utilizado.

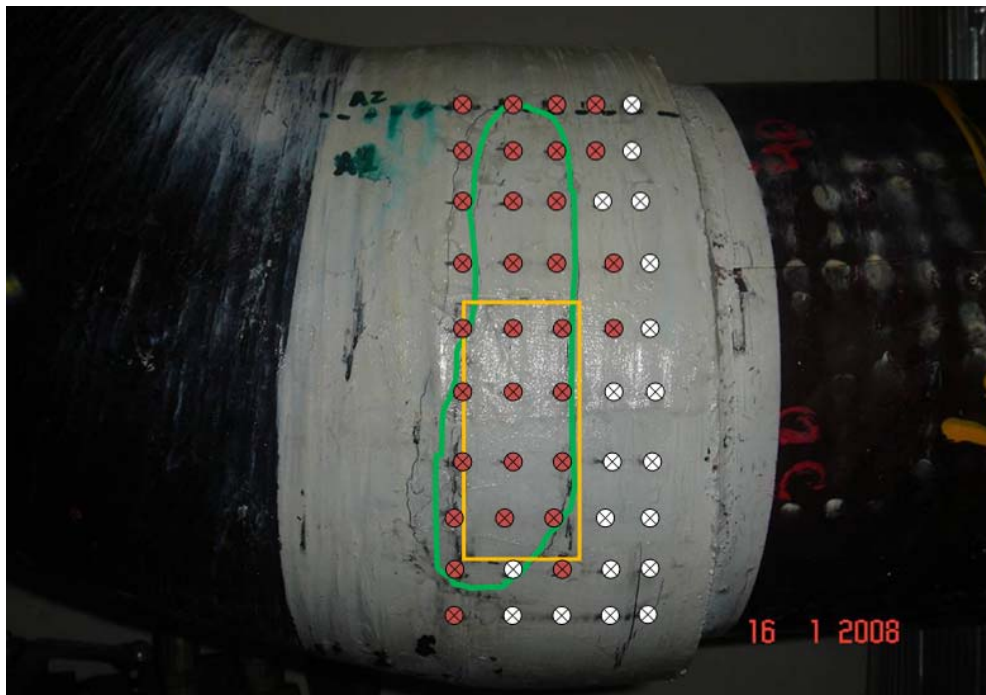


Figura 14 – **Comparação de resultados CP5-01:** linha Verde – shearografia; linha laranja (retangular) – termografia; grade de pontos (10mm x15mm) – ultra-som pulso eco (pontos vermelhos indicam região do defeito e pontos brancos indicam a região sã).

A melhor correlação obtida foi entre a shearografia e o ultra-som. Nota-se que a termografia ativa, apesar de indicar a presença de defeito, não apresentou boa correlação com a dimensão real da falha, em virtude, principalmente, das grandes irregularidades existentes na superfície destes corpos de prova. Na figura 15 apresenta-se o resultado obtido com termografia ativa.

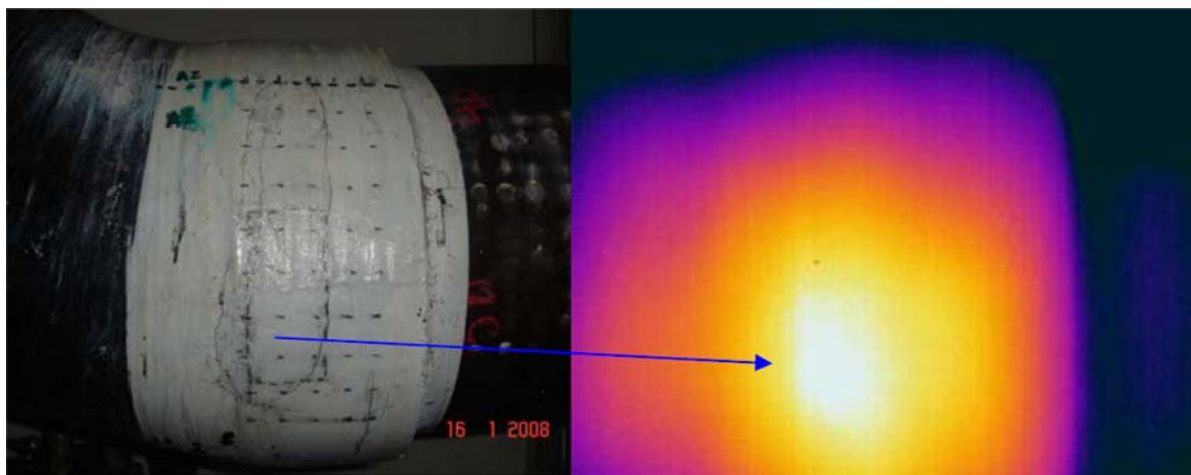


Figura 15 – Resultado obtido com termografia ativa – CP5-01: defeito apontado com dimensões menores.

Na figura 16 apresenta-se o resultado obtido na área CP5-03 com uma malha de 15 mm x 10 mm, novamente em comparação com a shearografia e termografia. Neste caso, a presença do defeito foi inteiramente confirmada. A última linha da direita da grade (seta amarela) corresponde a uma região após o final do tubo no interior da junta, o que faz com que o ultra-som acuse a ausência de adesivo.

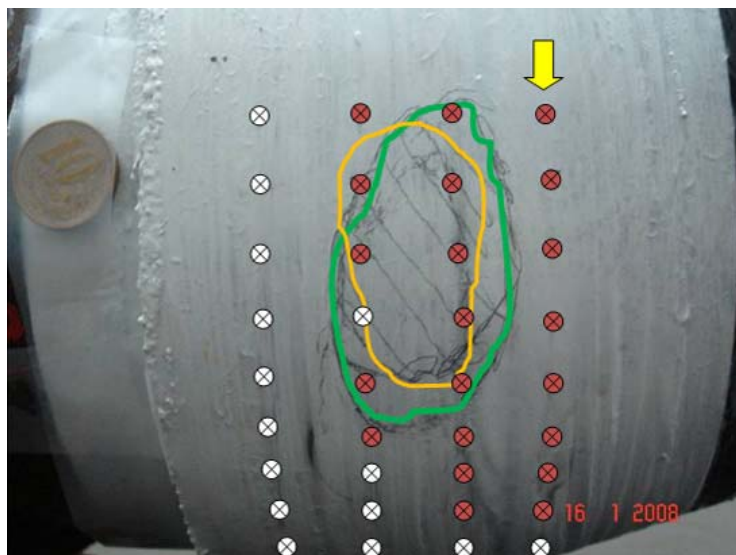


Figura 16 – **CP5-03: falso-positivo 1**: linha verde – shearografia; linha laranja (menor área central) – termografia; grade de pontos – ultra-som pulso eco (pontos vermelhos indicam região do defeito e pontos brancos indicam a região sã).

Na figura 17 apresenta-se o resultado obtido com termografia na região CP5-03.

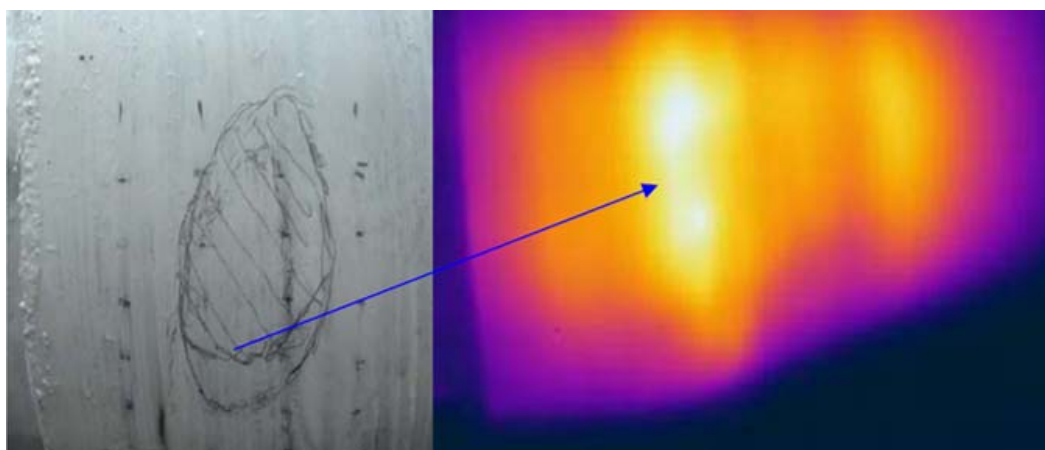


Figura 17 – Resultado obtido com termografia ativa – CP5-03.

Os resultados de correlação para o segundo falso-positivo (CP3-04) são mostrados no lado esquerdo da figura 18. À direita, encontra-se o termograma para esta área.

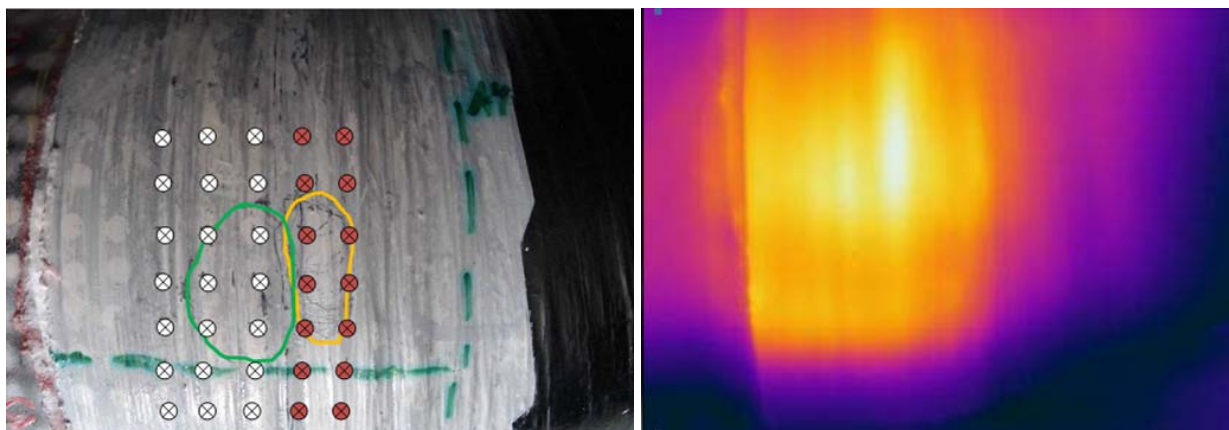


Figura 18 – **CP3-04: falso-positivo 2**: (Esq.): linha verde – shearografia; linha laranja – termografia; grade de pontos (15mm x10mm) – ultra-som pulso eco (pontos vermelhos indicam região do defeito e pontos brancos indicam a região sã); (Dir.): termografia ativa.

Para o falso positivo da CP3-04, o ultra-som e a termografia não foram capazes de apontar a presença de defeito. As duas linhas de pontos vermelhos na figura 18 se referem a uma porção inteira da curva onde as imperfeições superficiais impediam o correto acoplamento do transdutor. Ainda na mesma figura, a termografia ativa apontou uma região ao lado daquela encontrada pela shearografia, provavelmente, decorrente do acúmulo de energia térmica nas irregularidades da superfície do CP3 e não devido realmente a uma falha de adesão.

Como não se obteve correlação nos primeiros testes da área CP3-04, uma nova inspeção com shearografia foi executada nessa área, e a indicação do defeito foi novamente apresentada no padrão de franjas. Em vista disso, realizou-se um novo exame com ultra-som com a atenção voltada somente aos primeiros ecos ultra-sônicos, na região do pretense defeito e vizinhanças.

Os resultados da nova análise com ultra-som são apresentados na figura 19. Em uma análise qualitativa, notam-se mudanças ocorridas nos espectros da figura 19(B) e (C) em relação ao espectro do ponto sem falha de adesão 19(A).

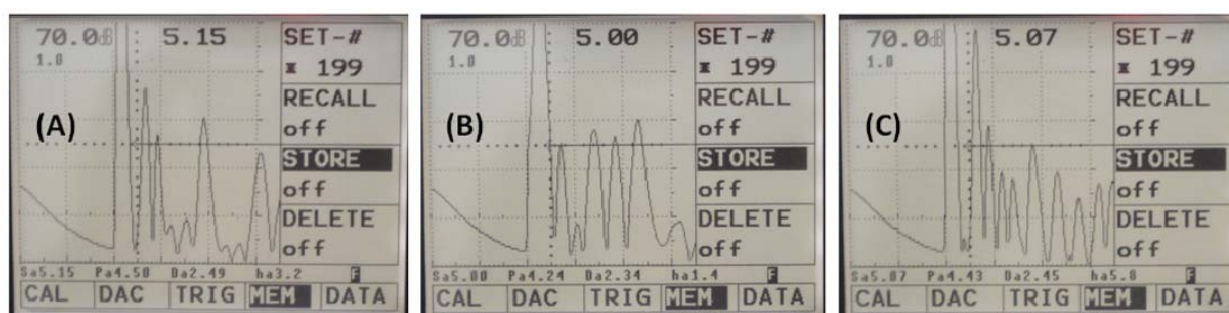


Figura 19 – Análise qualitativa do espectro sônico na região da indicação e vizinhança: (A) áreas sem indicação de defeito, perfil típico; (B) e (C) mudanças no espectro quando o cabeçote é posicionado sobre a indicação da shearografia.

Os resultados de ambas as técnicas sugerem a existência de um defeito real nesta região, proveniente do processo de montagem da junta, o qual não interfere com o pulso sônico suficientemente para suplantiar o eco de fundo, mas é capaz de provocar alterações no perfil do espectro. Tal defeito, provavelmente, não seria uma área sem adesivo. Somente a análise destrutiva da amostra poderá trazer resultados verdadeiramente esclarecedores.

Conclusões

Com base nos resultados obtidos, pode-se afirmar, mais uma vez, que a shearografia tem um grande potencial para ser sistematicamente usada como técnica não-destrutiva na análise de falhas em juntas adesivadas de materiais compósitos. As análises realizadas neste trabalho demonstraram que a shearografia associada a uma forma de carregamento adequada fornece um resultado mais preciso. A técnica pode ser aplicada na inspeção após a montagem e em serviço, sem impacto na operação.

Todos os defeitos presentes na amostras foram detectados por shearografia, com a ocorrência de duas indicações de falso-positivo, as quais foram correlacionadas com ultra-som e termografia. As metodologias empregadas pelo CENPES/PETROBRAS nos ensaios ultra-sônico e termográfico ainda não foram completamente desenvolvidas, mas os resultados obtidos fortaleceram as indicações da shearografia, sugerindo a existência de defeitos reais em áreas virtualmente sãs. A análise destrutiva das amostras trará resultados completamente esclarecedores.

A rugosidade superficial do material mostrou-se um ponto desfavorável à utilização segura do ultra-som e da termografia em um dos casos analisados, enquanto que a shearografia mostrou-se aparentemente insensível ao problema.

Sumarizando, a correlação executada com as técnicas ultra-sônica termográfica fortaleceu as indicações de defeitos reais observadas pela shearografia, mas deve-se ainda levar em consideração alguns pontos:

- a) A identificação visual do defeito através da shearografia depende ainda de operador experiente;
- b) No atual estágio de desenvolvimento não se consegue ainda avaliar a severidade do defeito com base nas franjas de interferência.

Por estas razões, apesar dos bons resultados já apresentados, evidencia-se a necessidade da continuação das pesquisas. Devem ser buscados dispositivos e procedimentos dedicados à análise de falhas em juntas adesivadas de tubos compósitos. Diferentes algoritmos de processamento devem ser testados para que a imagens resultantes das análises com shearografia sejam, em um futuro próximo, facilmente interpretadas por qualquer usuário não especializado na área de óptica.

Referências bibliográficas

[1] ALBERTAZZI, A., MENICONI, L. C., WILLEMANN, D. P., et al. **Detecção de Falhas de Adesão entre Mantas Poliméricas e Dutos usando Interferometria de Deslocamento Lateral**. XXIV CONAEND, São Paulo – SP, Brasil, 2006.

[2] W. STEINCHEN, L. YANG. **Digital Shearography – Theory and Application of Digital Speckle Pattern Shearing Interferometry**. SPIE Press, Bellingham, Washington, USA (2003).

[3] Y. Y. HUNG, H. P. HO. **Shearography: An Optical Measurement Technique and Applications**. Materials Science and Engineering 49, 61-87, (2005).

[4] WILLEMANN, D. P., ALBERTAZZI, A. G., MENICONI, L. C. **Um sistema prático para identificação e localização de defeitos em revestimentos de materiais compósitos utilizando shearografia**. 9ª COTEQ- Conferência Internacional sobre Tecnologia de Equipamentos, Salvador - BA, Anais do COTEQ, v. 1. p. 1-10, 2007.