



IBP1043_06

DETECÇÃO DE FALHAS NA ADESÃO DE REVESTIMENTO DE MATERIAIS COMPOSTOS EM DUTOS UTILIZANDO A TÉCNICA DE SHEAROGRAPHY

Armando Albertazzi G. Jr.¹, Cláudio L. Meniconi²,
Daniel P. Willemann³, Raphael V. Bepler², Priscila B. Sfredo¹,
Rafael P. Ferreira¹, Élcio Devegili¹, Matías R. Viotti¹, Daniel Hofmann¹

Copyright 2006, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação na *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2006*, realizada no período de 11 a 14 de setembro de 2006, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Técnico do evento, seguindo as informações contidas na sinopse submetida pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho Técnico, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, seus Associados e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais da *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2006*.

Resumo

Devido à exposição ao ar, à umidade e a outros agentes corrosivos, os dutos de transporte na indústria de petróleo são frequentemente recobertos com materiais compostos como forma de aumentar a resistência à corrosão e/ou reforçar a resistência estrutural. Falhas existentes na adesão do revestimento ao duto, assim como entre camadas do revestimento, são prejudiciais ao duto uma vez que o surgimento de novos pontos de corrosão é facilitado e permanece oculto. Estas falhas de adesão são de difícil detecção, não visíveis a olho nu, e de grande impacto na eficiência à proteção anticorrosiva do revestimento. Este trabalho trata da utilização da técnica óptica de shearography para a detecção e localização destas falhas de adesão. Foi desenvolvido e testado um protótipo em laboratório que apresentou excelentes resultados, detectando vários tipos e tamanhos de falhas de adesão assim como foi verificada a aplicabilidade das diferentes formas de "carregamento" (mecânico, térmico e vácuo). Devido ao ótimo desempenho obtido em laboratório, foi desenvolvido um novo protótipo para realização de futuros ensaios em campo – plataforma de petróleo. Os primeiros resultados obtidos com este protótipo são apresentados no trabalho.

Abstract

Due to air exposure and other corrosive agents as humidity, petroleum industry pipelines are frequently recovered with composite material sleeves in order to increase the corrosion resistance and also for structural reinforcement. Defects in between the sleeves and the pipes' surface and also between the own layers of the composite sleeves (delaminations) represent a serious problem since the beginning of new corrosion focuses are facilitated and remain hidden. These hidden flaws decrease the efficiency of the protection sleeves and are really difficult to be detected. This work gives details about the employment of shearography, an optical Non-Destructive Testing technique, to detect and localize the flaws in the composite sleeve. A prototype of the inspection system has been developed and tested in laboratory. Excellent results have been attained considering the great difficulty to detect this sort of damage. Different kinds of loading (mechanical, thermal and vacuum) have been also experimented. Since excellent results have been obtained in laboratory conditions, a new prototype has been developed to in field try outs (Petroleum platforms). The first results and the conclusions about the technique and the different experimented loading types are presented in this work.

1. Introdução

A tendência crescente de uso de materiais compósitos em vários setores industriais tem demandado por técnicas de inspeção apropriadas para detectar falhas de diversas naturezas nestes materiais. Técnicas de inspeção convencionais como raios-X, ultra-som, métodos magnéticos ou líquidos penetrantes, pouca ou nenhuma resposta produzem nestes materiais. O desenvolvimento deste trabalho foi motivado por demanda concreta trazida pelo setor do petróleo, em busca de meios de verificar a efetividade de revestimentos aplicados na proteção e no reforço estrutural de dutos (Rust Engenharia). O texto inicia com uma descrição do princípio de funcionamento da técnica óptica e as formas

¹ UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC, albertazzi@labmetro.ufsc.br

² PETROBRAS

³ PHOTONITA LTDA., willemann@photonita.com.br

como pode ser usada para detectar defeitos em compósitos. Descreve o aparato experimental desenvolvido para testar e avaliar o desempenho da técnica. Finalmente, apresenta e discute os resultados obtidos e termina com uma reflexão sobre a aplicabilidade da técnica em campo.

2. Interferometria de Deslocamento Lateral – IDL

A técnica óptica de medição usada neste trabalho é referida na literatura internacional como shearography. Sem um termo correspondente em português, foi adotada a denominação Interferometria de Deslocamento Lateral, abreviada por IDL. A IDL é apropriada para medir derivadas dos campos de deslocamentos na superfície de interesse (Steinchen and Yang (2003), Rastogi (2001), Hung and Ho (2005), Hung (1999) e Santos *et al.* (2004)). Sua principal vantagem é a capacidade de operar fora do ambiente de laboratório.

Para medir com IDL é formada uma imagem dupla da região de interesse contendo deslocamento lateral. A Figura 1 mostra uma forma de obter a imagem dupla. Três espelhos são usados. O espelho de 45° é um espelho parcial (EP), isto é, reflete 50% da imagem. Os demais são totais, refletindo 100% da imagem. O espelho total da direita (E2) é ligeiramente inclinado, o que forma uma segunda imagem de um objeto, deslocada lateralmente. O deslocamento pode ser vertical, como o mostrado na figura, ou horizontal. A direção e a quantidade de deslocamento lateral geralmente são reguláveis por meio de ajustes e afetam a sensibilidade da medição com IDL.

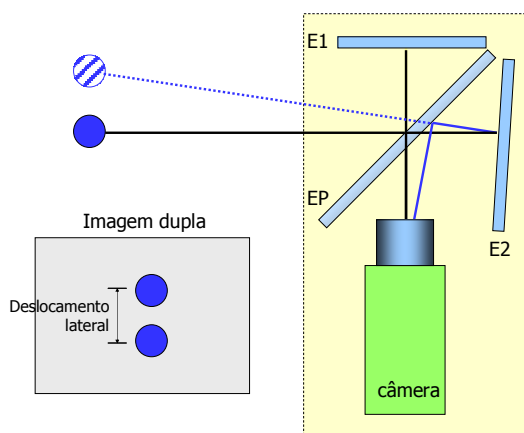


Figura 1. Formação de imagem dupla com deslocamento lateral por meio do cabeçote de medição

A iluminação da superfície a medir é realizada por laser, como mostra a Figura 2. Quando superpostas, as imagens deslocadas lateralmente interferem, provocando cintilações na imagem captada pela câmera da superfície a medir iluminada pelo laser. Ao aplicar um determinado carregamento sobre o objeto a medir, sua superfície se deforma, mudando o padrão de cintilação captado pela câmera. O processamento adequado das imagens obtidas antes e após a aplicação do carregamento mostra franjas de interferência, que surgem em função do campo de deformações desenvolvido sobre a superfície do objeto medido decorrentes do carregamento aplicado. As imagens são adquiridas e digitalmente processadas por um software de medição

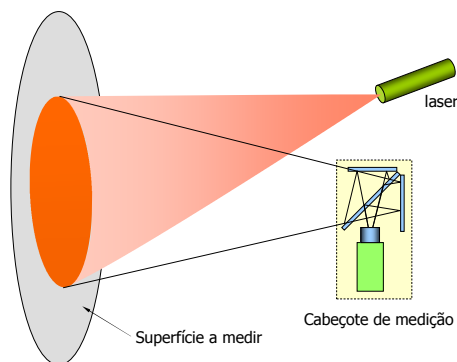


Figura 2. Configuração básica de um sistema IDL

3. Detecção de Falhas de Adesão

Falhas em materiais compósitos normalmente estão associadas a descontinuidades. Falta de adesão entre camadas de materiais compósitos ou entre estes e o material de base no qual estão revestindo, são dois exemplos. Para detectar falhas em materiais compósitos com IDL é necessário aplicar algum tipo de carregamento que gere na superfície do material descontinuidades no campo de deformações, que, por sua vez, geram descontinuidades nas franjas de interferência, que são visualmente percebidas.

Quatro diferentes tipos de carregamento podem ser aplicados para evidenciar os defeitos: mecânico, por vácuo, por aquecimento ou por ondas sonoras. A escolha da melhor forma de carregamento depende do tipo de material, tipo e extensão do defeito a detectar e de aspectos operacionais de cada caso. A seguir serão feitas considerações sobre cada forma de carregamento. Embora as técnicas de carregamento sejam aplicáveis para vários tipos de defeitos, a ênfase será dada na detecção de falhas de adesão entre revestimentos de materiais compósitos e o material de base.

3.1. Carregamento Mecânico

Ao aplicar um carregamento mecânico sobre materiais compósitos estes tendem a apresentar campos de deformações relativamente uniformes. A presença de um defeito, seja ele na ou sob a superfície do compósito, gera campos de deformações descontínuas, que são visualmente detectadas pela IDL. A Figura 4 ilustra um exemplo em que a aplicação de tensão trativa no material de base provoca um campo de deformações na superfície externa do material compósito. A presença de uma falha de adesão, representada por uma bolha na figura, faz com que as deformações nas vizinhanças do defeito sejam mais acentuadas do que nas regiões onde a adesão é perfeita.

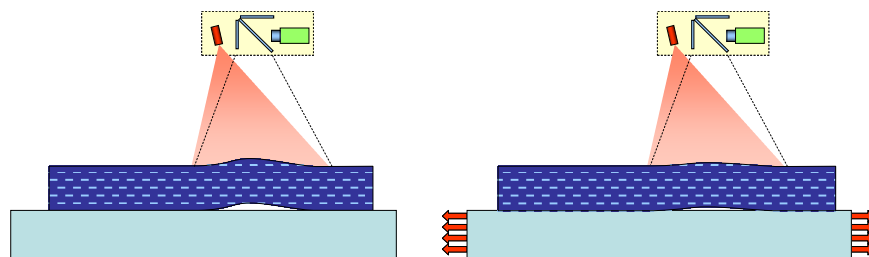


Figura 4. Detecção de falha de adesão por carregamento mecânico

3.2. Carregamento Térmico

Ao ser exposto a uma fonte de calor uniforme o material compósito tende a se expandir por dilatação térmica. O campo de deformações provocado pela temperatura é relativamente uniforme na ausência de defeitos. Entretanto, uma falha de adesão entre camadas ou entre um revestimento compósito e o material de base provoca descontinuidades no campo de deformações. A Figura 5 ilustra o campo de deformações acentuado que se forma nas vizinhanças de uma região onde há falha de adesão entre o material de base e a manta de material compósito. Nas regiões onde há boa adesão a deformação da manta de material compósito é governada pelo material de base e tende a permanecer mais uniforme. A falha de adesão “liberta” localmente o material compósito para expandir de maneira mais livre e mais intensa, uma vez que este possui coeficiente de dilatação térmica maior que o material de base. A presença de bolhas de ar possui um efeito secundário sobre o fluxo de calor, aumentando localmente o isolamento térmico, o que aumenta localmente a temperatura, intensificando as deformações térmicas. O aquecimento pode ser feito por radiação através de uma lâmpada de alta potência, como é o caso ilustrado na figura, ou pela ação direta de um fluxo de ar quente como o produzido por um secador de cabelo. Normalmente poucos segundos de aquecimento são suficientes.

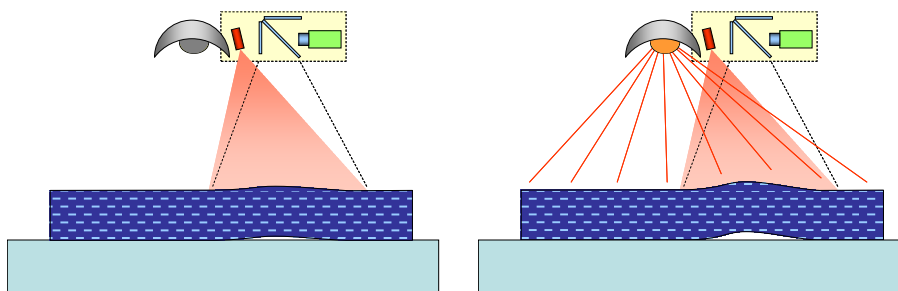


Figura 5. Detecção de falha de adesão por carregamento térmico

3.3. Carregamento por Vácuo

A aplicação de vácuo no ambiente onde está o material compósito tende a expandir as bolhas de ar contidas em eventuais defeitos ou falhas de adesão, o que provoca deformações localizadas que se propagam até a superfície. Este efeito gera descontinuidades no campo de deformações na superfície medida, que são detectadas pela IDL. A Figura 6 mostra uma forma possível de aplicação de pressão negativa e visualização da superfície do compósito através de uma janela de vidro. Uma moldura de borracha pode ser usada para manter uma boa vedação.

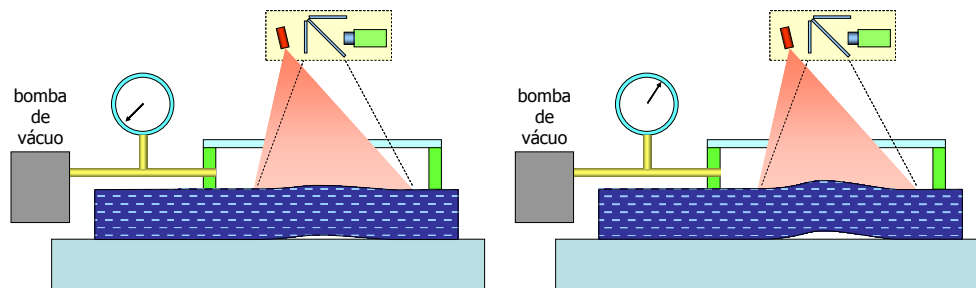


Figura 6. Detecção de falha de adesão por carregamento por vácuo

3.4. Excitação Acústica

Alguns defeitos presentes nas mantas de materiais compósitos podem ser detectados através de excitação acústica. As regiões vizinhas a uma falha de adesão se comportam mais ou menos como uma membrana. Ao ser excitada na sua frequência de ressonância, a membrana vibra de forma muito intensa. Através de um processamento adequado das imagens, é possível obter franjas associadas à amplitude de vibração, o que denuncia visualmente a existência de um defeito. Para encontrar a frequência de ressonância é necessário varrer a superfície medida com diferentes frequências e observar em tempo real o eventual aparecimento de não homogeneidades no campo de deformações medido por IDL. A excitação pode ser feita por contato através de atuadores piezoelétricos ou sem contato usando alto-falantes, como mostra a Figura 7.

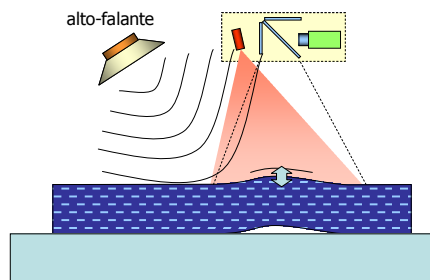


Figura 7. Detecção de falha de adesão por excitação acústica. A região do defeito vibra como uma membrana quando é excitada na sua primeira frequência de ressonância

4. Aparato Experimental

O sistema de IDL desenvolvido no âmbito deste trabalho é composto por três módulos funcionais: o módulo de iluminação (laser), o cabeçote de medição e o módulo de processamento de imagens.

4.1. Módulo de Iluminação

O módulo de iluminação é formado por um laser HeNe com 10 mW de potência e lentes que expandem o feixe para atingir a região de interesse sobre a superfície a medir. Para manter a flexibilidade necessária a testes com diferentes opções de iluminação, o módulo de iluminação foi acomodado em um tripé independente, mostrado na parte direita da Figura 8. Futuramente será usado laser diodo no módulo de iluminação para dar maior portabilidade ao sistema.

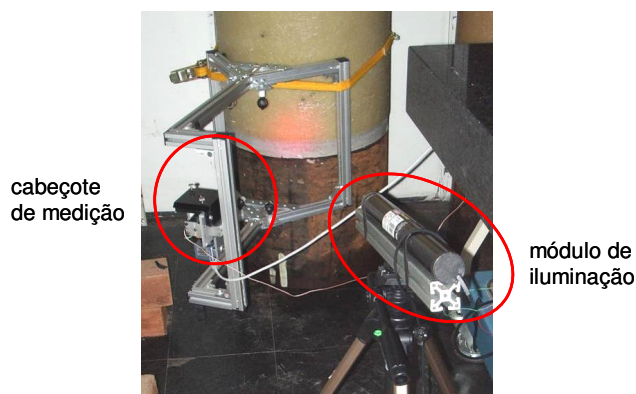


Figura 8. Aspecto real do sistema de IDL de laboratório desenvolvido e utilizado neste trabalho

4.2. O Cabeçote de Medição

O cabeçote de medição, mostrado na Figura 9, contém uma câmera de TV de alta resolução, uma lente objetiva, três espelhos planos e dispositivos mecânicos para fixar os componentes e promover o desalinhamento de um espelho total de forma regulável para controlar a intensidade e direção do deslocamento lateral da imagem. O sistema contém ainda um atuador piezelétrico que move o espelho inferior de incrementos controlados para aplicar o deslocamento de fase e melhorar a visibilidade das franjas.

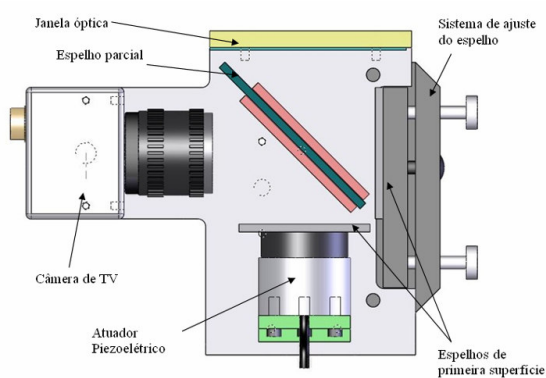


Figura 9. Cabeçote de Medição

4.3. Módulo de Processamento de Imagens

O módulo de processamento de imagens é baseado em um computador pessoal equipado com interface Firewire. Um software básico de medição foi desenvolvido e a Figura 10 mostra um exemplo de imagem obtida pelo software com a qual é muito fácil identificar a existência de defeitos.

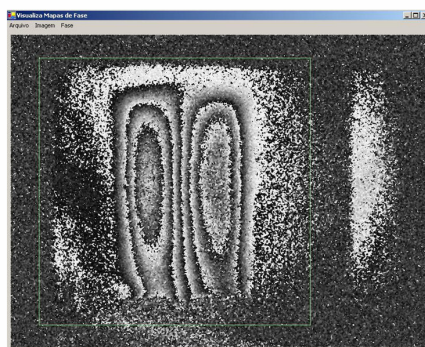


Figura 10. Exemplo de imagem de IDL obtida pelo programa de medição

4.4. Corpos de Prova

Dois corpos de prova tubulares foram utilizados nos ensaios. Ambos foram construídos a partir de tubos de diâmetro 500 mm (20") e cerca de 1600 mm de comprimento. Um dos corpos de prova recebeu quatro camadas de manta polimérica e o outro 26, resultando em mantas com 4 e 26 mm de espessura respectivamente. A manta de 4 mm é tipicamente usada para proteção contra corrosão, enquanto a manta de 26 mm é usada como reforço estrutural para dutos já debilitados.

Para ambos os corpos de prova, alguns “defeitos” foram artificialmente produzidos a partir da introdução de filmes duplos de polietileno entre a manta e a superfície do duto e entre camadas da própria manta. Desta forma, foram simuladas seis falhas de adesão de diferentes dimensões e localizações nos dois tipos de mantas. A Figura 11 apresenta o aspecto visual dos corpos de prova e os detalhes da forma e localização dos defeitos no corpo de prova com manta de 4 mm.

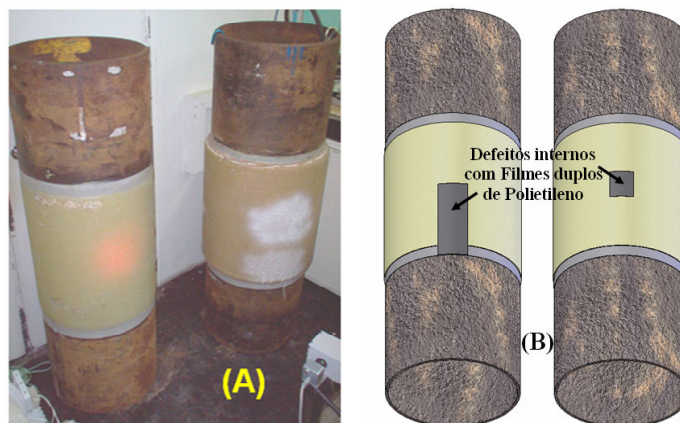


Figura 11. (A) Corpos de prova tubulares: manta de 4 mm (esquerda) e 26 mm (direita);
(B) Defeitos presentes no corpo de prova com manta de 4mm: Defeito 1 (esquerda) e Defeito 2

O defeito denominado de “1” foi provocado por uma folha dupla de polietileno no formato retangular e com dimensões de 110 x 304 mm², mantida em contato com a superfície do duto. O defeito “2”, situado a 180° do primeiro defeito, foi provocado por uma folha dupla de polietileno no formato quadrado e com dimensões de 107 x 107 mm².

5. Resultados

5.1. Corpos de Prova com Manta de 4 mm

A detecção dos defeitos no corpo de prova de manta de 4 mm aconteceu de forma muito nítida por todos métodos de carregamento. Em todos os casos, o cabeçote de medição foi regulado para aplicar um deslocamento lateral horizontal das imagens de 25 mm.

(a) Defeito 1 (retangular): A Figura 12 mostra as franjas obtidas em função da aplicação dos três tipos de carregamento.

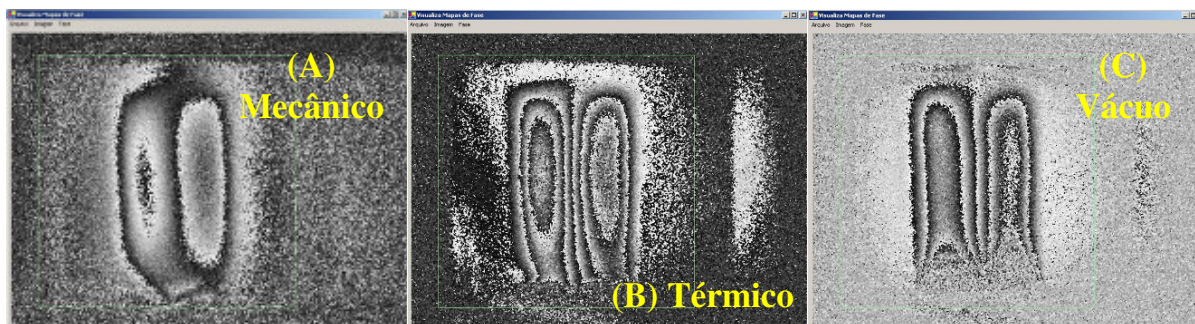


Figura 12. Franjas formadas na região do defeito 1 decorrentes dos diferentes carregamentos

Já a Figura 13 mostra um recurso do software de medição que permite melhorar a visibilidade da região do defeito. A imagem da direita foi obtida a partir da imagem da esquerda após a remoção das deformações médias da imagem, que podem ser chamadas de franjas “parasitas”. As franjas resultantes mostram um gradiente típico de uma “bolha”, com inclinações positivas do lado esquerdo e negativas do lado direito. A forma e as dimensões do defeito próximas das dimensões nominais dos defeitos, sendo observadas diferenças máximas inferiores a 3 cm.

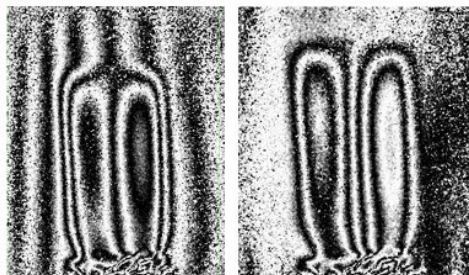


Figura 13. Franjas formadas na região do defeito 1. À esquerda a imagem bruta. À direita, a mesma imagem após a remoção da deformação média.

(b) Defeito 2 (quadrado): A presença do defeito também foi claramente evidenciada com todas as formas de carregamento. A Figura 14 mostra as franjas obtidas em função da aplicação do carregamento térmico com a lâmpada de 1000 W.

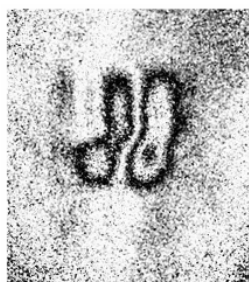


Figura 14. Franjas formadas pelo defeito 2 evidenciadas por carregamento térmico (com deformação média removida)

5.2. Corpos de Prova com Manta de 26 mm

O corpo de prova de manta de 26 mm possui quatro defeitos simulados e todos os defeitos também foram identificados durante os experimentos realizados. No entanto, por ser uma manta com maior espessura, a visualização dos defeitos é feita com maior dificuldade.

6. Conclusões

(a) Quanto às formas de carregamento: O carregamento mecânico resultante da aplicação de forças no interior do duto só é realizável em laboratório. Entretanto, como os níveis de carga são muito baixos, acredita-se que há grandes chances de sucesso se o carregamento mecânico for aplicado através de uma carga de compressão diametral de fora para dentro, o que viabiliza a aplicação do carregamento mecânico em campo. O carregamento térmico é operacionalmente mais simples de ser aplicado, especialmente fora do ambiente de laboratório e é a forma mais recomendada. O carregamento a vácuo é de grande efetividade, mas não é tão prático para aplicação em campo e as janelas de vidros devem ser produzidas de forma geometricamente compatível com a estrutura a medir.

(b) Quanto à detecção dos defeitos no corpo de prova com manta de 4 mm: Os dois defeitos foram claramente detectados por todos os métodos de carregamento. A partir da extensão da região com descontinuidades nas franjas é possível delimitar a extensão da região com defeito com incertezas de 2 a 3 cm. O sistema mostra-se perfeitamente viável para detecção de falhas de adesão em aplicações onde a manta é usada para proteção contra corrosão.

(c) Quanto à detecção dos defeitos no corpo de prova com manta de 26 mm: A capacidade de o sistema detectar defeitos na presença de uma manta tão espessa é limitada quando os carregamentos térmicos e mecânicos experimentados são usados. Resultados com carregamento por vácuo apresentaram melhores resultados. Defeitos muito pequenos (abaixo de 100 x 100 mm²) são de difícil detecção quando estão próximos da superfície do duto, isto é, são muito profundos. Sua

detecção torna-se mais clara quando os defeitos se situam em posições mais próximas da superfície externa da manta. A detecção de defeitos em mantas espessas é possível, mas limitada a defeitos grandes ou mais próximos da superfície externa da manta.

(d) Quanto ao desempenho do sistema desenvolvido: O uso do recurso do deslocamento de fases melhorou consideravelmente a qualidade das imagens, enriquecida pela possibilidade de animação das franjas. A qualidade obtida foi suficiente para a visualização clara dos defeitos na maioria dos casos. O recurso de remoção das “franjas parasitas” causadas pela deformação média mostrou-se muito útil para acentuar a percepção da região com falha de adesão.

A disposição dos cabeçotes de medição em tripés proporcionou grande flexibilidade e conveniência para aplicação em laboratório, permitindo facilmente o direcionamento do sistema para examinar diferentes áreas de interesse. No entanto, está claro ser possível integrar o sistema de iluminação com laser diodo no próprio cabeçote de medição, viabilizando o desenvolvimento de um sistema portátil para o uso em campo.

(e) Prestação de serviços de inspeção: Motivados pelos resultados positivos deste trabalho está sendo estruturada na empresa Photonita (www.photonita.com.br) uma unidade para prestação de serviços de inspeção em compósitos.

7. Agradecimentos

Os autores agradecem o forte apoio recebido da Petrobrás/Cenpes, do programa da ANP PRH-034, da CAPES e do CNPq, que tornaram possível a realização deste trabalho.

8. Referências

- CASTELLINI, P., WILLEMANN, D. P., REVEL, G. M. Application of Laser Doppler Vibrometry for Structural Diagnostics on Composite Panels. Proceedings of the IMAC XXIII – A Conference & Exposition on Structural Dynamics, SEM, Miami - USA, 371-378, ISBN: 0912053895, 2005.
- HUNG, Y. Y., HO, H. P., Shearography: An optical measurement technique and applications. Materials Science and Engineering 49, 61-87, 2005.
- HUNG, Y.Y., Applications of digital shearography for testing of composite structures, Composites: Part B 30, 765-773, 1999.
- LEISSA, A. W. Vibration of Plates. NASA SP-160. Ohio State University, Columbus, Ohio, 1969.
- RASTOGI, P. K., Measurement of static surface displacements, derivatives of displacements and three-dimensional surface shapes. Examples of applications to non-destructive testing, Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques, P. K. Rastogi, Ed., p. 142-224, Wiley, New York, 2001.
- RUST ENGENHARIA LTDA., <http://www.rust.com.br>. Visitado em 06 de junho de 2006.
- SANTOS, F., VAZ, M., MONTEIRO, J. A new set-up for pulsed digital shearography applied to defect detection in composite structures, Optics and Lasers in Engineering 42,p. 131-140, 2004.
- STEINCHEN, W., YANG, L., Digital Shearography – Theory and Application of Digital Speckle Pattern Shearing Interferometry. SPIE Press, Bellingham, Washington, USA, 2003.