

CONAEND&IEV2012 - 054

**INSPEÇÃO DE DEFEITOS EM REVESTIMENTOS DE MATERIAIS COMPÓSITOS
APLICADOS EM TANQUES METÁLICOS UTILIZANDO SHEAROGRAFIA**

João Paulo F. M. de Souza¹, Daniel P. Willemann², Armando Albertazzi³,
Sergio Damasceno Soares⁴, Anderson Pacheco⁵

Sinopse

Ao buscar maior produção, diminuição de custos e melhor atendimento aos requisitos de segurança operacional, o crescente panorama da indústria nacional do petróleo vem investindo ao longo dos anos em pesquisa e desenvolvimento em novas técnicas de inspeção de suas estruturas. Assim, gera-se um grande desafio para os especialistas da área para atender tais necessidades. Este trabalho apresenta os primeiros passos para o desenvolvimento de um sistema de inspeção óptica de revestimentos internos em material compósito aplicado em fundos e costados de tanques metálicos para armazenamento de petróleo e seus derivados. A shearografia é a técnica de medição óptica utilizada, onde esta, através de módulos de formação de imagem, iluminação e carregamento, é capaz de detectar imperfeições internas no material inspecionado. Foi confeccionado um corpo de prova simulando uma parede interna de tanque, com revestimento em material compósito, portando defeitos artificiais implantados. Um sistema protótipo com capacidade de medição de grandes áreas foi projetado e fabricado. Ensaios em laboratório e em campo foram realizados. Nos ensaios em laboratório foi possível identificar os defeitos inseridos artificialmente no corpo de prova. No ensaio em campo foi possível identificar defeitos desconhecidos no revestimento. Os resultados obtidos neste trabalho encorajam fortemente a futura prestação de serviços em escala comercial na área de inspeção de compósitos no setor do petróleo.

Palavras-chave: Revestimentos Anticorrosivos, Tanques para Armazenamento de Petróleo, Material Compósito, Interferometria Óptica, Shearografia, Inspeção não-destrutiva.

1. Introdução

As indústrias do petróleo e derivados têm mostrado interesse crescente na aplicação de revestimentos anticorrosivos constituídos a base de materiais compósitos. Resinas reforçadas com fibras de vidro ou carbono estão entre os materiais compósitos mais utilizados para revestir interiores e exteriores de tanques, dutos e tubulações. Em sua aplicação geram-se com certa frequência defeitos como bolhas de ar, falta de adesão, quantidade insuficiente de resina, delaminações e inclusões [1] [2].

Como técnicas de detecção de regiões defeituosas, as mais usadas nos dias de hoje são a inspeção visual e a técnica da percussão. Esta última consiste em identificar regiões defeituosas a partir do som de “algo oco” em resposta a uma pequena percussão da região inspecionada. Busca-se uma forma mais confiável, repetitiva e menos dependente das habilidades do inspetor para identificar regiões defeituosas [1] [2].

Denominada por shearografia, a técnica óptica interferométrica tem sido intensamente usada com sucesso para detectar defeitos em materiais compósitos nas indústrias aeroespaciais e

navais. Até o presente, pouco tem sido aplicado nas indústrias do petróleo, petroquímica e química [3].

Utilizando esta técnica, a presença de defeitos é denunciada por anomalias nos mapas de franjas de interferência resultantes da resposta do material compósito à aplicação de um carregamento externo, normalmente térmico [4].

A inspeção de revestimentos protetores de materiais compósitos aplicados em tanques de armazenamento de petróleo é uma operação importante. Falhas de adesão podem resultar no rompimento do revestimento e acelerar o processo de corrosão da parede metálica do tanque, o que reduziria sua vida útil, podendo ocasionar ruptura e vazamentos desastrosos [5].

É importante que sejam realizadas inspeções eficientes logo após a aplicação do revestimento, comprovando sua integridade e inspeções posteriores rápidas com periodicidade compatível com as paradas de manutenção naturais [5].

A otimização de um sistema comercialmente aplicável, com tempo de inspeção atrativo, caberia como uma excelente alternativa para ensaios não destrutivos em estruturas aqui descritas.

2. Shearografia

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 defeitos em revestimentos anticorrosivos de compósitos. As concentrações de franjas, destacadas na figura pelas elipses, indica a presença de pequenas falhas de adesão entre chapa de aço e revestimento no fundo de um tanque de armazenamento.

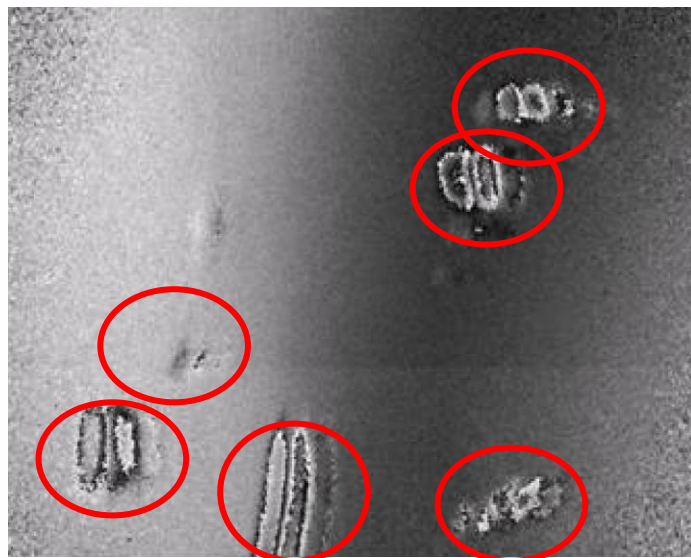


Figura 1- Resultado obtido com shearografia em fundo de tanque

Um sistema de shearografia é composto principalmente pelos seguintes módulos: formação de imagens (Cabeçote), iluminação e carregamento. Na figura 2 mostra-se o módulo de formação de imagens composto basicamente por uma câmera digital de alta resolução associada a alguns elementos ópticos, o módulo de iluminação com *laser* e a superfície em análise onde é aplicado o carregamento externo.

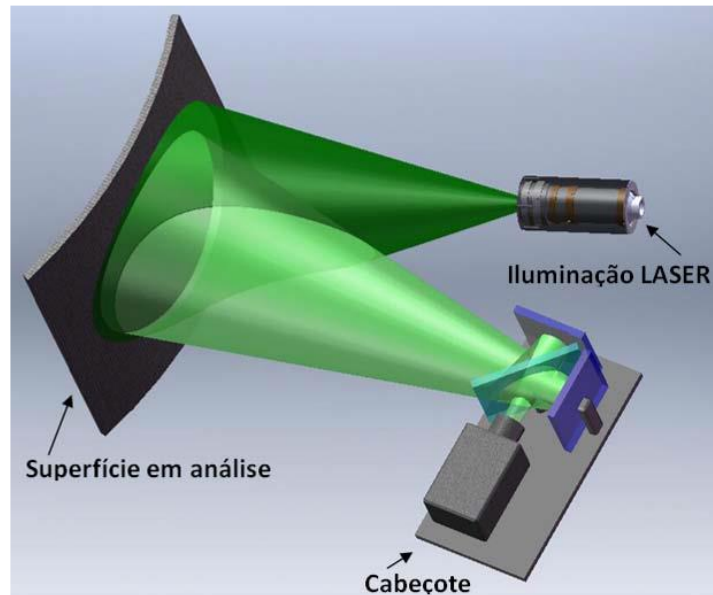


Figura 2- Configuração básica de um sistema de shearografia

O tipo de carregamento externo a ser utilizado depende essencialmente da estrutura a ser analisada e pode ser térmico, por vácuo, por pressão interna e até vibracional [3] [4].

O procedimento de inspeção por shearografia consiste em três passos fundamentais para a obtenção da imagem com o resultado [6]:

- 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.

3. Adaptação do Sistema de Shearografia para Inspeção de Grandes Áreas

Os sistemas de shearografia utilizados no Laboratório de Metrologia e Automatização (LABMETRO) da Universidade Federal de Santa Catarina até então foram projetados para inspeção de áreas relativamente pequenas, com dimensões não maiores que (300 x 300) mm².

Como tanques de armazenamento de petróleo e derivados têm dimensões largamente superiores àquelas atualmente encontradas em conexões de tubulações do tipo ponta e bolsa, foi necessário um novo projeto do sistema a fim de aumentar seu campo de visão para aproximadamente 1 m².

Esta seção abordará primeiramente os tanques de forma a contextualizar a aplicação da shearografia na inspeção de revestimentos aplicados a estas estruturas. Em seguida serão abordados os requisitos básicos de projeto e o sistema de inspeção por shearografia utilizado para a inspeção de grandes áreas.

3.1 Tanques

Os tanques de armazenamento de petróleo podem ter dimensões que chegam em torno de 100 metros de diâmetro e alturas que chegam em torno de 20 metros. Os tanques podem ser de diversos tipos: tanques de teto flutuante, tanques de teto fixo, tanques subterrâneos, entre outros [7].

Os tanques são construídos a partir de chapas calandradas soldadas de diversos tipos de aços, ASTM A 36, ASTM A 131, ASTM A 283, ASTM A 285 [7], além de outros tipos de aços utilizados de acordo com sua aplicação e espessura necessária para compor a estrutura do tanque.

A estrutura do tanque é composta por anéis de chapas soldadas, cujas chapas podem ter dimensões de 1500 mm a 2440 mm por 6000 mm até 12000 mm, e espessura de 4,75 mm até 50,4 mm. Um tanque pode ter seis anéis para compor a altura aproximada de 14,6 metros. Quanto mais superior a posição do anel, menor poderá ser a espessura da chapa. Por exemplo, um tanque de seis anéis, pode ter o anel base de 38,1 mm de espessura e o sexto anel com 6,3 mm [8] [9].

As dimensões estruturais do tanque são determinadas pelos métodos “*ponto variável*” ou “*1 ft*” ambos explicados em [7].

Os tanques podem ser revestidos internamente por materiais compósitos ou tintas para proteção contra a corrosão. Alguns podem ser completamente revestidos segundo [10] ou podem ter somente o primeiro anel e o fundo revestido por material compósito para evitar corrosão proveniente de água decantada do petróleo acumulada em fundo de tanque [7] [11].

Os defeitos mais comuns encontrados nos revestimentos são as delaminações. Estas podem surgir em função da falta de adesão entre o revestimento e o aço. A falta de adesão pode ser ocasionada pela má aplicação do revestimento ou por geração de microfissuras ao longo do tempo de uso, onde o fluido pode infiltrar-se, ocasionando um descolamento entre os mesmos. Por isso deve-se checar a adesão do revestimento ao aço logo após a sua aplicação e com certa periodicidade ao longo do tempo de uso.

3.2 Requisitos

Os requisitos básicos de projeto do novo sistema são:

- Módulo de formação da imagem:
 - Campo de visão abrangendo aproximadamente 1 m², boa resolução e qualidade de imagem em altas taxas de aquisição com capacidade de detecção de defeitos de maior dimensão.
- Módulo de iluminação:
 - Maior densidade de potência e ampliação da área iluminada para 1 m². Boa distribuição de iluminação ao longo da área de inspeção. *Laser* de alto comprimento de coerência e estável.
- Módulo de carregamento:
 - Módulo de fácil aplicação, comando e de fácil mobilidade.
- Módulo de Suporte e Fixação:
 - Capacidade de suporte de carga em superfícies características de resina com fibra de vidro de aproximadamente de 5 kg.

3.3 Sistema de Shearografia para Inspeção de Grandes Áreas

O módulo formação de imagens apresenta a dimensão de 60 mm x 70 mm x 50 mm e massa de 0,350 kg. Com este módulo foi possível um campo de visão de (540 x 720) mm² distante 1 m do corpo de prova.

O módulo de iluminação tem a função de iluminar a superfície em análise com uma fonte de luz coerente (*laser*). Para gerar uma iluminação de uma área de aproximadamente (1,5 x 1,5) m² de diâmetro, é preciso utilizar lentes de expansão. O *laser* utilizado é do tipo *diode-pumped solid-state* (DPSS), com comprimento de onda de 532 nm. Para ampliação da iluminação do sistema foram utilizadas conjuntos de lentes expansoras.

O módulo de carregamento é o responsável por aplicar o carregamento externo no corpo de prova ou na superfície em teste. O tipo de carregamento usado é o térmico, onde o corpo de prova sofre um pequeno aquecimento por meio de uso de uma lâmpada halógena.

Foi utilizada uma lâmpada halógena de 500 W com refletor de alumínio sendo esta suficiente para aquecer uma área de 1,0 m² em um curto espaço de tempo. O tempo de duração do carregamento é um fator importante para ensaios com shearografia e pode variar de 3 a 60 segundos.

Para viabilizar a inspeção de grandes áreas foram usados tripés para suporte do equipamento com opção de uso de ventosas para fixação. O tripé tem capacidade de carga de 7 kg com sistemas de ventosas capazes de suportar sua carga máxima. Todo o sistema pode ser visualizado na Figura 3.

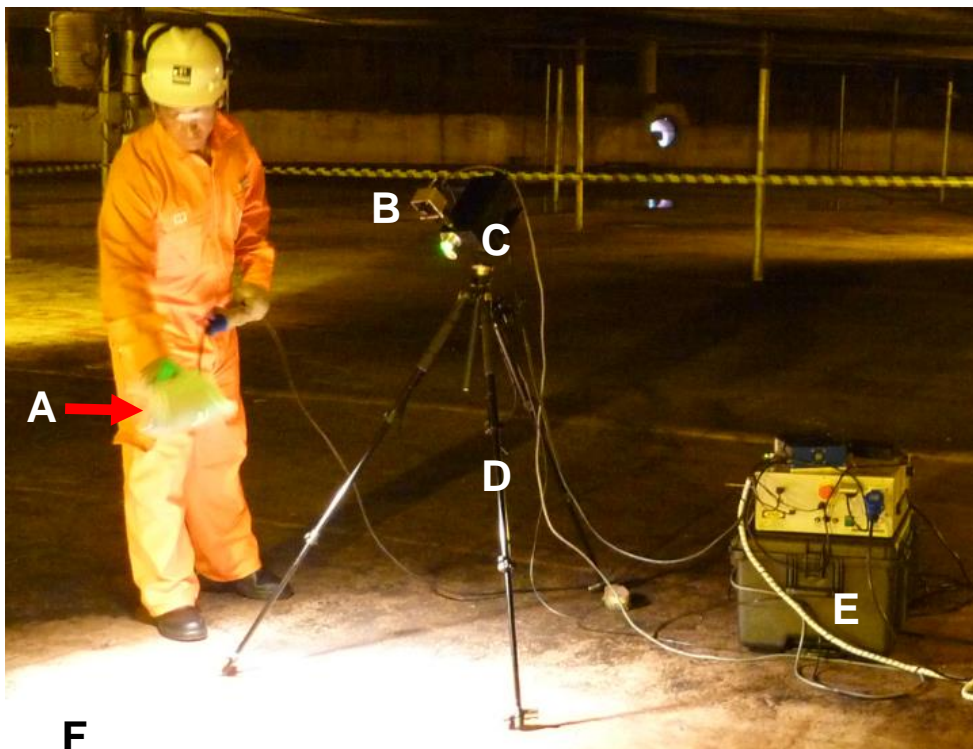


Figura 3 - Sistema de inspeção para grandes áreas: (A) Carregamento térmico por lâmpada halógena, (B) Módulo de formação de imagens, (C) Módulo de iluminação por *Laser*, (D) Módulo de fixação e suporte por tripé, (E) Módulo de aquisição de dados, (F) Superfície em análise.

4. Corpo de Prova

O corpo de prova foi concebido para simular região de costado de um tanque com raio de 10 metros. Tem a dimensão de (1,5 x 1,5) m², espessura de 6,35 mm (¼ de polegada) e é composto de aço ASTM A36. O revestimento foi aplicado na superfície côncava [7] [9] [12]. A Figura 4 apresenta o corpo de prova com.



Figura 4 – Corpo de prova com defeitos artificiais

Nas figuras 5 e 6 é demonstrada a disposição das camadas do revestimento, onde cada camada tem aproximadamente 0,5 mm de espessura. O revestimento é composto por matriz éster vinílica e fibra de vidro.



Figura 5 – Sequência de camadas do revestimento

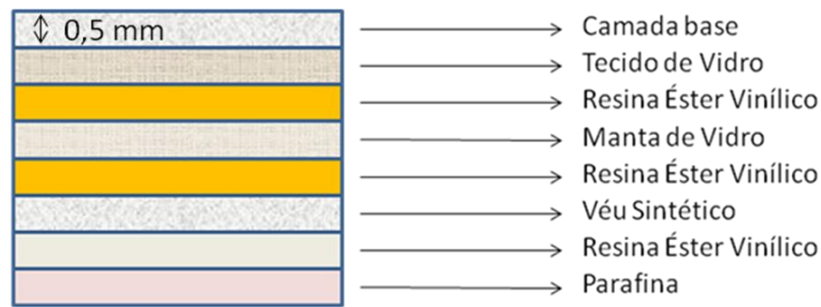


Figura 6 – Especificação das camadas

Na Figura 7 os defeitos são especificados de “a” a “l”. Os defeitos *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *j* e *f* simulam descolamentos entre revestimento e chapa de aço. Os defeitos *h*, *i*, *k*, e *l* representam delaminações entre as camadas em meia espessura. O defeito “g” representa ausência total do revestimento. A tabela 1 apresenta o quadro resumo das características o corpo de prova.

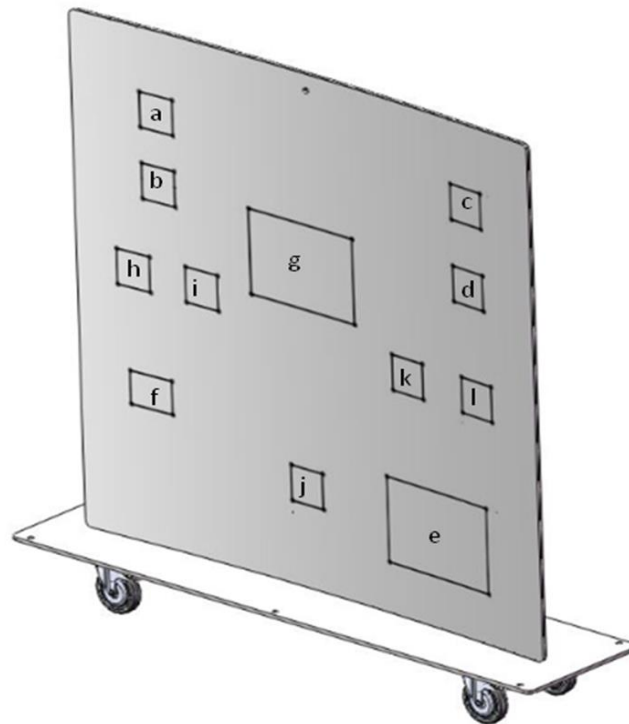


Figura 7 – Corpo de prova com especificação dos defeitos

Tabela 1 – Especificação do corpo de prova

Dimensões do corpo de prova (base de aço)	1500 mm x 1500 mm x 6,35 mm
Espessura do revestimento	3,5 a 4,5 mm
Aço	ASTM A 36
Revestimento	Éster Vinílico, Fibra de vidro
Número de defeitos	12
Números de Camadas	10
Massa	180 kg

5. Avaliação Experimental

A avaliação experimental foi dividida em duas etapas: avaliação em laboratório utilizando o corpo de prova especificado na seção 4 e ensaios em campo em um tanque de armazenamento de petróleo com revestimento em material compósito no fundo e costado na altura de 1 m.

5.1 Ensaio em Laboratório

Para o carregamento externo foi utilizada uma lâmpada halógena de 500 W colocada a 500 mm do corpo de prova. O pulso térmico teve duração de 8 segundos. O módulo de formação de imagens foi posicionado a 1,3 m do corpo de prova, distância grande o suficiente para que o sistema o visualize quase por inteiro, como mostrado na Figura 8.

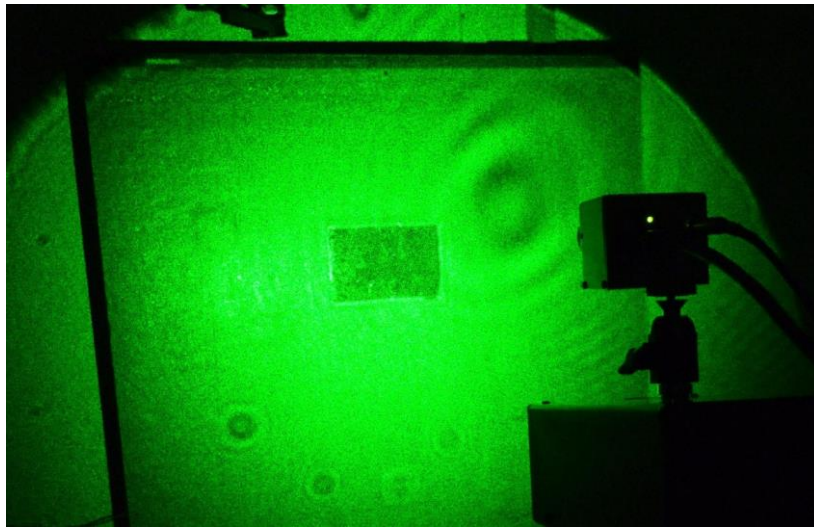


Figura 8 – Ensaio em laboratório

Após a aplicação do ensaio, obteve-se o resultado mostrado na Figura 9.

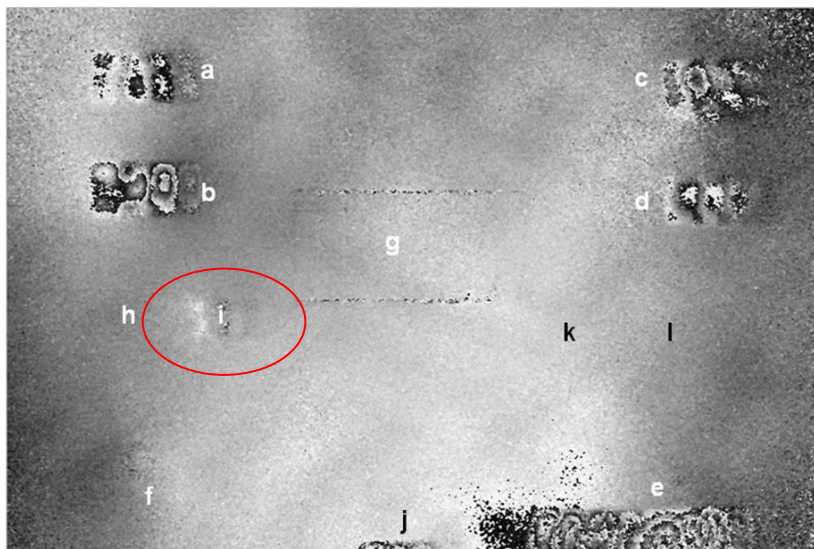


Figura 9 – Resultado do ensaio em laboratório

A imagem da Figura 9 revela de maneira explícita a presença de seis defeitos implantados. Os defeitos visualizados por meio da concentração de franjas são os defeitos, *a*, *b*, *c*, *d*, *e* e *j*. Estes são aqueles aplicados sobre o aço, simulando delaminações. Estes defeitos são mais fáceis de serem identificados, pois o acúmulo de energia térmica nas regiões destes defeitos é maior, proporcionando maiores deformações.

A porção aderida do revestimento dilata-se menos do que a porção descolada. Uma curta duração de carregamento térmico já é o suficiente para gerar formação de franjas ao inspecionar os mesmos.

O defeito circulado em vermelho é o defeito *i* que pode ser identificado apesar de não apresentar formação de franjas. Este defeito está entre camadas do revestimento. Desta maneira, sua deformação não é tão acentuada em relação às regiões ao seu redor.

Os defeitos *h*, *k* e *l*, também estão entre camadas e não foram identificados pelo ensaio. A aplicação de um carregamento térmico de duração maior ou de modo pulsado e a utilização de um sistema de maior velocidade de aquisição dos mapas de fase (câmera com maior taxa de aquisição associada à aquisição temporal) podem ser boas alternativas para identificação dos defeitos, pouco e não visualizados neste teste. Esta alternativa não foi realizada por este trabalho.

5.2 Ensaios em Campo

Os ensaios em campo foram realizados em um tanque de armazenamento de petróleo com teto flutuante, durante a sua parada de manutenção. Foram inspecionadas seções do tanque na região revestida sobre o fundo e o costado.

O tanque de teto flutuante possui 86 metros de diâmetro, 14,6 metros de altura, 6 anéis de aço ASTM A 283 Gr. C, sendo o primeiro anel com 38,1 mm de espessura e sexto anel com 9,5 mm de espessura [7] [9].

Possui revestimento de 3,5 mm de espessura, em material compósito de resina éster vinílica com fibra de vidro em todo fundo do tanque e no costado até a altura de 1 metro no primeiro anel. A Figura 10 mostra a vista externa do tanque. A área interna do fundo do tanque é de aproximadamente 5808 m² com capacidade de armazenamento de 85510 m³, equivalente a 500 mil barris.



Figura 10 – Tanque de armazenamento de petróleo

5.2.1 Procedimento de Inspeção Adotado

O seguinte procedimento foi adotado para o teste em campo:

- Seleção da área de inspeção
- Limpeza e marcação da área de inspeção.
- Montagem e posicionamento do sistema na área de inspeção.
- Configuração dos parâmetros de imagem (foco, ganho, área iluminada pelo *laser*).
- Configuração dos parâmetros do *software*.
- Aplicação do carregamento térmico com lâmpada de 500 W situada à distância de 0,5 a 1 metro da superfície.
- Aquisição automática das imagens.
- Análise dos resultados obtidos e verificação da presença de defeitos.

5.2.2 Inspeção de Fundo de Tanque

Foram selecionadas aleatoriamente as áreas para executar a inspeção. Na Figura 11 mostra-se o ambiente de inspeção onde foi executado o ensaio sobre o fundo de tanque.

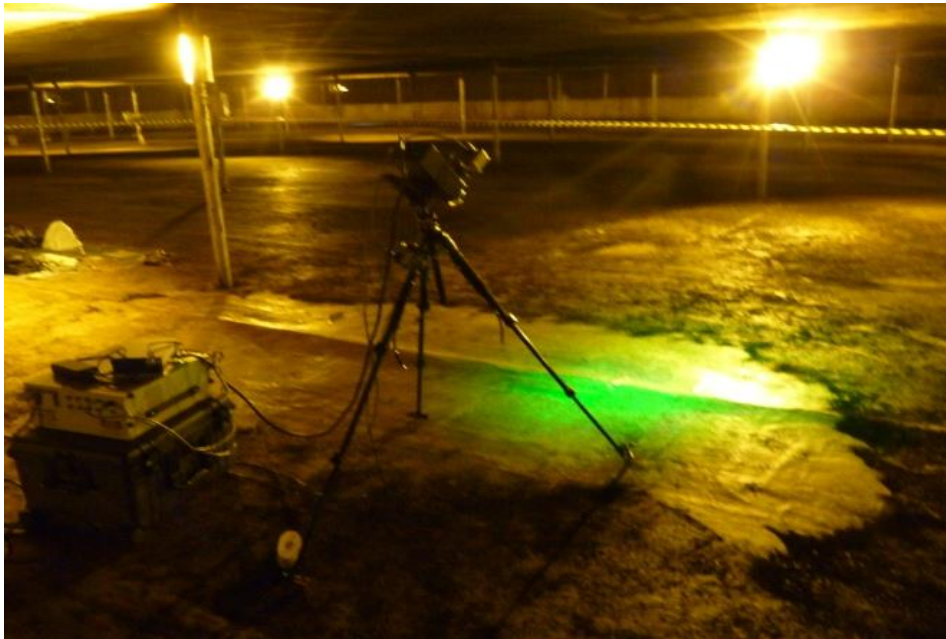


Figura 11 – Inspeção de fundo de tanque

Na Figura 12 mostra-se o resultado de uma inspeção de uma seção do fundo do tanque onde é possível visualizar três defeitos indicados pelas elipses vermelhas: o maior de 500 mm x 90 mm, o médio de 120 mm x 50 mm e o menor de 40 mm x 50 mm. As dimensões da área inspecionada são de 1200 mm x 700 mm, obtidas com o sistema situado a uma distância de 1300 mm da superfície, medida a partir da lente objetiva.

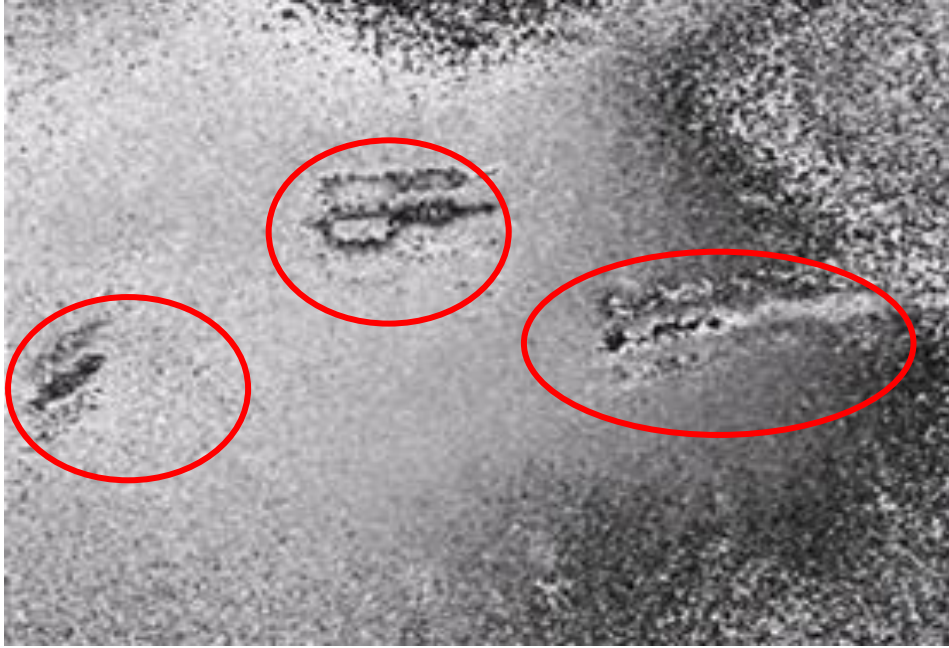


Figura 12 – Resultado de inspeção de fundo de tanque - área de (1200 x 700) mm²

5.2.3 Inspeção de Costado de Tanque

Na Figura 13 mostra-se a região de costado revestida por material compósito onde foi executado o ensaio.



Figura 13 – Área de inspeção em de costado de tanque

Na Figura 14 é visualizado o resultado obtido nesta área. Este defeito possui dimensões aproximadas de 1000 mm x 400 mm e seus limites foram desenhados sobre o revestimento com o auxílio de marcador industrial, indicado na figura pela elipse vermelha.

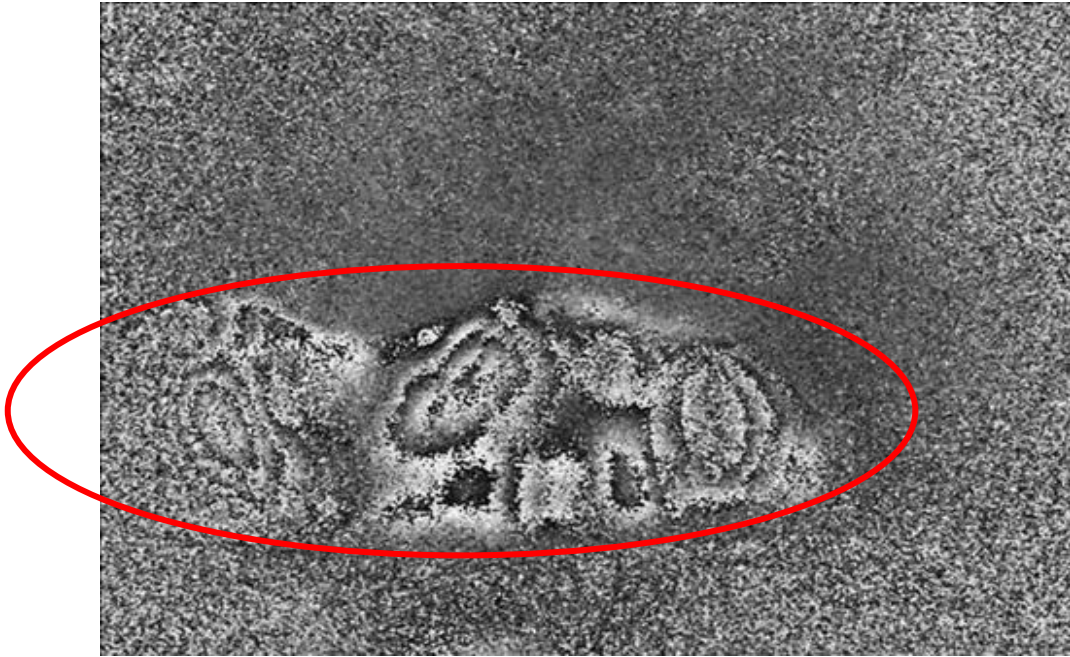


Figura 14 – Resultado de inspeção de área em costado

6. Conclusão

O sistema de medição otimizado para ensaios de grandes áreas apresentou resultados coerentes e repetitivos tanto em laboratório quanto em campo.

As mudanças realizadas nos módulos de formação de imagem e iluminação foram imprescindíveis para execução dos ensaios em áreas de aproximadamente de 1 m².

No módulo de formação de imagens, o aumento do campo de visão foi de (270 x 200) mm² para (1200 x 700) mm², com o aumento da distância de trabalho de 450 mm para 1300 mm. A diminuição de sua massa foi também considerável, pois passou de 3,17 kg para 0,35 kg.

O aumento no raio da área iluminada foi de 400 mm para 900 mm, considerando-se a mesma distância de trabalho de 1300 mm nas duas situações.

As concentrações de franjas presentes na seção 5 indicam pontos de gradientes de deformação e caracterizam falhas de adesão entre o revestimento compósito e o aço. Defeitos entre camadas não foram identificados com facilidade. As imagens extraídas em todos ensaios, tanto em laboratório quanto em campo, apresentam o mesmo padrão de franjas extraído anteriormente em outros trabalhos.

Mais uma vez, a shearografia mostrou-se uma técnica óptica viável para a identificação de delaminações em grandes áreas de revestimentos de materiais compósitos de baixa espessura aplicados a chapas de aço.

Isso possibilita aplicação da técnica em revestimentos não somente em tanques de armazenamento de petróleo, mas também em outros tipos de estruturas revestidas por materiais compósitos e com características semelhantes.

Os trabalhos futuros devem caminhar no sentido de aumentar a agilidade do processo de inspeção aumentando sua produtividade (m²/h).

A shearografia tem alcançado resultados cada vez melhores na área do petróleo nos últimos anos. Com o avançar das atuais pesquisas, a sua aplicação em larga escala na prestação de serviços de inspeção em compósitos será alcançada muito em breve.

Referências Bibliográficas

- [1] ALBERTAZZI, A. G. et al. Detecção de Falhas de Adesão entre Mantas Poliméricas e Dutos usando Interferometria de Deslocamento Lateral. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS, 24, 2006, São Paulo. **Anais...**São Paulo, 2006.
- [2] 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. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS, 9, 2007, Salvador. **Anais...** Salvador, 2007.
- [3] WILLEMANN, D. P. DETECÇÃO DE DEFEITOS EM JUNTAS ADESIVADAS DE TUBOS COMPÓSITOS COM SHEAROGRAFIA, TERMOGRAFIA E ULTRA-SOM. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS, 26, 2008, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2008.
- [4] SCHÖNTAG, J. M. **Caracterização da profundidade de defeitos em materiais compósitos utilizando shearografia com carregamento vibracional**. 2009, 107 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) – Curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, 2009.
- [5] OLIVEIRA, J. L. Revestimentos Anticorrosivos para Taques de Armazenamento de Petroquímicos. **Revista Petro & Química**. São Paulo, n.319, p. 75-84, 2009.
- [6] STEINCHEN, W; Yang, L. – “Digital Shearography – Teory and Aplication Digital speckle pattern shearing Interferometry” – SPIE PRESS – The international society for optical Engineering Bellingham, Washington USA – Setember 2002.
- [7] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **Standard 650 - Welded Tanks Oil Storage**, 2010.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 7823-2:2002: Chapas extrudadas, calandradas, Tipos, dimensões e características**, Rio de Janeiro , 2002.
- [9] NBR-11889_1992 - Bobinas grossas e chapas grossas de aço-carbono e aço de baixa liga e alta resistência.
- [10] PETROBRAS. **N-2913: Revestimentos Anticorrosivos para Tanque, Esfera, Cilindro de Armazenamento e Vaso de Pressão**, Rio de Janeiro, 2010.
- [11] THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência: PETROBRAS, 2004.
- [12] PETROBRAS. **N-270: Projeto de Tanque de Armazenamento Atmosférico**, Rio de Janeiro, 2010.