

DETECÇÃO DE DEFEITOS EM AÇOS COM REVESTIMENTOS COMPÓSITOS ANTICORROSIVOS POR TERMOGRAFIA ATIVA: COMPARAÇÃO ENTRE AS MODALIDADES PULSADA, FASE PULSADA E LOCKIN *

Marcella Grosso¹
Isabel Cistina Pereira Margarit-Mattos²
Sergio Damasceno Soares³
Gabriela Ribeiro Pereira⁴

Resumo

Este trabalho tem por objetivo principal avaliar a capacidade da técnica de termografia ativa como uma técnica não destrutiva a ser utilizada na inspeção de materiais com revestimentos compósitos anticorrosivos de baixa espessura. As três modalidades mais utilizadas de termografia ativa (Pulsada, Fase Pulsada e Lockin) foram analisadas na detecção dos principais defeitos, como a perda de espessura devido a corrosão localizada no substrato e falhas decorrentes de uma aderência incompleta do revestimento. De acordo com os resultados obtidos, todos os defeitos foram detectados nas três modalidades de termografia, no entanto, o pós-processamento nos dados de temperatura adotados nas modalidades Fase Pulsada e Lockin permitiu uma melhoria significativa no contraste dos defeitos apresentados na imagem de fase.

Palavras-chave: Termografia; Revestimentos; Corrosão.

DETECTION OF DEFECTS IN STEEL WITH ANTICORROSIVE COMPOSITE COATINGS BY ACTIVE THERMOGRAPHY: COMPARISON BETWEEN PULSED, PULSED PHASE AND LOCKIN MODALITIES

Abstract

The main objective of this work is to evaluate the ability of the active thermography technique as a non - destructive technique to be used in the inspection of materials with low thickness anticorrosive composite coatings. The three most used modalities of active thermography (Pulsed, Pulsed Phase and Lockin) were analyzed in the detection of the main defects, as the loss of thickness due to localized corrosion in the substrate and failures due to an incomplete adhesion of the coating. According to the results obtained, all defects were detected in the three thermographic modalities, however, the post-processing in the temperature data adopted in the Pulsed Phase and Lockin modalities allowed a significant improvement in the contrast of the defects presented in the phase image.

Keywords: Thermography; Coatings; Corrosion.

¹ Engenheira Metalurgista, M. Sc, Pesquisadora, Laboratório de Ensaios Não Destrutivos, Corrosão e Soldagem (LNDC)/COPPE/UFRJ.

² Engenheira Química, D. Sc, Professora Adjunta, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais/ Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)/COPPE.

³ Engenheiro Mecânico, D. Sc, CENPES/PETROBRAS.

⁴ Física, D. Sc, Professora Adjunta, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais/ Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)/COPPE.

1 INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, a utilização de revestimentos compósitos anticorrosivos, tanto orgânicos como inorgânicos, tem sido uma das técnicas de combate a corrosão mais amplamente utilizada pela indústria, principalmente pela indústria petroquímica [1]. Embora o desenvolvimento de novos materiais tenha conferido uma melhoria significativa na eficácia dos revestimentos, há alguns fatores que influenciam no seu desempenho e durabilidade em serviço, como por exemplo, o tipo de substrato, o tratamento prévio da superfície na qual será aplicado o revestimento, cura, espessura do revestimento e a aderência entre o revestimento e o substrato. Tais fatores são as principais causas da presença de falhas as quais podem surgir tanto durante a etapa de aplicação do revestimento como também em serviço. Tendo em vista que a maioria destas falhas no estágio inicial não são detectadas por inspeção visual, somente em estágios mais avançados de degradação da estrutura, a inspeção não destrutiva se torna de grande importância a ser realizada tanto após a aplicação do revestimento, afim de assegurar a eficiência de aplicação, quanto também periodicamente, para monitorar o desempenho do mesmo e a evolução da sua integridade.

A termografia é uma das técnicas não destrutivas que vem ganhando cada vez mais destaque em diversos setores da indústria pois ela permite grandes áreas em curto intervalo de tempo e também é capaz de inspecionar diversos tipos de materiais, como os metais, polímeros e compósitos, cuja inspeção por métodos convencionais apresentam certas dificuldades. De acordo com o tipo de pulso térmico e o método de análise dos dados, a termografia ativa pode ser classificada em: Pulsada, Fase Pulsada, *Lockin*, *Step Heating*, *Pulsed Eddy Current Thermography* e *Vibrothermography* [2,3,4]. Para o presente trabalho, serão avaliadas as modalidades Pulsada, Fase Pulsada e *Lockin*, sendo o princípio de cada modalidade descrita a seguir.

Na modalidade Pulsada, é utilizado um curto pulso de energia (da ordem de milissegundos ou segundos) para o aquecimento da superfície do material e subsequentemente, através da câmera termográfica, é monitorado a evolução da temperatura na superfície do material durante o seu resfriamento. O resultado desta modalidade é apresentado numa sequência de termogramas e a presença de defeitos pode ser detectada como regiões de temperaturas distintas na superfície do material [2,3]. Na modalidade Fase Pulsada, a evolução da temperatura ao longo do tempo obtido na modalidade Pulsada é convertida para o domínio da frequência através da transformada de Fourier (FFT) e o resultado é expresso em duas imagens, sendo uma imagem referente aos valores do ângulo de fase e a outra referente a amplitude (módulo da transformada de Fourier) para cada pixel na frequência de análise escolhida [2,3,4]. A modalidade *Lockin* consiste no aquecimento periódico da superfície do material através de lâmpadas moduladas (geração de ondas senoidais) e simultaneamente é realizado o monitoramento da evolução da temperatura ao longo dos ciclos de aquecimento [5,6]. Para cada ensaio, é necessário a escolha de uma única frequência de modulação e a definição desta ocorre em função do comprimento de difusão térmica, ou seja, a profundidade de penetração da onda térmica que se deseja alcançar até a profundidade do defeito. O resultado da *Lockin* é apresentado em duas imagens, uma imagem referente ao comportamento do ângulo de fase e uma imagem de amplitude, ambas originadas através da transformada de Fourier aplicada nos dados de resposta do material [5,6].

Este trabalho tem por objetivo principal avaliar a capacidade da técnica de termografia ativa como uma técnica não destrutiva a ser empregada na inspeção de revestimentos compósitos que são comumente utilizados em tanques de armazenamento de petroquímicos. As três modalidades mais utilizadas de termografia ativa (Pulsada, Fase Pulsada e *Lockin*) serão analisadas na detecção dos principais defeitos que podem ocorrer nestes materiais.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e Métodos

Buscando simular falhas de perda de espessura do substrato devido a corrosão localizada e também falhas decorrentes de uma aderência incompleta do revestimento, foram confeccionados corpos de prova com defeitos controlados, ou seja, com defeitos de dimensões e localização conhecidos para este estudo. Desta forma, esses corpos de prova reproduzem uma condição encontrada na vida prática da utilização de revestimentos anticorrosivos, como por exemplo, nos tanques de armazenamento, quando há a possibilidade de ocorrência desses defeitos no substrato da estrutura, ou seja, abaixo da camada de revestimento anticorrosivo, sem que haja nenhuma indicação em sua superfície por inspeção visual.

Para o presente estudo foram avaliados três corpos de prova, denominados de CP1, CP2 e CP3. Para confecção destes corpos de prova, foram utilizadas como substrato, placas de aço carbono de dimensões de 150 mm de comprimento, 100 mm de largura e 4,7 mm de espessura.

Nos corpos de prova CP1 e CP2, os defeitos de perda de espessura devido a corrosão localizada foram simulados através da confecção de 3 furos de dimensões controladas no substrato. Estes furos foram confeccionados de duas maneiras, a primeira através da utilização de uma fresa (CP1) e a segunda através da utilização através da utilização de uma furadeira (CP2). Com isso, busca-se analisar se o tipo de profundidade influencia na detecção dos defeitos, uma vez que os furos feitos por fresa apresentarão profundidade constante e uniforme, sendo o seu fundo paralelo a superfície do substrato ao passo que os furos feitos com a furadeira apresentarão o fundo de forma cônica e a profundidade não uniforme. No CP3, além dos defeitos de perda de espessura devido a corrosão localizada simulados através de entalhes, também foi inserido um defeito no formato geométrico de uma estrela buscando simular a falha de aderência do revestimento no substrato. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** são apresentadas as especificações dos defeitos inseridos em cada corpo de prova e na Figura 1 são apresentadas as fotografias dos substratos dos mesmos (ainda sem a aplicação do revestimento). No CP1 e CP2 todos os furos foram preenchidos com óxido de ferro (Fe_3O_4) e em seguida foi aplicado o revestimento na superfície do substrato.

Tabela 1. Especificações dos defeitos nos corpos de prova CP1, CP2 e CP3

Defeito	CP1		CP2		Defeito	CP3		
	Furo Plano		Furo Cônico			Largura (mm)	Comprimento (mm)	Profundidade (mm)
	Diâmetro (mm)	Profundidade (mm)	Diâmetro (mm)	Profundidade (mm)				
1	5,65	3,43	4,89	3,51	Entalhe 1	5,99	25,02	3,26
2	5,56	2,46	4,98	2,46	Entalhe 2	5,96	24,99	3,18
3	5,53	1,47	4,64	1,37	Estrela	51,25	52,22	0,05

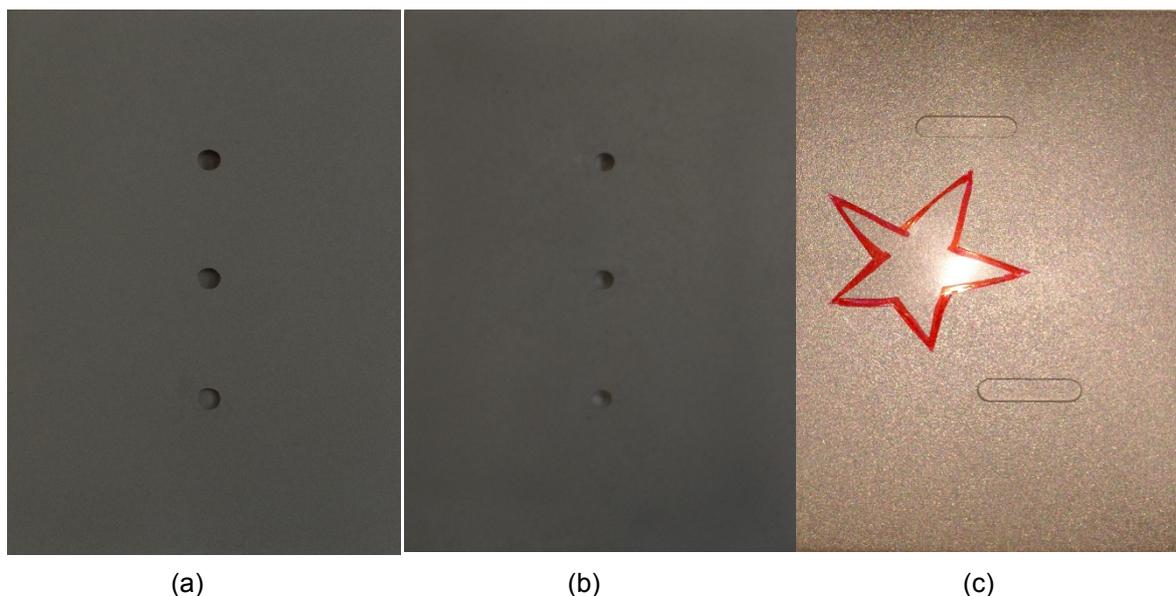


Figura 1. Fotografias das placas de aço carbono jateadas com microesferas de vidro com furos do tipo (a) plano (CP1), (b) cônico (CP2) e (c) com presença de entalhes e defeito de falha de aderência (CP3).

Nos corpos de prova avaliados neste estudo foram utilizados 2 tipos de revestimentos que são comumente aplicados no interior de tanques de armazenamento de petroquímicos, cuja as principais características são apresentadas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Após o jateamento abrasivo da superfície do substrato, o revestimento foi aplicado com um pincel através de uma fina camada, evitando a área dos furos. Desta forma, a camada de revestimento serviu como adesivo para a fixação de uma película seca previamente preparada com o próprio revestimento. Especificamente para o CP3, o revestimento foi inicialmente aplicado por cima da fita de acetato posicionada sobre o substrato e em seguida, foi retirada esta fita e aplicado a película do próprio revestimento por cima da camada de revestimento. Desta forma, criou-se na superfície do substrato uma região, no formato de estrela, onde não há a presença da camada de revestimento, simulando nesta região a falha de aderência. Estas películas foram confeccionadas numa placa de teflon, aplicando os revestimentos com extensor e, depois de curados, os revestimentos foram destacados manualmente e fixados nos corpos de prova.

Tabela 2. Informações técnicas dos revestimentos e descrição das amostras

Composição do Revestimento	Indicação de uso	Corpo de Prova
Resina epóxi multifuncionais com carga de flocos de vidro. 98% sólidos. Agente de cura: poliamida modificada. Cura total: 7 dias em 25° C.	Resistente à produtos químicos agressivos, incluindo solventes e ácidos fortes à temperatura ambiente até 80 °C.	CP1
		CP2
Resina epóxi multifuncionais com reforço de mistura de minerais. 100% sólidos. Agente de cura: aminocicloalifático modificado. Cura total: 250 horas em 25°C.	Resistente à acetona, soluções alcalinas, diesel, etanol, gasolina, álcool, querosene, metanol, nafta, água salgada, tolueno, ácido acético (5%), ácido nítrico (10-	CP3

60%) e ácido sulfúrico (30-98%).

Para realizar as inspeções das amostras pelas três modalidades de termografia ativa (PT, PPT e LT), utilizou-se uma câmera infravermelha com detector InSb, sensibilidade térmica menor que 30 mK e resolução de 640 x 512 pixels. A câmera foi controlada por um computador que permite a captura dos termogramas e o armazenamento dessas imagens para realizar a análise dos dados. Um conjunto de lâmpadas halógenas de 5 kW foi utilizado para a excitação térmica dos corpos de prova e controlado por um módulo eletrônico. As inspeções foram feitas no modo de reflexão, ou seja, as lâmpadas foram posicionadas no mesmo lado da amostra em relação à câmera. A Figura 2 apresenta uma fotografia da configuração experimental adotada nas inspeções termográficas.

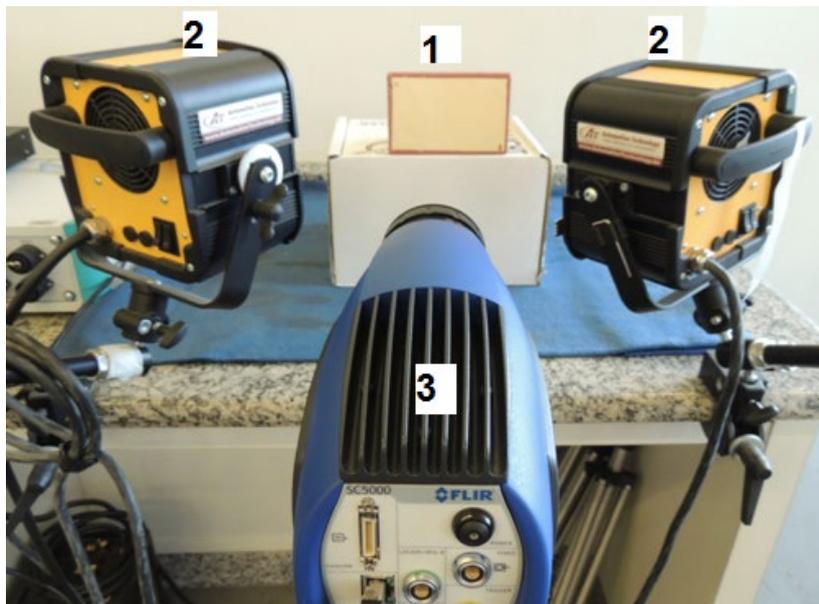


Figura 2. Fotografia da configuração experimental adotada nas inspeções termográficas (1-amostra, 2 – lâmpadas halógenas e 3 – câmera infravermelha).

Como mencionado anteriormente, os resultados obtidos para a modalidade Pulsada são apresentados na forma de sequência de termogramas. Entretanto, neste estudo, optou-se por escolher o termograma dessa sequência para apresentar o maior contraste térmico absoluto entre a região defeituosa e a não defeituosa. O contraste térmico absoluto foi calculado a partir da equação 1:

$$C_a(t) = T_{def}(t) - T_{ref}(t) \quad (1)$$

Ao contrário da Pulsada, os resultados obtidos tanto pela modalidade de Fase Pulsada quanto pela Lockin são apresentados como duas imagens, uma relativa ao comportamento de amplitude e outra relacionada ao comportamento da fase.

2.2 Resultados

A Figura 3(a) apresenta a imagem termográfica obtida pela modalidade Pulsada para o CP1 quando a inspeção é realizada pelo lado frontal a superfície dos defeitos. Na Figura 3(b) é apresentado o resultado obtido pela metodologia de análise do contraste térmico absoluto. Nas duas imagens é possível observar que todos os três defeitos

inseridos no substrato foram detectados porém, comparando-as, também observa-se que a imagem original (Figura 3(a)) apresenta regiões mais claras ao redor da área dos defeitos e as mesmas foram atenuadas com a análise do contraste térmico. Provavelmente, tais regiões podem ser associadas a diferenças de espessuras na camada do revestimento, uma vez que, com a subtração realizada na análise do contraste, elas são reduzidas ou até mesmo eliminadas na imagem (Figura 3(b)).

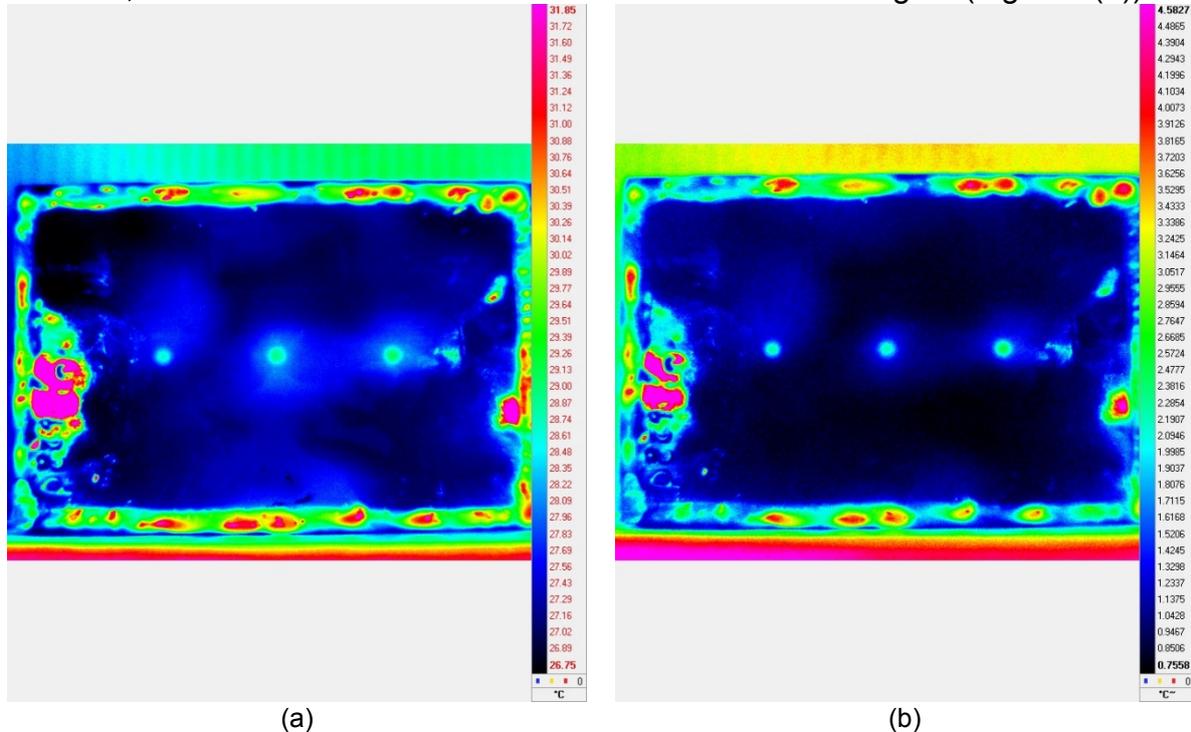


Figura 3. Imagem termográfica de melhor contraste na paleta (a) RAINBOW e (b) GREY obtida para a superfície frontal do CP1.

Na Figura 4 são apresentados os resultados obtidos pela modalidade de Fase Pulsada. Na imagem de amplitude, Figura 4(a), não é possível visualizar a presença dos defeitos, e na imagem de amplitude, Figura 4(b), esses defeitos são detectados com um alto contraste.

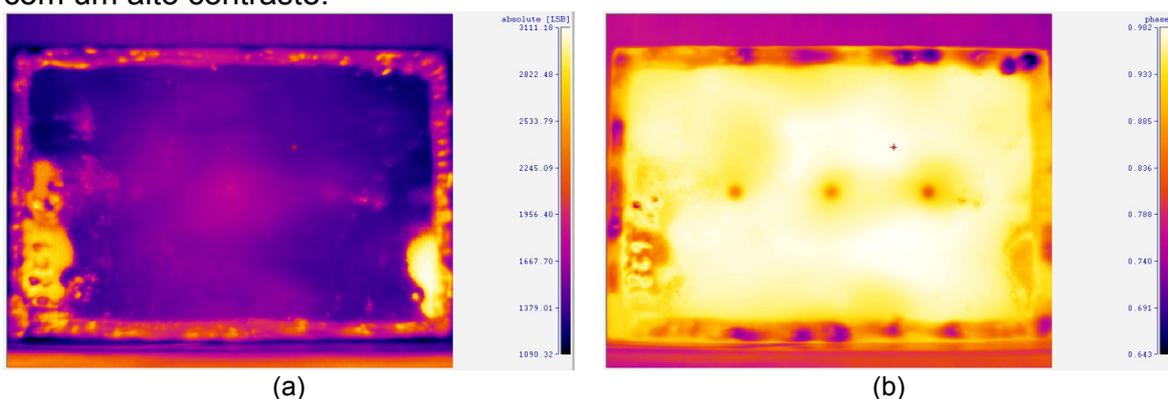


Figura 4. Resultado obtido para a superfície frontal do CP1: (a) imagem de amplitude e (b) imagem de fase.

Os resultados obtidos pela modalidade Lockin utilizando as frequências de 1 Hz, 0,05 Hz e 0,025 Hz são apresentados na Figura 4(a), Figura 4(b) e Figura 4(c) respectivamente. Analisando estas imagens de fase, é possível observar uma melhoria significativa no contraste dos defeitos e também uma definição melhor da

geometria e contorno dos mesmo com a redução da frequência de modulação usada nas inspeções por esta modalidade de termografia.

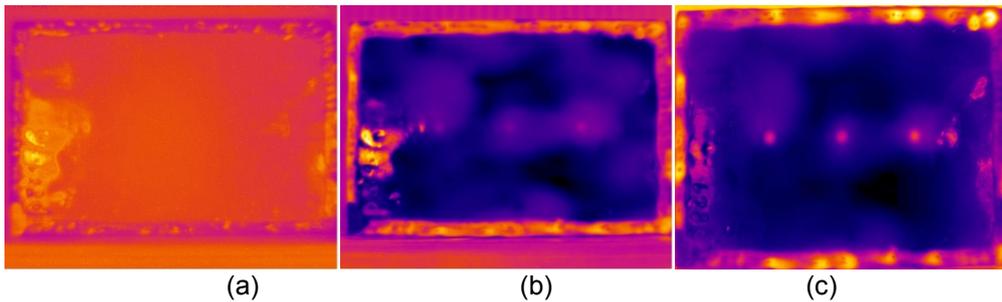


Figura 5. Imagem de fase obtida pela modalidade Lockin no CP1 utilizando a frequência de modulação de: (a) 1 Hz, (b) 0,5 Hz e (c) 0,025 Hz.

Na Figura 6 são apresentados os resultados obtidos pela modalidade Pulsada para o CP2. Assim como observado no CP1, a metodologia de análise pelo contraste térmico (Figura (6(b))) conferiu uma atenuação das regiões claras ao redor dos defeitos, melhorando desta forma a visualização dos mesmos e definição dos seus contornos. Outro aspecto que também deve ser destacado em comparação com o CP1 é que a técnica se mostra capaz de detectar tanto defeitos de fundo plano (CP1) como também defeitos de fundo cônico (CP2). Este mesmo comportamento pode ser observado na imagem de fase obtida pela modalidade de Fase Pulsada para o CP2 (Figura 7).

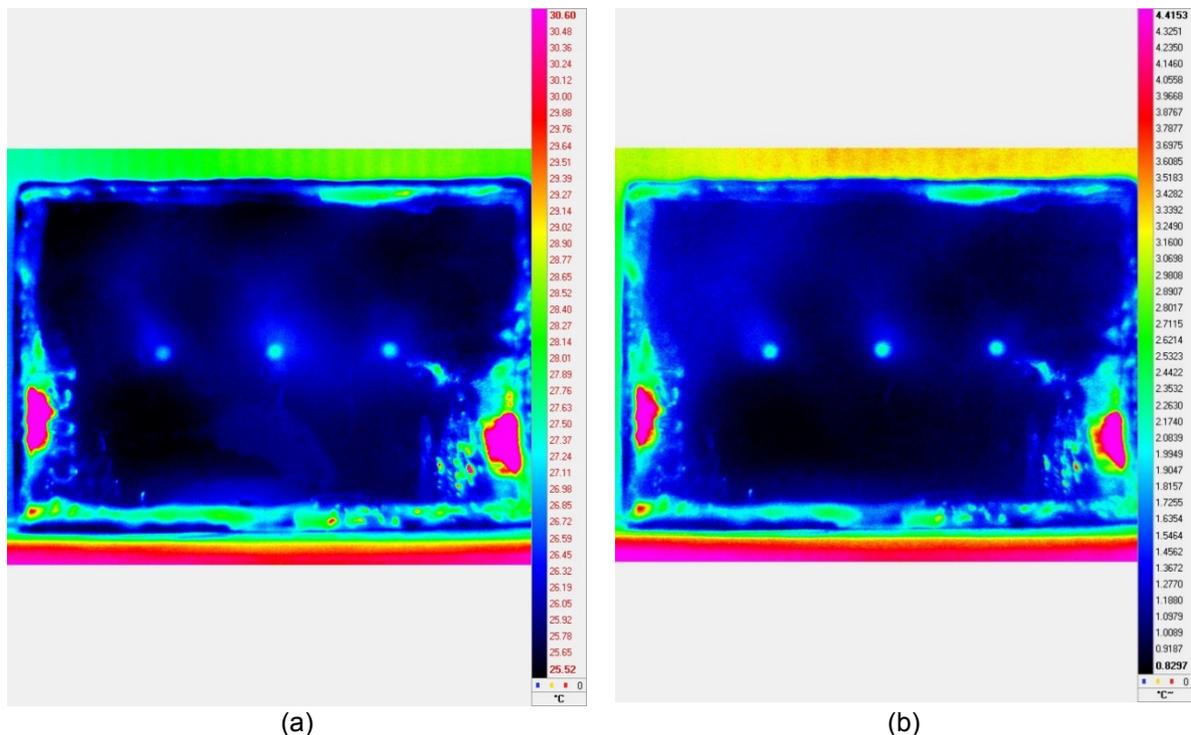


Figura 6. Imagem de maior contraste obtida pela metodologia de subtração na paleta (a) RAINBOW e (b) GREY para a superfície frontal do CP2.

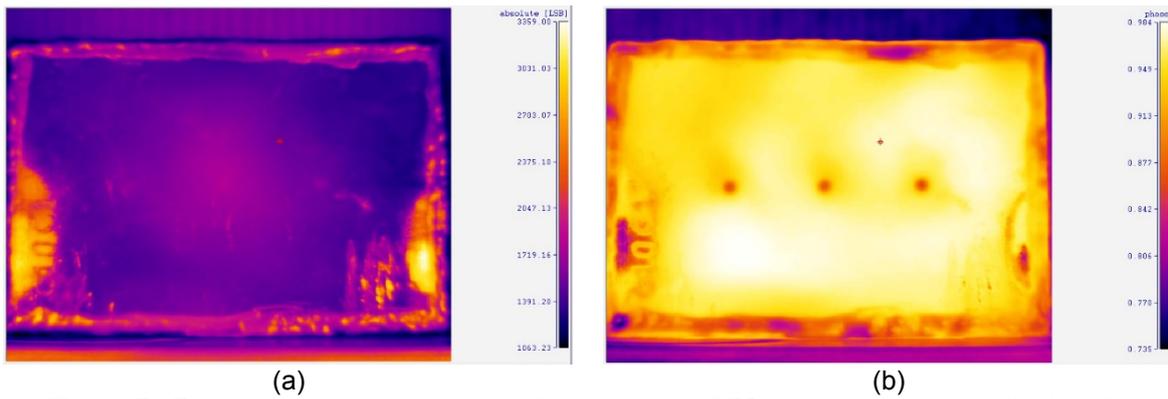


Figura 7. Resultado obtido para a superfície frontal do CP2: (a) imagem de amplitude e (b) imagem de fase.

A seguir serão apresentados os resultados obtidos das três modalidades de termografia ativa para o CP3. Na Figura 8 são apresentados os resultados da modalidade Pulsada e torna-se possível observar que, tanto na imagem original (Figura 8(a)) como na imagem do contraste térmico (Figura 8(b)), a técnica foi capaz de detectar os defeitos de perda de espessura do substrato (2 entalhes) e também o defeito de falha de aderência (estrela). A imagem de fase obtida da modalidade de Fase Pulsada, Figura 9(b), apresentou um contraste maior na região dos defeitos em comparação ao resultado da Pulsada (Figura 8), permitindo uma melhor definição dos contornos dos defeitos e também diferenciar a espessura dos defeitos de perda de espessura (entalhes) em relação ao defeito de falha de aderência (estrela).

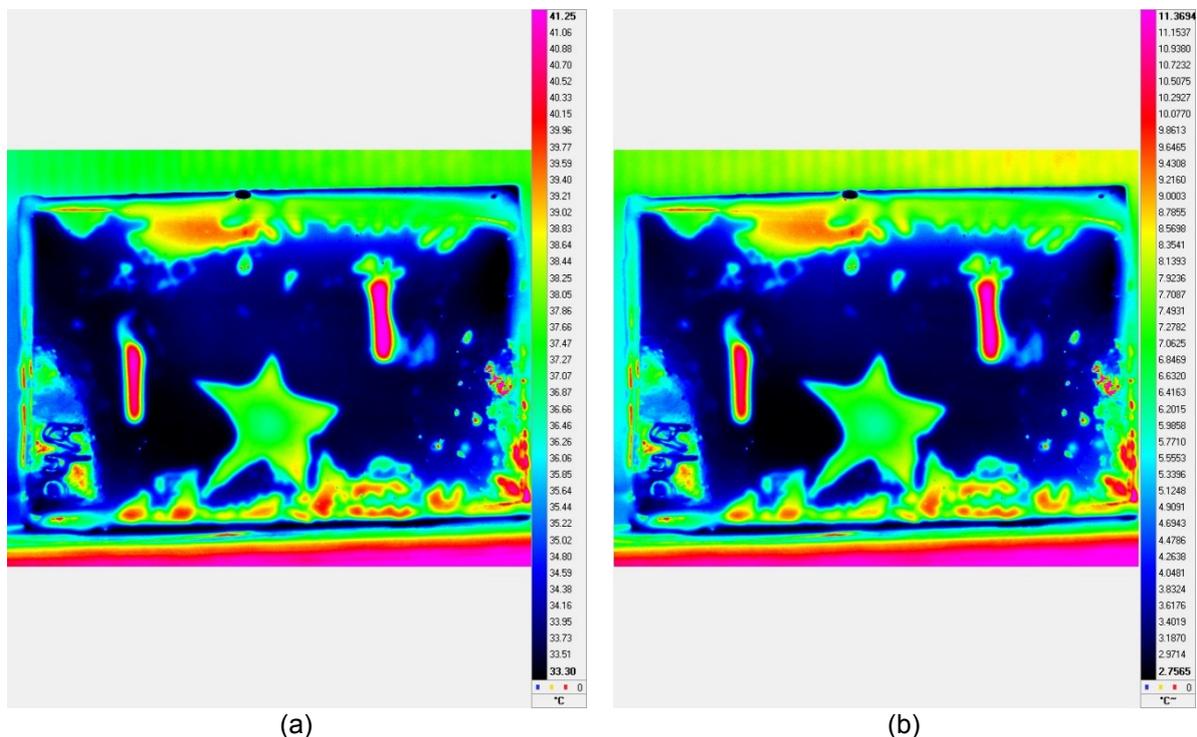


Figura 8. Imagem de maior contraste obtida pela metodologia de subtração na paleta (a) RAINBOW e (b) GREY para a superfície frontal do CP3.

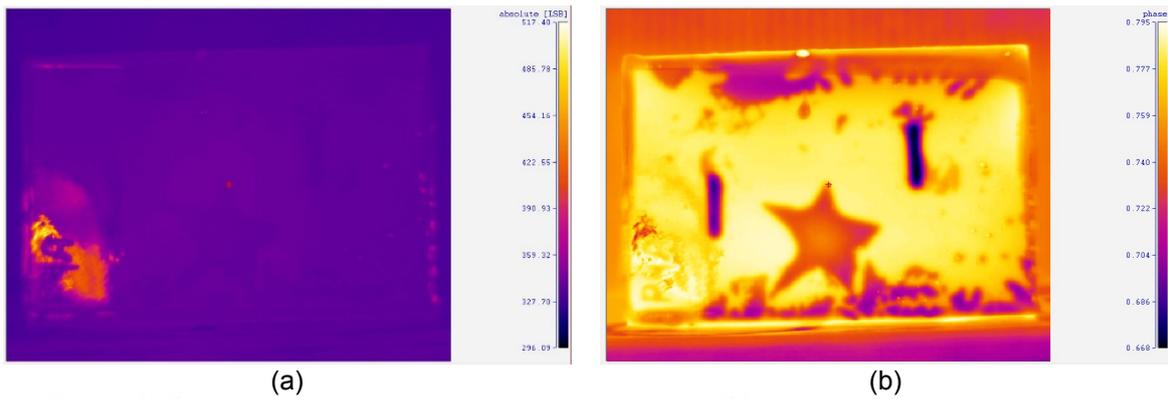


Figura 9. Resultado obtido para a superfície frontal do CP3: (a) imagem de amplitude e (b) imagem de fase.

Na Figura 10 são apresentadas as imagens de fase obtidas como resultado da inspeção pela modalidade Lockin do CP3 utilizando as frequências de 0,1 Hz, 0,05 Hz e 0,025 Hz. Analisando estas imagens, torna-se possível observar que a redução das frequências de modulação conferiu uma melhoria significativa no contraste dos dois tipos de defeitos avaliados no CP3.

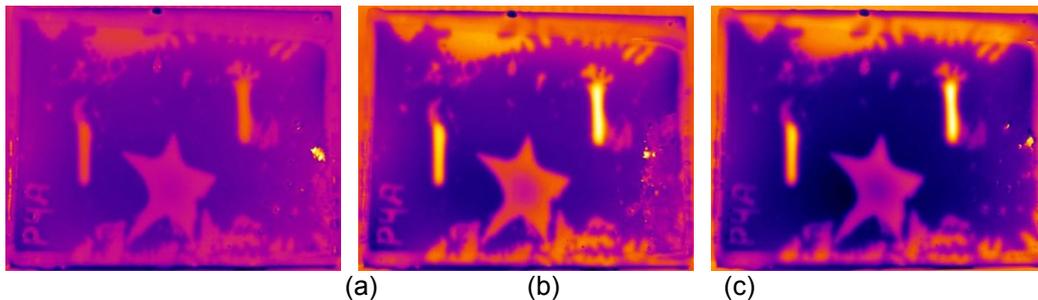


Figura 10. Imagem de fase obtida pela modalidade Lockin no CP3 utilizando a frequência de modulação de: (a) 0,1 Hz, (b) 0,05 Hz e (c) 0,025 Hz.

3 CONCLUSÃO

A modalidade Pulsada foi capaz de detectar todos os defeitos presentes nos três corpos de prova quando a inspeção é realizada no lado frontal a superfície dos defeitos.

A modalidade de Termografia Ativa de Fase Pulsada mostrou que, através da análise da imagem de fase, houve uma melhoria significativa no contraste dos defeitos em relação ao resultado obtido pela modalidade Pulsada, considerando a inspeção realizada no lado frontal a superfície dos defeitos.

Na modalidade *Lockin*, quando a inspeção é realizada no lado frontal a superfície dos defeitos, foi observado uma melhoria significativa no contraste dos defeitos detectados na imagem de fase devido a diminuição da frequência de modulação. Porém, para o CP1, na imagem de fase obtida nesta modalidade foi possível observar regiões de descontinuidades que não haviam sido evidenciadas nos resultados obtidos pela modalidade Pulsada e de Fase Pulsada.

A partir dos resultados obtidos nas três modalidades de termografia foi possível observar que a geometria dos defeitos como também a sua profundidade não influenciaram na sua detecção quando a inspeção é realizada no lado frontal. A presença do óxido de ferro em alguns defeitos também não influenciou na detecção dos mesmos. Desta forma, tais resultados mostram a potencialidade da técnica de termografia ativa como uma ferramenta não destrutiva a ser empregada na inspeção de materiais com este tipo de revestimento.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Petrobras pela assistência técnica e financeira e Capes e CNPq pelo apoio a pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] Sørensen PA, Kiil S, Dam-Johansen K, Weinell CE. Anticorrosive coatings: a review. J. Coatings Technology and Research. 2009; 6(2): 135-176.
- [2] Maldague X., Moore P., "Nondestructive Testing Handbook – Infrared and Thermal Testing", volume 3, American Society for Nondestructive Testing.
- [3] Maldague X., Galmiche F. e Ziadi A. Advances in pulsed phase thermography. Infrared Physics & Technology. 2002; 43: 175-181.
- [4] Maldague X. et al. Infrared image processing and data analysis. Infrared Physics & Technology. 2004; 46: 75-83.
- [5] Almond D. e Pickering S. Matched excitation energy comparison of the pulse and lock-in thermography NDE techniques. NDT&E International. 2008; 41: 501-509.
- [6] Busse G, Wu D. Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials. Revue Générale de Thermique. 1998; 37: 693-703.