

APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE TERMOGRAFIA ATIVA NA INSPEÇÃO NÃO-DESTRUTIVA DE TAMBORES DE REJEITO NUCLEAR

Aluno: Luís Felipe Junqueira Reis Rosman
Orientador: Marcos Venicius Soares Pereira

Introdução

Desenvolvida a partir da década de 60, a *termografia* é uma técnica de aquisição de informações a partir da obtenção de imagens térmicas. Seu princípio físico se baseia na medição da distribuição de temperatura associada com radiações térmicas ou infravermelhas na superfície do objeto analisado. Na *termografia ativa* é utilizada uma fonte externa de calor controlada por pulsos e o calor penetra no objeto até sua superfície interna. Parte do calor é refletida e gera gradientes de temperatura, em função da espessura de parede do corpo sólido. Este processo ocorre em fração de segundos e uma câmera infravermelha capta a distribuição da temperatura na superfície do objeto. Finalmente, programas numéricos analisam as mudanças de temperatura na superfície num determinado tempo e produzem um mapeamento da área examinada.

Adotada como um método de ensaios não destrutivos, a técnica de *termografia ativa* se destaca das demais pela ausência de contato físico entre equipamento de medição e componente, alta velocidade de inspeção e capacidade de inspeção de grandes áreas, características que conduzem a otimização do tempo de análise e potencializa sua aplicação em sistemas estruturais, mecânicos, elétricos e de processos, entre outros. Na indústria nuclear, com base na ausência de tal contato físico, o emprego da mencionada técnica na inspeção de equipamentos vem sendo estimulada, a fim de se reduzir os riscos de contaminação e se manter a inspeção em conformidade com práticas e normas de segurança industrial.

Objetivo

Apresentar o desenvolvimento do Projeto Termografia desenvolvido em conjunto com o Fraunhofer Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP) em Saarbrücken / Alemanha, no qual, realizou-se um estudo de viabilidade da aplicação da referida técnica na inspeção de tambores de rejeitos das usinas nucleares Angra 1 e 2. Portanto, alguns experimentos foram planejados visando a possibilidade de detecção de regiões comprometidas com degradação de material (corrosão) nas paredes internas dos tambores e, ainda, a avaliação da espessura útil (residual) de parede em tais regiões.

Metodologia

Para o desenvolvimento do estudo em questão, o Centro de Avaliação Não Destrutiva / PUC-Rio utilizou dois diferentes tipos de tambores adotados no encapsulamento de rejeitos radioativos das usinas nucleares de Angra 1 e 2, respectivamente (Figura 1). Destes tambores, foram preparadas duas amostras com dimensões de 210 mm x 300 mm (Figura 2), denominadas verde e amarelo, e adotadas como corpos de prova no estudo da eficiência e limitações da referida técnica na detecção de regiões de corrosão. Furos de diferentes diâmetros e profundidades foram feitos com um processo de eletroerosão nas superfícies internas (posterior) das amostras, com o objetivo de simularem defeitos nas paredes internas dos tambores. As amostras já furadas estão apresentadas na Figura 3.



Figura 1 - A direita o tambor verde e a esquerda o tambor amarelo

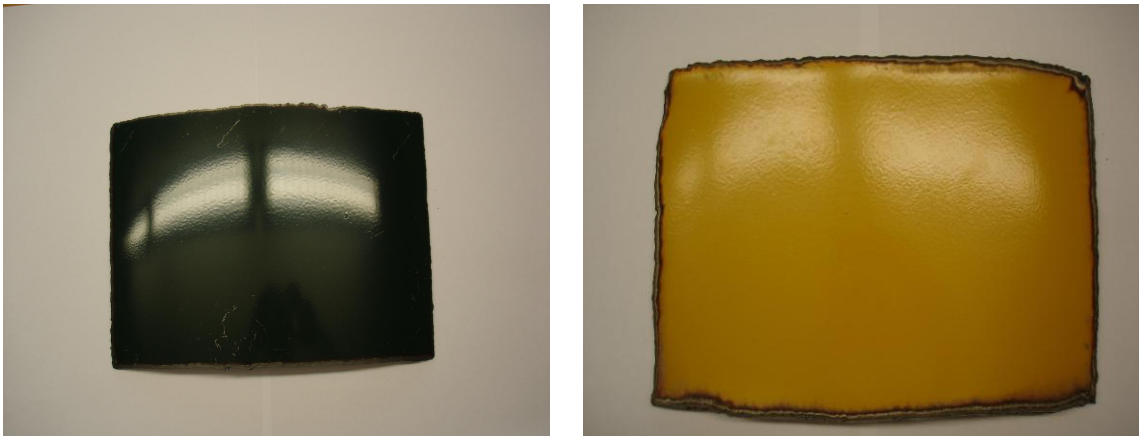


Figura 2 - Amostras verde e amarela

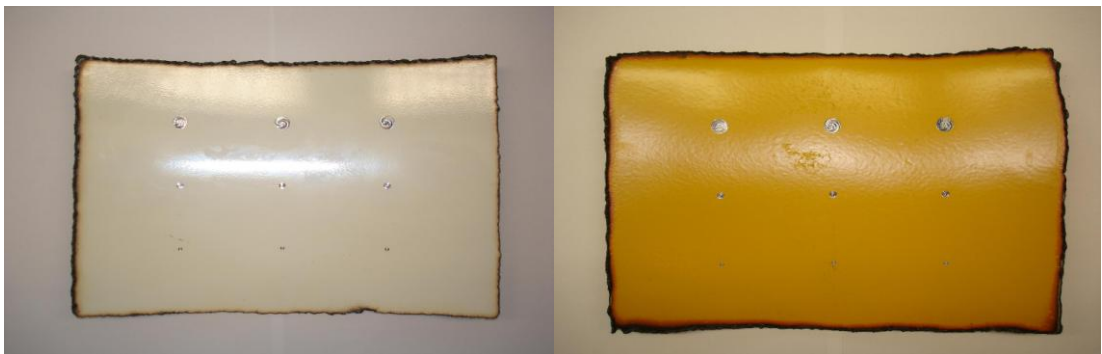


Figura 3 - Superfície posterior das amostras após a furação; amostra verde a direita e amostra amarela a esquerda

Após a furação dos corpos de prova, realizaram-se medições com micrômetro, relógio comparador e paquímetro, para a determinação exata das espessuras residuais das paredes de aço nas regiões dos defeitos simulados. Tais medições foram realizadas no Laboratório de Metrologia da PUC-Rio. Além disto, como as amostras possuem diferentes espessuras de parede metálica e de película de revestimento, também foram realizadas medições para a determinação de tais das espessuras, adotando-se as mesmas técnicas anteriormente mencionadas. Estes procedimentos tiveram como objetivo calibrar o sistema desenvolvido para realizar as inspeções pela técnica de *termografia*, bem como validar os resultados assim obtidos. Foram medidos também os diâmetros das amostras. Abaixo apresentamos o resultado dessas medições para as amostras verde e amarela nas Figuras 4 , 5 e 6.

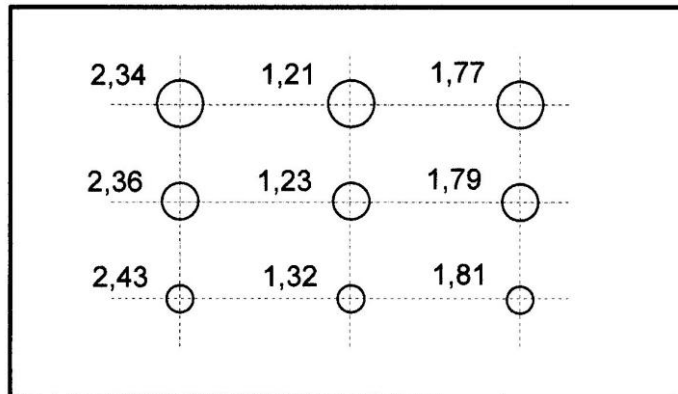


Figura 4 - Espessuras úteis de parede metálica na região dos defeitos da amostra verde.

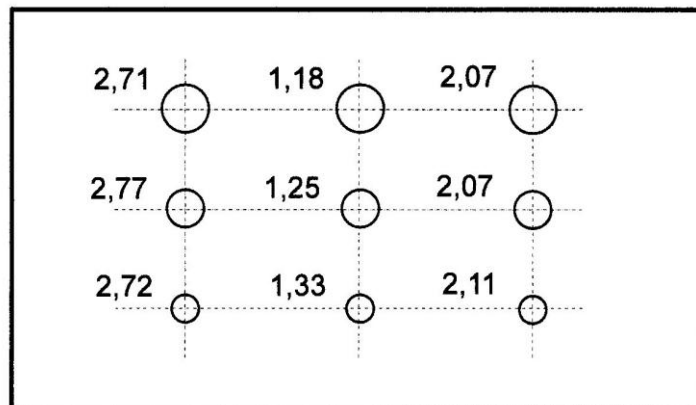


Figura 5 - Espessuras úteis de parede metálica na região dos defeitos da amostra amarela.

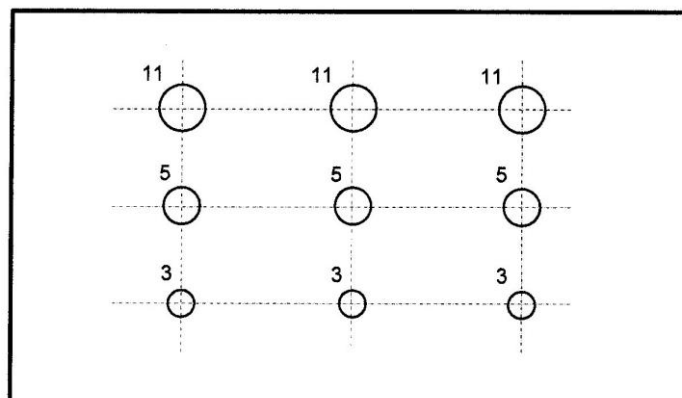


Figura 6 - Diâmetros (mm) adotados na furação de ambas as amostras.

Observando as Figuras 4 e 5 podemos notar que os furos foram realizados com a intenção de se ter aproximadamente 90% de parede metálica residual na primeira coluna de furos, 50% de parede metálica residual na segunda coluna de furos, e 70% de parede metálica residual na terceira coluna de furos.

Podemos afirmar isso pois foram medidas a espessura de parede metálica e a da película de revestimento para ambas as amostras. Para medir a espessura de parede metálica e a da película de revestimento, foram realizadas para cada amostra a medição da espessura da amostra com a película de revestimento e após uma nova medição de um pedaço da amostra sem a película de revestimento, obtendo-se assim a espessura da parede metálica. Os resultados dessas medições para a amostra verde foram: espessura da parede metálica de 2,52mm e espessura do revestimento da película de revestimento de 0,05mm. E os resultados dessas medições para a amostra amarela foram: espessura da parede metálica de 2,84mm e espessura do revestimento da película de revestimento de 0,35mm.

Falaremos agora do dispositivo de *termografia*. O dispositivo de *termografia ativa* para teste das amostras consiste de fontes de calor, câmera de infravermelho e um computador (PC) para aquisição e tratamento de dados. Optou-se pelo método de aquecimento com lâmpadas de alta potência, por ter sido este método aquele que proporcionou maiores áreas aquecidas nas superfícies das amostras, resultando em menores tempos de inspeção. O sistema de inspeção adotado na inspeção das amostras e seu protótipo se acham apresentados nas Figura 7 e 8.

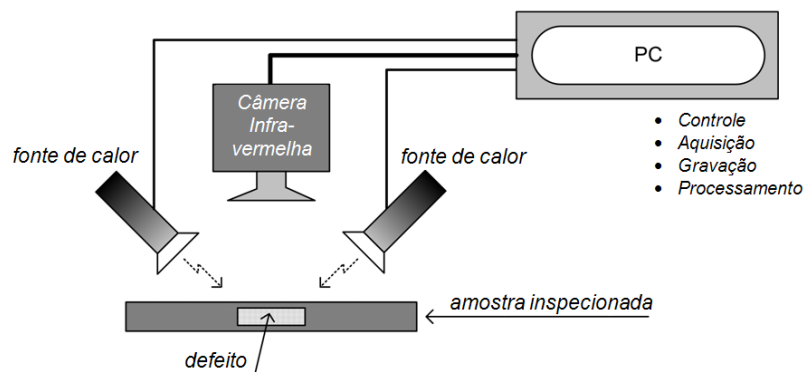


Figura 7 - Esquema do dispositivo de inspeção das amostras

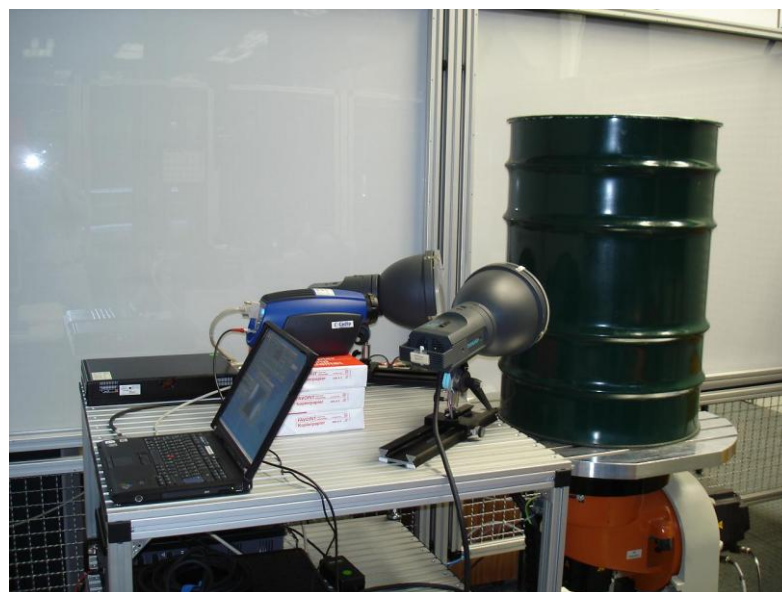


Figura 8 - Protótipo do sistema de inspeção por *termografia* do tambor verde

Com o intuito de que todos os defeitos pudessem ser inspecionados no mínimo uma vez, as superfícies das amostras foram divididas em quatro áreas de inspeção de *termografia ativa*, como mostrado na Figura 9.

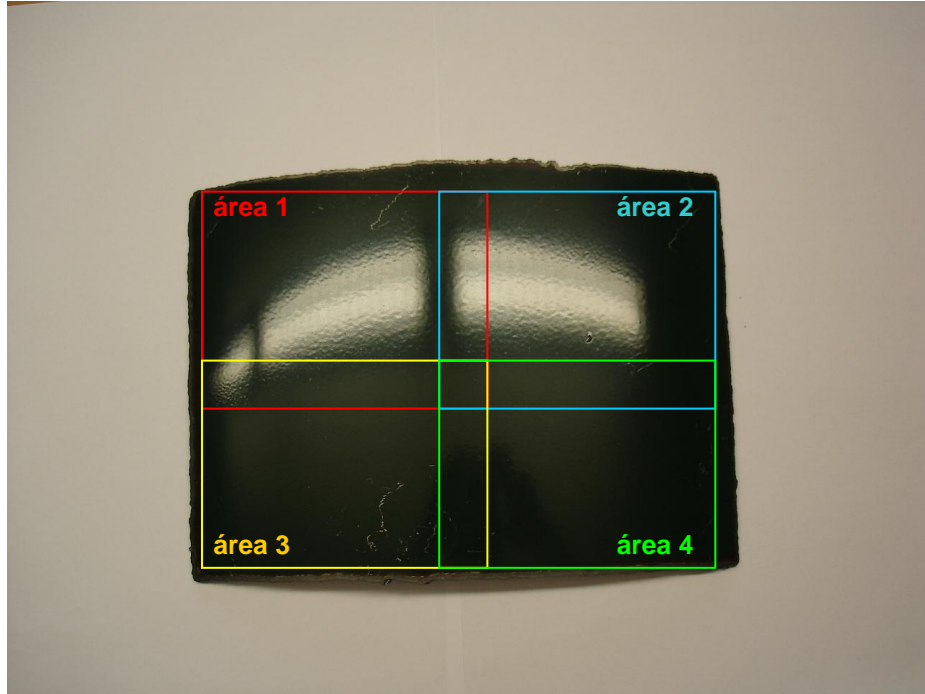


Figura 9 – Esquema de inspeção da superfície frontal das amostras

A inspeção incluiu 3 fases distintas. Na primeira fase, denominada ativação térmica, ocorreu o aquecimento uniforme durante um curto período de tempo da superfície frontal das amostras. Na segunda, denominada reação térmica dos material, ocorreu a propagação de calor nas amostras. Nela a taxa de propagação sofreu modificações pela presença do defeito (que provoca alterações das propriedades térmicas). Ainda nesta etapa, uma câmera de infravermelho monitorou a propagação de calor através de uma sequência de imagens relacionadas com a distribuição térmica na superfície analisada em função do tempo. E finalmente, a terceira fase, chamada de análise dos dados, na qual a sequência de imagens foi analisada para se obter informações relevantes, como posição e geometria, além das espessuras residuais da parede metálica e revestimento.

Resultado e análises

Os resultados que serão apresentados a seguir foram obtidos em conjunto com a Fraunhofer Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP) em Saarbrücken / Alemanha, em viagem realizada pelo professor orientador deste projeto, Marcos Venicius Soares Pereira.

As Figuras 10, 11, 12 e 13 apresentam as imagens obtidas pela câmera de infravermelho (esquerda) e sinais da reação térmica do material na presença de defeitos (direita), durante a inspeção da amostra *verde*. Nestas figuras figura, as áreas de inspeção correspondem àquelas indicadas anteriormente na Figura 9.

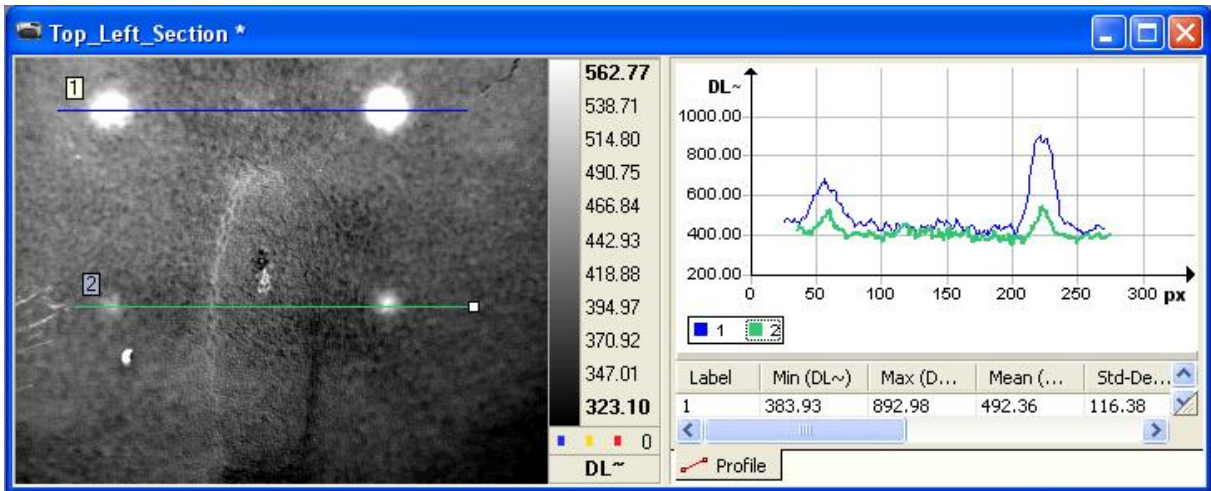


Figura 10 - Detecção de defeitos internos da superfície da área 1 da amostra verde por termografia ativa

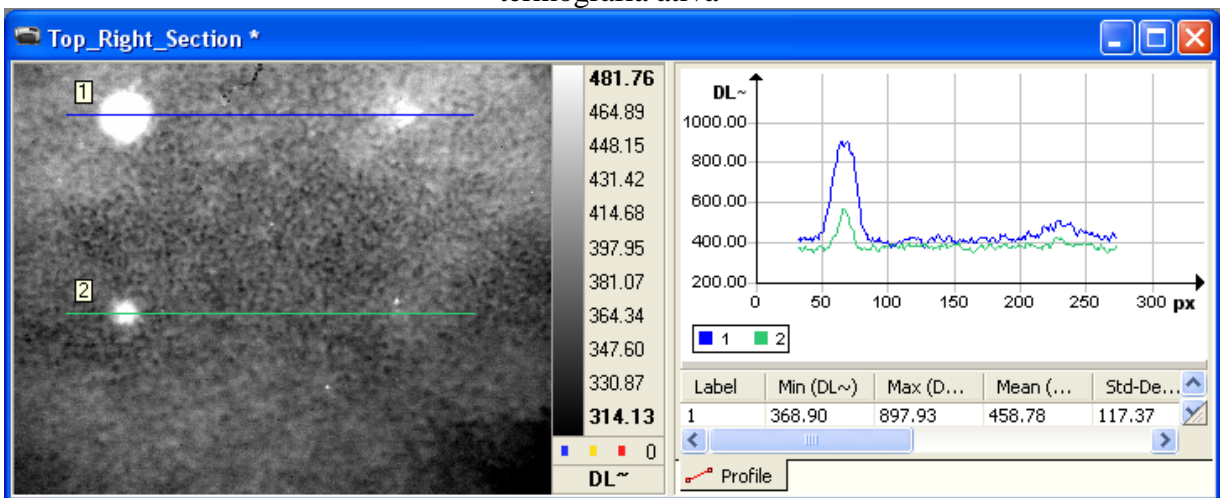


Figura 11 - Detecção de defeitos internos da superfície da área 2 da amostra verde por termografia ativa

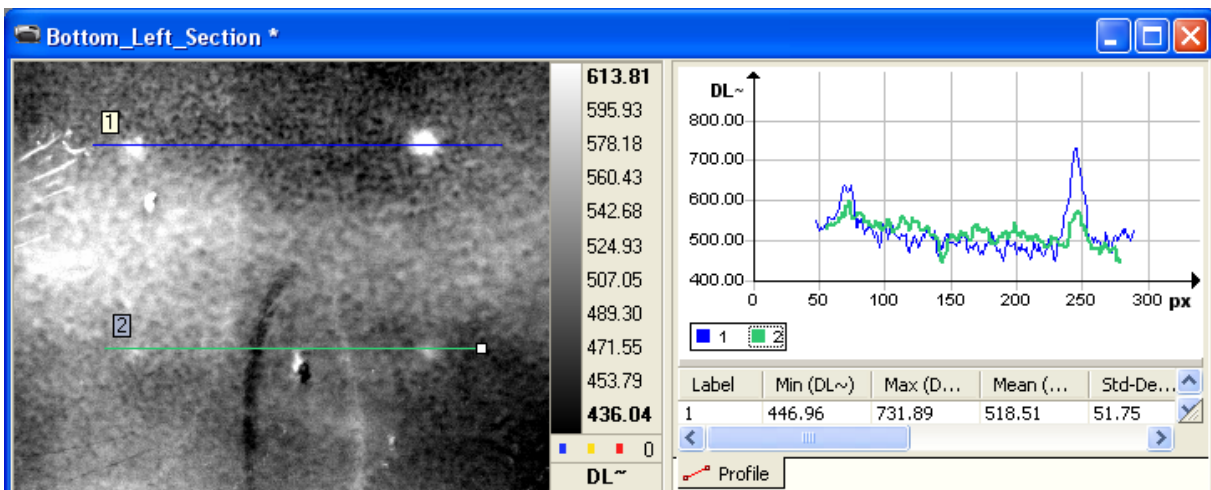


Figura 12 - Detecção de defeitos internos da superfície da área 3 da amostra verde por termografia ativa

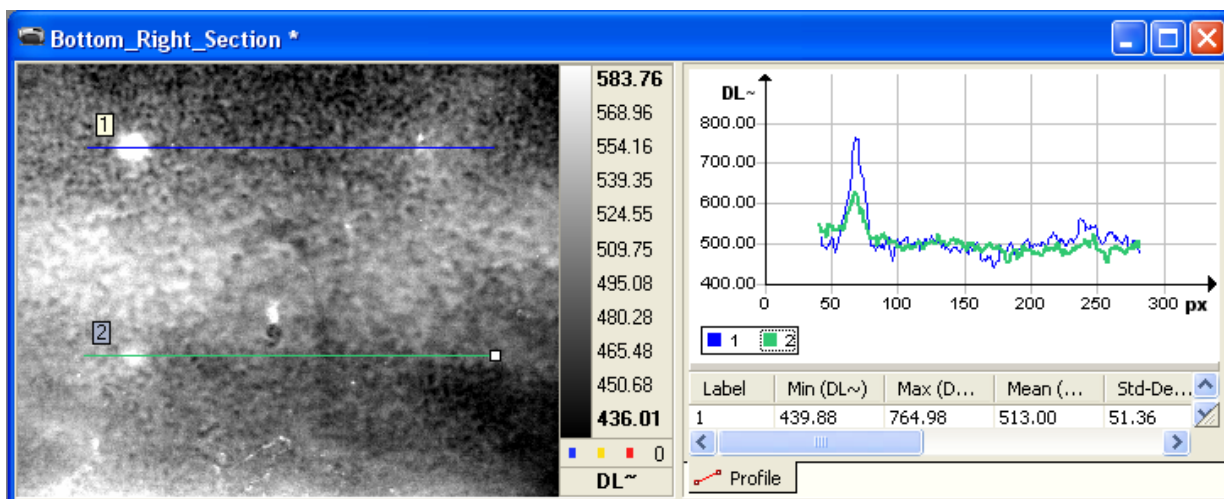


Figura 13 - Detecção de defeitos internos da superfície da área 4 da amostra verde por termografia ativa

Após uma análise das figuras anteriores, pode-se concluir que em função do volume de material retirado na furação das chapas, simulando defeitos de corrosão, houve uma eficácia diferenciada da técnica de *termografia ativa* na detecção dos diferentes defeitos existentes. Por exemplo, na imagem obtida pela câmera de infravermelho na Figura 10, a indicação da presença dos defeitos com 11 mm de diâmetro, assinalados com uma linha azul, é mais nítida do que aquela referente aos defeitos com 5 mm de diâmetro, assinalados com uma linha verde. Nesta mesma imagem, nota-se que houve também uma diferença de nitidez entre os defeitos de mesmo diâmetro. A razão disto é a influência da espessura de parede residual metálica, uma vez que defeitos com 50% de perda na espessura (direita) aparecem com mais intensidade do que os outros com perda de 10% (esquerda).

Sobre as Figuras 11, 12 e 13, a observação dos sinais de reação térmica do material reforça esta conclusão, pois permite a constatação de que na região do defeito de 11 mm de diâmetro e 50% de parede útil metálica houve a maior perturbação da propagação de calor dentro de todas na região de inspeção.

Iguais conclusões podem ser feitas após a análise das demais imagens das Figuras 10, 11, 12 e 13, onde se nota que furos de maior diâmetro e/ou mais profundos provocaram modificações mais sensíveis na propagação do calor no material e, conseqüentemente, foram detectados de maneira mais nítida pela técnica de *termografia ativa*.

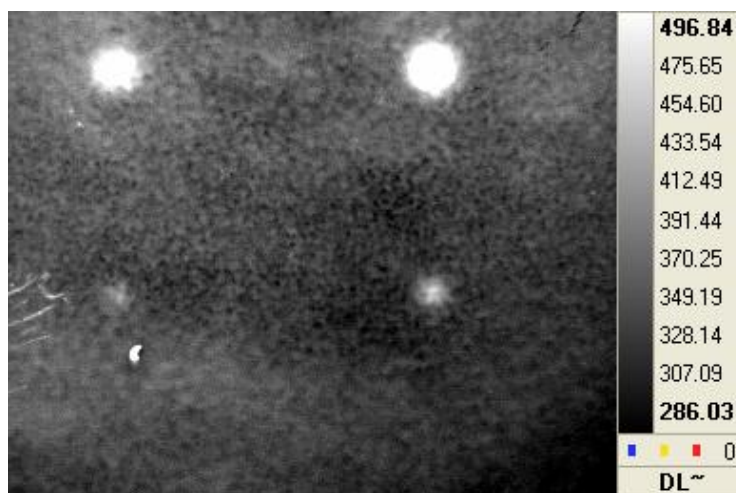


Figura 14 - Imagens da área 1 de inspeção da amostra verde

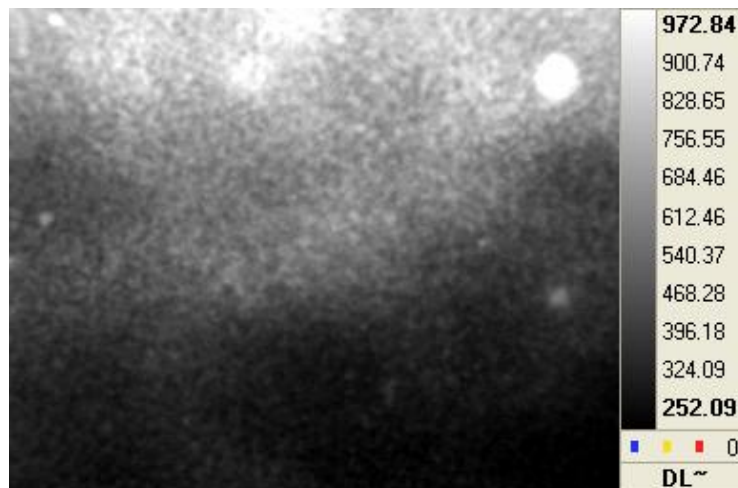


Figura 15 - Imagens da área 1 de inspeção da amostra amarela

As Figuras 14 e 15 mostram as imagens obtidas pela câmera de infra-vermelho na área 1 de inspeção das amostras *verde* e *amarela*, na qual foram produzidos defeitos com diâmetros de 11mm (em cima) e 5 mm e espessuras residuais de 90% (esquerda) e 50% da parede metálica da amostra.

Nas Figuras 14 e 15 se observa uma menor definição de imagem nos defeitos detectados na amostra *amarela*, principalmente daqueles que simulavam menores volumes de corrosão. Numa situação não favorável, o menor dos defeitos da área 1 de inspeção, com diâmetro de 5 mm e perda de 10% de sua parede, não foi detectado pela inspeção por *termografia ativa*.

Esta não eficiência da técnica de *termografia ativa* na detecção de defeitos com menores perdas de material na amostra *amarela* foi associada com a espessura calculada da sua camada de revestimento 0,35mm em média 7 vezes maior do que aquela calculada para a amostra verde 0,05 mm. Como o calor se propaga de maneira diferente no material do revestimento e no metálico, o aumento da espessura do primeiro influenciou de maneira indesejada na formação da imagem dos defeitos com menor volume de perda de material.

Desta maneira, a análise dos resultados das inspeções evidenciou que existiram defeitos (vide Figuras 16 e 17) cuja reação térmica do material a sua presença foi mais significativa do que outros, resultando na viabilidade de sua detecção.

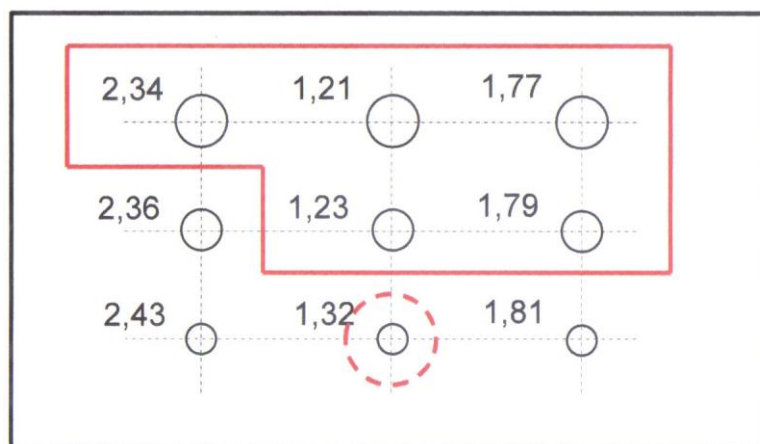


Figura 16 - Defeitos detectados na inspeção por *termografia ativa*, amostra verde.

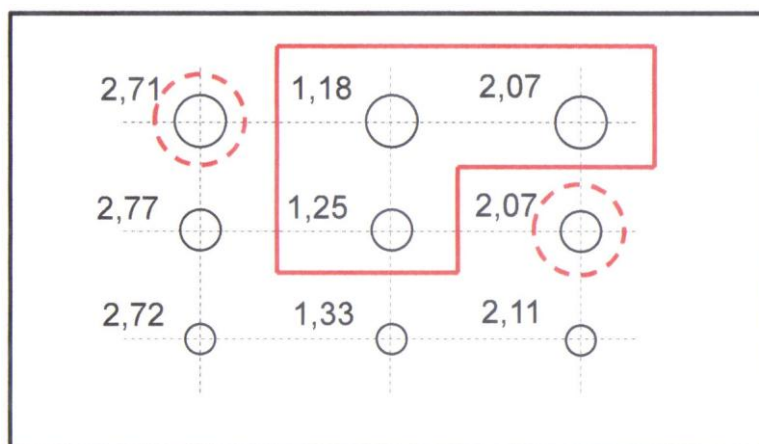


Figura 17 - Defeitos detectados na inspeção por *termografia ativa*, amostra amarela.

Nas figuras anteriores, estes defeitos cuja presença foi mais significativa aparecem demarcados por uma linha cheia vermelha e podem ser facilmente detectados quando de inspeções dos tambores *verde* e *amarelo* pela técnica de *termografia ativa*. Ainda na mesma figura, defeitos cuja perda de volume se encontra no limite de detecção e, portanto, necessitam de um operador experiente para encontrá-los, aparecem destacados por linha tracejada. A Tabela 1 propõe um critério prático de detecção dos defeitos nas inspeções dos tambores pela técnica de *termografia ativa*.

Tabela 1 – Critério de detecção em função da espessura residual de parede e diâmetro dos defeitos.

Tambor	Espessura (%)	Dimensão (mm)
<i>verde</i>	90	≥ 11 mm
	70	≥ 5 mm
	50	≥ 5 mm
<i>amarelo</i>	70	≥ 11 mm
	50	≥ 5 mm

Um comentário importante é que a técnica de *termografia ativa* pode ser adotada tanto na detecção de defeitos superficiais quanto em outros subsuperficiais. Os defeitos produzidos nas amostras simularam defeitos internos considerados como subsuperficiais. Defeitos superficiais e inerentes a própria fabricação e utilização dos tambores, como aranhões, empolamentos e inclusões na pintura, também podem ser detectados durante a inspeção, produzindo uma informação falsa sobre a existência de áreas de descontinuidade no material. Entretanto, uma diferenciação sensata entre informações verdadeiras e falsas pode ser feita por inspetores imediatamente após a realização dos ensaios, uma vez que defeitos superficiais ficam claramente evidenciados nas primeiras imagens durante a documentação da seqüência do resfriamento da amostra, característica que permite tal separação.

A determinação quantitativa da espessura residual de parede nas amostras envolveu o desenvolvimento, de um algoritmo matemático que relaciona o processamento de dados térmicos da inspeção com a dimensão e profundidade do defeito, tendo como referência uma área livre de defeitos. Uma vez que a inspeção tenha ocorrido, o processamento do defeito passa a ser referendado como *senal A*, apresentado na Figura 18. Sinais de defeitos de mesma profundidade e diâmetros diferentes, mesmo com diferentes intensidades, possuem praticamente o mesmo ponto de elevação de suas intensidades. Quando comparados defeitos com diferentes profundidades, além de diferentes intensidades de sinal, ocorre uma defasagem entre os pontos de elevação destas intensidades.

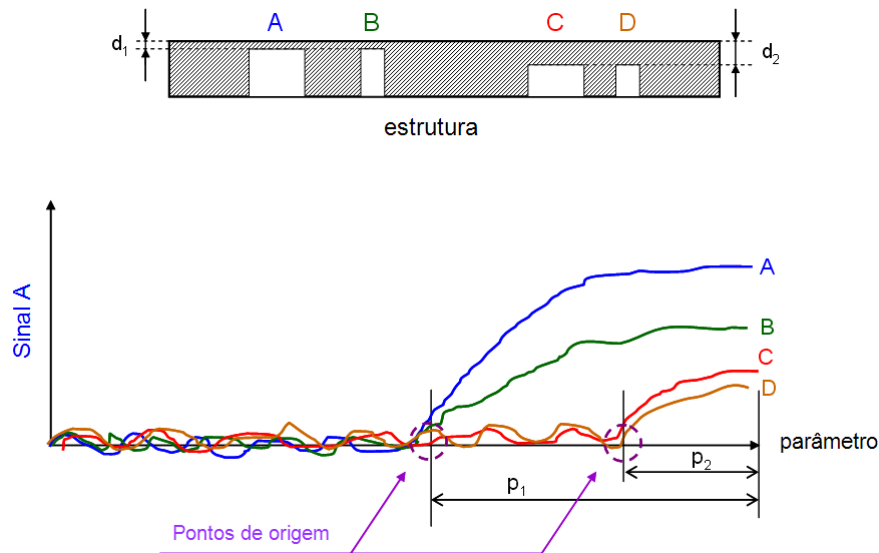


Figura 18 - Propriedade do tempo de processamento do defeito

A observação da figura anterior mostra que *A* e *B* eram defeitos de mesma profundidade na amostra, mas com diferentes diâmetros e, conseqüentemente, apresentavam diferentes volumes de material degradado. Portanto, mesmo possuindo idêntico posição de elevação de intensidade de sinal, tais intensidades eram marcadamente diferentes. Quando comparados com defeitos de menor profundidade, isto é, os defeitos *C* e *D*, além de diferentes intensidades de sinal, estes últimos apresentaram um atraso do ponto de elevação de suas intensidades. Estas observações justificam quantitativamente o apresentado nas Figuras 16 e 17, na qual uma susceptibilidade de detecção se relacionou com defeitos de maior volume, ou seja, defeitos de corrosão simulados com maior diâmetro e profundidade.

Sendo assim, os parâmetros p_1 e p_2 da figura anterior (Figura 18) representam o processamento de defeitos de corrosão com profundidades de 50% e 30% da espessura metálica da parede da amostra, respectivamente. A Tabela 2 apresenta os valores calculados destes parâmetros em função da espessura residual de parede.

Tabela 2 - Tempos de processamento calculados

Espessura (%)	Parametro p
70%	2 - 3
50%	5 - 6

Foi considerado que os parâmetros apresentados na tabela anterior possuem uma correlação linear com o volume de material degradado. Por outro lado, se sabe que tais parâmetros podem sofrer variações no seu cálculo e influenciarem na precisão da profundidade de corrosão. Desta maneira, se optou por estabelecer, para a técnica de *termografia ativa*, classes de defeitos em função da profundidade de corrosão na parede metálica, que se acham reportadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Classes de defeitos de corrosão

Classe	Profundidade (%)
1	10
2	30
3	50
4	> 50

Os resultados obtidos nas inspeções comprovaram a eficácia da técnica de *termografia ativa* na detecção de uma quantidade significativa de defeitos em posições superficiais das ambas as amostras. Neste estudo de viabilidade, também foi proposto um critério de detecção em função do tambor, da espessura residual de parede e da dimensão do defeito. Além disso, a técnica de *termografia ativa* se mostrou capaz de fornecer informações relevantes ao inspetor, permitindo a distinção entre informações verdadeiras, provocadas por descontinuidades no material, e outras falsas, provocadas por imperfeições superficiais associadas com o processo de fabricação e uso dos tambores.

Conclusões

Este estudo foi desenvolvido e teve como objetivo analisar a viabilidade da aplicação da técnica de *termografia ativa* na inspeção de tambores de rejeitos das usinas nucleares Angra 1 e 2. Tal técnica foi proposta por se caracterizar pela ausência de contato físico entre equipamento de medição e tambores de rejeito, além de uma alta velocidade de inspeção. Para tal estudo, alguns experimentos foram realizados visando a possibilidade de detecção de regiões de corrosão nas paredes internas dos tambores e a avaliação da espessura residual de parede em tais regiões.

Inicialmente, defeitos com diferentes volumes de degradação de material foram simulados em amostras retiradas de tambor *verde* e outro *amarelo*. Resultados obtidos nas inspeções comprovaram a eficácia da técnica de *termografia ativa* na detecção de uma quantidade significativa de defeitos em posições subsuperficiais das ambas as amostras. Neste estudo de viabilidade foi proposto um critério de detecção em função do tambor, espessura residual de parede e dimensão do defeito.

Ainda nesta etapa do estudo, a técnica de *termografia ativa* se mostrou capaz de fornecer informações relevantes ao inspetor, permitindo a distinção entre informações verdadeiras, provocadas por descontinuidades no material, e outras falsas, provocadas por imperfeições superficiais associadas com o processo de fabricação e uso dos tambores.

Dando continuidade ao estudo da eficiência e inspeções pela técnica de *termografia ativa*, foi desenvolvido um algoritmo matemático que permitiu uma classificação dos defeitos em função da profundidade de corrosão na parede metálica das amostras.

Finalmente, num tambor verde, foram simulados defeitos de diferentes classes em sua parede interna e promoveu-se sua inspeção em protótipo desenvolvido para a técnica de *termografia ativa*. O resultado da inspeção comprovou a viabilidade de aplicação da referida técnica na detecção de defeitos estruturais no tambor verde.

Referências

- 1- AGUIAR, L. A. P. P. **Automatização e aplicação da termografia ativa na inspeção de tambores de rejeitos radioativos**. Rio de Janeiro. Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, 2010, 54p.