

Detecção e dimensionamento de corrosão em aço carbono revestido utilizando termografia ativa**Detection and dimensioning of corrosion in coated carbon steel using active thermography**

DOI:10.34117/bjdv6n10-038

Recebimento dos originais: 08/09/2020

Aceitação para publicação: 05/10/2020

Neidson Santos da Costa

Graduando em Engenharia Mecânica pelo Instituto Federal da Bahia.

Instituição: Instituto Federal da Bahia, Campus Salvador.

Endereço: Rua Emídio dos Santos S/N, Barbalho, CEP: 40301-015, Salvador, BA, Brasil.

Email: neidisonscosta@gmail.com

Paulo Gabriel Ferreira de Azevedo

Graduando em Engenharia Química pelo Instituto Federal da Bahia.

Instituição: Instituto Federal da Bahia, Campus Salvador.

Endereço: Rua Emídio dos Santos S/N, Barbalho, CEP: 40301-015, Salvador, BA, Brasil.

Email: paulo97745@gmail.com

Débora Carvalho da Silva Oliveira

Graduanda em Engenharia Química pelo Instituto Federal da Bahia.

Instituição: Instituto Federal da Bahia, Campus Salvador.

Endereço: Rua Emídio dos Santos S/N, Barbalho, CEP: 40301-015, Salvador, BA, Brasil.

Email: carvalho_debora2@outlook.com

Luana Teixeira Macedo

Graduanda em Engenharia Mecânica pelo Instituto Federal da Bahia.

Instituição: Instituto Federal da Bahia, Campus Simões Filho.

Endereço: Rua Vital Brasil, 1394, Pitanguinha, CEP: 43700-000, Simões Filho, BA, Brasil.

Email: luuteixeira12@gmail.com

Luiz Antonio Pimentel Cavalcanti

Doutor em Engenharia Química pela Universidade Federal de Pernambuco.

Instituição: Instituto Federal da Bahia, Campus Salvador.

Endereço: Rua Emídio dos Santos S/N, Barbalho, CEP: 40301-015, Salvador, BA, Brasil.

E-mail: luizufpe@yahoo.com.br

Ivan Costa da Silva

Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela COPPE/UFRJ

Instituição: Instituto Federal da Bahia, Campus Salvador.

Endereço: Rua Emídio dos Santos S/N, Barbalho, CEP: 40301-015, Salvador, BA, Brasil.

E-mail: ivan.silva@ifba.edu.br

Cláudia Teresa Teles Farias

Doutora em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela COPPE/UFRJ

Instituição: Instituto Federal da Bahia, Campus Salvador.

Endereço: Rua Emídio dos Santos S/N, Barbalho, CEP: 40301-015, Salvador, BA, Brasil.
E-mail: cttfarias@gmail.com

RESUMO

A fim de manter a segurança e confiabilidade de estruturas, a detecção da corrosão presente em equipamentos e tubulações industriais com revestimento por pintura, também se faz necessária. A termografia surge como alternativa com base na análise do gradiente de temperatura presente na superfície a ser inspecionada. Seu diferencial consiste em ser um ensaio não destrutivo, com alta velocidade de inspeção e fácil automatização. No intuito de aperfeiçoar a análise dos resultados, técnicas de processamento de imagem podem ser úteis na classificação e localização de defeitos. Este trabalho tem como objetivo utilizar a inspeção termográfica ativa, para detecção e dimensionamento de processos corrosivos em chapa de aço SAE 1020, revestido com pintura industrial. Foi utilizado um corpo de prova com espessura de 12 mm, com descontinuidades simulando processos corrosivos sob pintura em diferentes profundidades. As imagens termográficas obtidas foram submetidas a técnicas de processamento de imagens, para detecção da região afetada. Os resultados comprovaram a presença de gradiente de temperatura nas regiões oxidadas e foi possível a localização dos defeitos ao longo da placa em função da sua posição por diferença no valor da escala de cinza.

Palavras-chave: Termografia. Corrosão. Inspeção.

ABSTRACT

Aiming maintains the safety and the reliability of the structures, the detection of corrosion in industrial equipment and pipes with coating paint, is also necessary. The thermography is an alternative based on analysis of surface temperature gradient to be inspected. In order to improve the analysis of the results, images processing techniques can be useful in the classification and location of the defects. This work aims to use the active thermography inspection, for the detection and dimensioning corrosion process in steel sheet SAE 1020, coated with industrial paint. A specimen with thickness of 12 mm was used, with defects simulating a corrosive process under paints at different depths. The thermographics images obtained were submitted at images processing techniques, to detect the region affected. The results proved the presence of a temperature gradient in the oxidized regions and it was possible to locate the defects along the sheet in function of their position, using the difference of value in grayscale.

Keywords: Thermography. Corrosion. Inspection.

1 INTRODUÇÃO

A corrosão é considerada como um dos problemas mais antigos da indústria. No âmbito econômico, a corrosão afeta no encurtamento do tempo de vida útil de equipamentos, manutenção preventiva, como pintura, contaminação dos produtos, danos aos equipamentos adjacentes etc. Já no aspecto social, o principal fator é a segurança: ocorrência de incêndios, estruturas danificadas, explosão de dutos, entre outros. Ademais, pode-se citar risco à saúde, com contaminação de produtos alimentícios, ou possível formação de produtos de natureza poluente (ZAVAREH *et al.*, 2018). Diante disso, para detecção das possíveis mudanças estruturais causadas pelo processo corrosivo, são frequentemente aplicados os ensaios não destrutivos (END). Entre estes ensaios, as

técnicas ultrassônicas (LI *et al.*, 2014), a técnica de correntes parasitas pulsadas (SILVA *et al.*, 2014) e os ensaios termográficos (TITMAN, 2001) são comumente utilizados para a detecção de corrosão. Entretanto, as duas primeiras técnicas necessitam de um investimento financeiro elevado e que demandam mais tempo, o que pode se tornar um obstáculo (SILVA *et al.*, 2014), diferente da termografia.

O ensaio termográfico possibilita a análise e medição da variação térmica da superfície do corpo a ser inspecionado, tornando possível a detecção de heterogeneidades no material (TITMAN, 2001). Por ser de natureza não invasiva, possuir rápida inspeção e fácil leitura visual, a termografia se torna atrativa em avaliações estruturais. Estudos anteriores compararam três técnicas de ensaios não-destrutivos (termografia, ultrassom e correntes parasitas) na detecção de falhas em substratos metálicos com compósito e revestimentos anticorrosivos (GROSSO *et al.*, 2017). Os autores concluíram que as três técnicas foram eficientes na detecção, com destaques para o ultrassom e a termografia. Portanto, tem-se que a termografia exibe seu destaque diante de outras técnicas de inspeção.

Para uma maior precisão nos resultados, técnicas de processamento digital de imagens, como filtros e transformadas, podem ser úteis. Estudiosos já realizaram uma ampla revisão sobre o estudo destas técnicas em imagens termográficas (BARCELOS, 2015). Outros estudos usaram o processamento de imagens com o objetivo de dimensionar os defeitos, onde a autora obteve os resultados com erros entre 30 e 80%, sendo os erros maiores atribuídos à limitação experimental. Então, o processamento digital de imagens aliado a termografia se mostrou satisfatório (GROSSO, 2011).

Este trabalho se propõe a avaliar a eficiência do ensaio termográfico ativo, na localização e estimativa do diâmetro das descontinuidades, em corpos de prova de aço carbono SAE 1020, revestidos com pintura industrial, com auxílio da câmera termográfica e técnicas de processamento de imagens.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CORROSÃO

A corrosão pode ser definida como uma interação físico-química que promove a deterioração do material quando exposto a ambientes corrosivos, como água, solo, atmosfera, produtos químicos etc. Considerado um processo espontâneo, o seu resultado acaba sendo um problema para o meio operacional, podendo causar falhas estruturais ou até mesmo a inadequação ao uso (DWIVEDI *et al.*, 2017; GENTIL, 1996). Resumidamente, a corrosão é verificada no processo em que há consumo

da substância que compõe o material para a formação de uma outra substância, seja por via de reação química, a chamada corrosão química, ou via corrosão eletroquímica, quando constata-se a transformação da substância que compõe o material via reação de transferência de elétrons (DWIVEDI *et al.*, 2017), sendo o último o mais frequente na natureza e envolve necessariamente a presença de água (AMBROZIN *et al.*, 2009).

Dentre os materiais utilizados na indústria, que se mostram mais suscetíveis ao processo corrosivo, destaca-se o aço carbono. Por sua ampla aplicabilidade e a viabilidade econômica satisfatória, esse material é muito empregado nas fábricas e, devido a sua composição de cerca de 99% de átomos de ferro (Fe), em percentuais mássicos, é amplamente estudado pela comunidade científica (VICHESSI *et al.*, 2016).

Em virtude das suas constituições, as estruturas de aço carbono merecem atenção quando se trata de corrosão eletroquímica, justamente devido ao potencial de oxidação do Fe a íons Fe(II), mais comuns que o Fe(III) (Equação 1) (GENTIL, 1996).



Baseando-se na Equação 1, nota-se o favorecimento termodinâmico do processo em que o Fe é oxidado a Fe²⁺, quando nas condições de 1atm e 25°C, posto que seu potencial de oxidação nessas condições é positivo. Essa análise demonstra a alta possibilidade da ocorrência da corrosão no aço carbono, tornando importante o estudo desse problema.

2.2 FORMAS DE TRANSMISSÃO DE CALOR

Entende-se calor como uma forma de energia que se transfere através da fronteira de um sistema, tanto pela existência de um gradiente de temperatura entre os corpos, quanto pela mudança de estado físico ocorrida no meio, permitindo a transferência de energia de um corpo para o outro. Esse processo é denominado transmissão de calor. O calor é avaliado mediante o efeito que o processo causa na vizinhança, sendo transferido sempre do ponto mais alto de temperatura para o mais baixo (CASTELLAN, 2011).

A energia transmitida a partir de uma troca de calor é definida baseando-se no tipo de processo que a mesma está envolvida. Quando a transferência ocorre devido à diferença de temperatura, chama-se de calor sensível, porém, quando ocorre a mudança de estado, o processo enérgico é nomeado como calor latente (CASTELLAN, 2011). A transferência de calor pode ocorrer

de três formas: por condução, convecção ou radiação. Considerando o ensaio termográfico, apenas a condução e a radiação são relevantes para a análise (GROSSO, 2011).

A convecção ocorre quando há transferência de calor entre um corpo sólido e um fluido, e se dá por dois tipos, de forma natural ou forçada. Em ambos os casos o fluido tem que estar em movimento para o processo ocorrer, dessa forma, se torna inviável a análise termográfica quando se trata de uma transferência de calor por convecção (RODRIGUES, 2020).

Na condução, o calor é transmitido através da transferência de energia cinética entre as partículas que constituem o sistema, podendo ocorrer entre dois corpos sólidos que estejam em contato ou entre as próprias partículas do corpo, desde que haja um gradiente de temperatura presente no meio. Nessa transferência, o curso do calor se direciona da região com maior potencial energético, que possui uma maior temperatura, para a região de menor potencial energético, com menor temperatura, a fim de se atingir o equilíbrio térmico do meio (BARROSA, 2004; GROSSO, 2011). Quando a taxa de transferência de calor não varia com o tempo, ela é classificada como em regime permanente, porém quando ocorre a variação no tempo levando ao equilíbrio térmico, denomina-se regime transiente (GROSSO, 2011).

Existem duas propriedades específicas do material que influenciam na condução do calor, a condutividade térmica, que quantifica a taxa de condução de calor e a difusividade térmica, que mede a capacidade do material com relação a condução e armazenamento de energia térmica, ou seja, esta propriedade descreve o quão rapidamente um material responde a variações de temperatura (GROSSO, 2011).

A condução é descrita matematicamente pela lei de Fourier, através da Equação 2 (COELHO, 2016):

$$Q = -k A \frac{dT}{dx} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

Q = taxa de transferência de calor (J/s ou W);

k = condutividade térmica do material ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$);

A = área de transferência de calor (m^2);

T = temperatura (K);

x = coordenada que representa a direção do fluxo de transferência de calor (m).

A radiação é uma forma de transferência de calor que consiste na emissão de energia térmica através de ondas eletromagnéticas, advindas da agitação dos átomos que compõem o material, sendo o calor transmitido de um corpo a mais baixa temperatura para um de maior, mesmo sem o contato

direto entre eles. A energia que incide sobre um corpo é parte absorvida, refletida e transmitida através dele mesmo. Quando o calor é transmitido dessa forma, é classificado como calor radiante (BARROSA, 2004). As características da radiação emitida pelos corpos diferem entre si a depender do tipo do material e da temperatura no qual se encontram. Os corpos com maior capacidade de absorção de energia são também os que possuem uma maior taxa de emissão (GROSSO, 2011).

A emissividade é uma propriedade importante no estudo da termografia, pois diz respeito à capacidade que um corpo possui em emitir energia por radiação da sua superfície, podendo ser calculada através da razão entre a radiância de um determinado material e a radiância de um corpo negro, ambos na mesma temperatura (GROSSO, 2011). A taxa de transferência de calor é regida pela lei de Stefan-Boltzmann, que faz uma correlação entre a taxa de energia radiante de um corpo, a temperatura e as características de emissividade da sua superfície. Sendo expressa matematicamente pela Equação 3 (COELHO, 2016).

$$Q = \sigma \varepsilon AT^4 \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

Q = taxa de energia radiante emitida pelo corpo (W);

σ = constante dimensional com valor igual a $5,67 \times 10^{-8}$ W (m².K⁻⁴);

ε = emissividade;

A = área de transferência de calor (m²);

T = temperatura da superfície do corpo emissor (K);

Através da equação de Stefan-Boltzmann é possível perceber a direta relação entre a temperatura e a intensidade da energia irradiada pelo corpo, quanto mais aquecido o corpo for, maior será a agitação dos átomos que o compõe, isso acarretará num aumento de temperatura e da radiação emitida por ele, o contrário acontece quando um corpo recebe uma menor fonte de calor (GROSSO, 2011).

2.3 TERMOGRAFIA

A termografia, sendo uma técnica utilizada para análise do perfil de temperatura da superfície de um corpo, torna possível a visualização de regiões que apresentam um gradiente térmico em relação a face a ser inspecionada, indicando a possibilidade de descontinuidades naquela região (GROSSO, 2011).

Na literatura, é possível encontrar comparativos entre a técnica de termografia ativa e outros ensaios não destrutivos (DUAN *et al.*, 2018; GRYZAGORIDIS e FINDEIS, 2017; MORESI e BELLAGUARDA, 2016; ROCHA e POVOAS, 2019). Pesquisadores inseriram defeitos cilíndricos em corpos de provas de alumínio e acrílico, e posteriormente, utilizados o ensaio termográfico ativo e a técnica *Tap Test*. Foram utilizadas duas peças de cada material. Foi analisado o efeito da profundidade e do diâmetro dos defeitos nos resultados.

Para a técnica *Tap Test*, foi utilizado o Mitsui Woodpecker WP-632AM, contendo um sensor para a medição do tempo de impacto. Para o ensaio termográfico, o aquecimento ocorreu, durante cinco segundos, utilizando um secador de cabelo. As imagens termográficas foram capturadas utilizando uma câmera FLIR T440, a cada 15 segundos. A técnica *Tap Test* obteve melhores resultados nos corpos de prova de alumínio, consequência da difusividade térmica do material, entretanto, a termografia ativa conseguiu identificar defeitos até 3,5 mm abaixo da superfície inspecionada e com diâmetros de 8 mm (GRYZAGORIDIS e FINDEIS, 2017).

Em outro trabalho, foi realizada a comparação entre as técnicas de: potencial de corrosão, resistência à polarização e termografia por infravermelho, com o objetivo de determinar a metodologia eficiente para detecção de corrosão em estrutura de concreto armado. Os testes realizados mostram que a utilização das três técnicas juntas trás para a inspeção uma maior fonte de dados dos índices de corrosão na estrutura, porém a utilização da termografia, além de evidenciar os locais onde provavelmente pode haver a corrosão, também é a metodologia que pode ser sozinha aplicada, quando se trata de estruturas de concreto sem indícios aparentes de corrosão (MORESI e BELLAGUARDA, 2016).

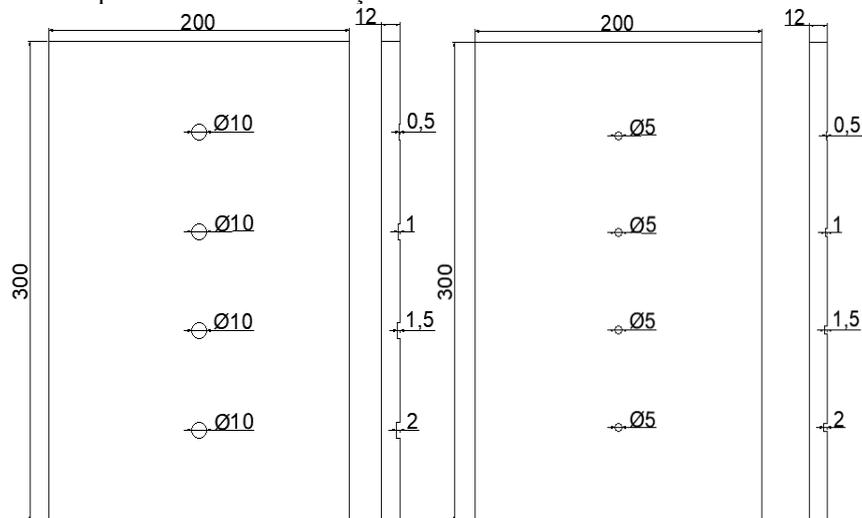
A inspeção termográfica infravermelha ativa em materiais compósitos, vem crescendo cada vez mais nas últimas décadas. O trabalho realizado na avaliação da confiabilidade da termografia pulsada em comparação a testes ultrassônicos para danos por impactos em painéis de polímero de fibra de carbono reforçado (*PRFC*), utilizando-se da técnica termográfica pulsada de transmissão e como comparativo um sistema ultrassônico automatizado, com sondas de imersão. Após inspeção de trinta e cinco amostras com espessuras variadas que foram impactadas usando um penetrador de metal, e os dados processados no algoritmo de análise das probabilidades de detecção, a comparação entre os dados mostrou que a técnica de termografia pulsada de transmissão, é a que traz maior confiabilidade na inspeção quando comparada a técnica de ultrassom, para os parâmetros utilizados no experimento (DUAN *et al.*, 2018).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

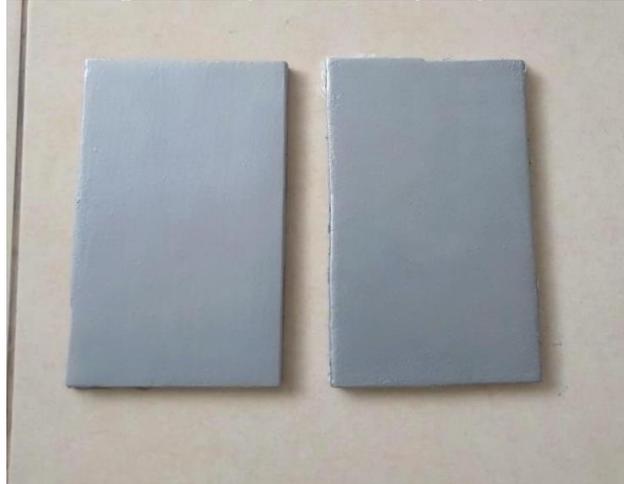
Os corpos de provas utilizados no trabalho foram duas chapas com composição de aço-carbono *SAE 1020*, suas dimensões e a localização dos defeitos podem ser vistas na Figura 1. As chapas contêm quatro defeitos cada, que foram usinados utilizando uma fresadora de bancada e os seus centros estão distanciados em 60 mm. Para a chapa 1, a ferramenta utilizada possui 10mm de diâmetro, para a chapa 2 o diâmetro é de 5mm. No intuito de simular o processo corrosivo sob a película de tinta, os furos foram produzidos em diferentes profundidades, posteriormente preenchidos com óxido de ferro compactado, a fim de analisar a propagação do calor em cada configuração.

O procedimento de pintura seguiu a norma Petrobras N-2 SC - 14 . As tintas utilizadas foram da marca Perfortex[®]. A tinta de fundo tem especificação *Perfordur WET-N-2680*, tem proteção anticorrosiva e química, além de possuir aspecto brilhante. A tinta de acabamento de coloração alumínio tem especificação *Perforthane HB-N-2677*, alta retenção de brilho e cor, resistência à agressividade química. O intervalo entre cada demão de tinta foi de 24 horas. A Figura 2 apresenta as chapas após os dois processos de pintura.

Figura 1. Corpos de Provas: Localização dos defeitos e dimensionamento em mm



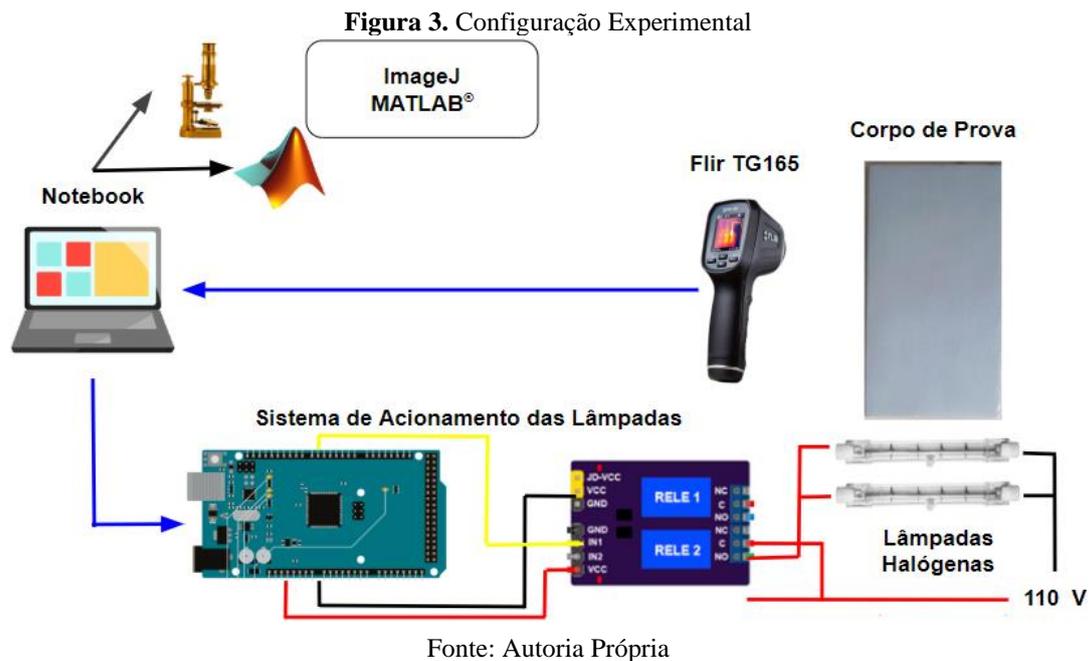
Fonte: Autoria Própria

Figura 2. Corpos de Provas após a pintura

Fonte: Autoria Própria

O aquecimento foi realizado através de um circuito elétrico, contendo duas lâmpadas halógenas 500W/127V, da fabricante OuroLux[®], conectadas em paralelo. As lâmpadas foram posicionadas a uma distância de 0,015m das placas, pois foi a distância que apresentou melhores resultados. O fluxo de calor emitido pelas lâmpadas foi direcionado aos corpos de provas, sendo acionado por um sistema composto por uma placa contendo um microcontrolador *ATMEGA* tipo Arduíno e relés.

Após o período de aquecimento, a câmera termográfica Flir[®] modelo TG165, com uma resolução de 80 x 60 pixels, foi usada para a inspeção termográfica. A câmera foi fixada a uma distância de 0,4m do corpo de prova, buscando abranger toda superfície a ser inspecionada. Com o objetivo de determinar o decaimento da temperatura das regiões com e sem defeitos, as imagens foram processadas no *software ImageJ*[®]. A Figura 3, mostra a configuração experimental utilizada no trabalho.



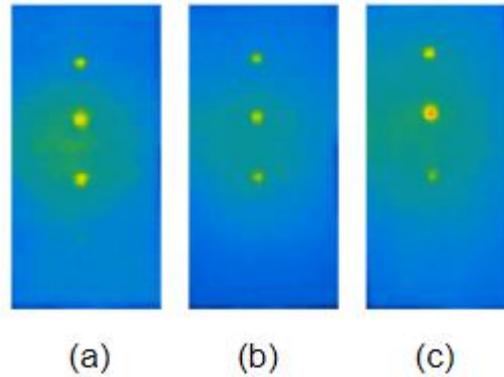
O desenvolvimento do trabalho se voltou para a localização dos defeitos, abaixo das camadas de tinta e determinação de suas respectivas dimensões. Com isso, as chapas foram aquecidas, em intervalos de tempo que variaram de três a nove segundos, em intervalos de 3 segundos. Em seguida, foram coletados os valores da escala termográfica, ao longo do eixo central da placa, com o objetivo de construir curvas de Escala de cinza x Largura da placa, e conseqüentemente localizar os defeitos. As imagens termográficas foram coletadas 1 segundo após o fim do aquecimento. A partir dos gráficos gerados, os valores de largura a meia altura foram associadas aos valores de diâmetro dos defeitos. Este procedimento foi realizado em triplicata para cada tempo de aquecimento e os resultados são apresentados no decorrer do trabalho.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ETAPA 1 - ANÁLISE VISUAL DOS TERMOGRAMAS

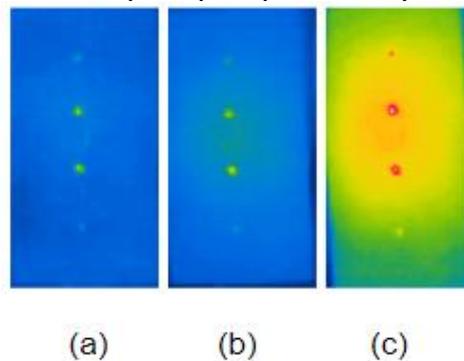
As Figuras 4 e 5 mostram as imagens termográficas das placas com defeitos de 5 e 10 mm de diâmetro, respectivamente, após diferentes tempos de aquecimento. É possível visualizar a existência dos gradientes pontuais de temperatura, que são atribuídos às descontinuidades ocasionadas pela corrosão. Uma análise pertinente é sobre o tempo de aquecimento, o que, evidentemente, afeta na detecção visual dos pontos de corrosão das duas placas.

Figura 4. Imagens termográficas da chapa 1, após o período de aquecimento de (a) 3s, (b) 6s e (c) 9s.



Fonte: Autoria Própria

Figura 5. Imagens termográficas da chapa 2, após o período de aquecimento de (a) 3s, (b) 6s e (c) 9s.



Fonte: Autoria Própria

4.2 ETAPA 2 - GRÁFICO VALOR NA ESCALA DE CINZA X COMPRIMENTO

O objetivo da segunda etapa do trabalho consistiu em construir curvas que mostram o valor em escala de cinza, nos tempos de aquecimento de 3, 6 e 9s, ao longo do eixo central da placa, passando pelos pontos onde constam os defeitos. Estes gráficos podem ser observados nas Figuras 7 e 8. Para isso, as imagens termográficas foram submetidas ao *software ImageJ*[®]. Dentro do *software*, as imagens seguiram o seguinte procedimento:

1. Aplicação do filtro *Smooth*;
2. Conversão de *RGB* para *8-Bits*;
3. Utilização da ferramenta *Measure*, localizada dentro do bloco *Analyze*, para conversão da unidade *pixels* em metros.

Figura 7. Curvas de escala de cinza versus comprimento da chapa 1, em tempos de aquecimento de 3, 6 e 9s

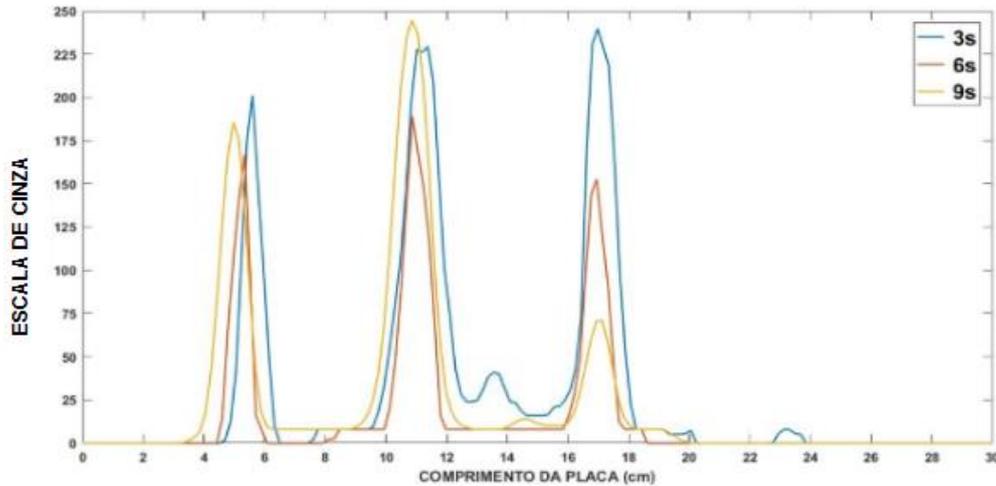
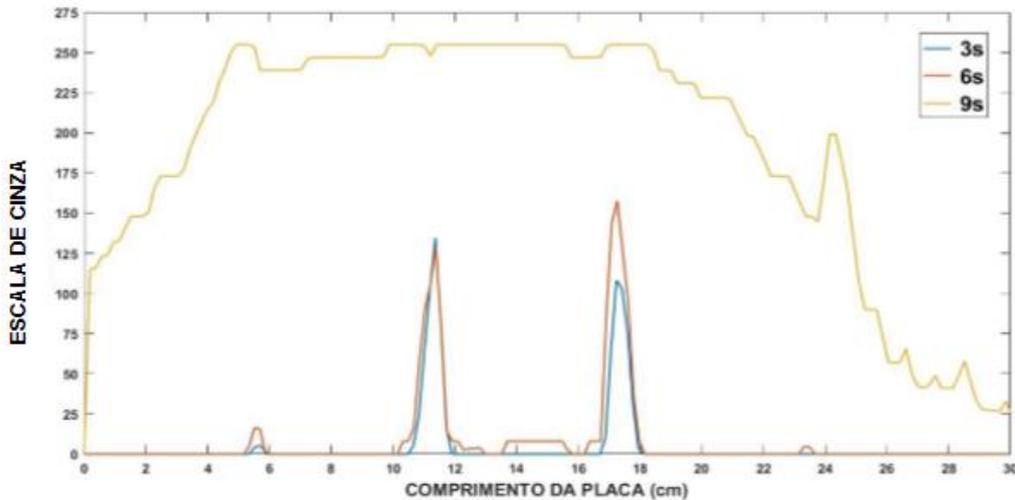


Figura 8. Curvas de escala de cinza versus comprimento da chapa 2, em tempos de aquecimento de 3, 6 e 9s



Observando as Figuras 7 e 8, nota-se que as regiões dos defeitos exibem uma escala de cor, logo uma intensidade da radiação, diferente das regiões da placa onde não se há defeitos, endossando a propagação de calor diferenciada dessas regiões, tornando os defeitos evidentes por meio da termografia. Na Figura 8, a curva para 9s de aquecimento não possui picos destacados, sendo essa observação atribuída ao tempo de aquecimento no qual a placa foi exposta, homogeneizando a temperatura superficial por todo o corpo de prova.

4.3 ETAPA 3 - LOCALIZAÇÃO DOS DEFEITOS

Para a localização dos defeitos, foram avaliadas as regiões onde ocorriam os picos de cada defeito, a partir das curvas mostradas nas Figuras 7 e 8. Nas Tabelas 1 e 2, é possível visualizar uma comparação entre as localizações reais dos defeitos e os melhores resultados encontrados após a etapa de processamento de imagens.

Tabela 1. Comparação dos valores de localização real e o localização estimada para a chapa 1.

Tempo de Aquecimento(s)	Profundidade (mm)	Localização Real (cm)	Localização Estimada (cm)	Erro (%)
3,00	2,00	6,00	5,60	6,60
3,00	1,50	12,00	11,39	5,10
3,00	1,00	18,00	16,99	5,60
3,00	0,50	24,00	23,13	3,60
6,00	2,00	6,00	5,35	10,90
6,00	1,50	12,00	10,88	9,30
6,00	1,00	18,00	16,96	5,80
6,00	0,50	24,00	ND	ND
9,00	2,00	6,00	4,97	17,10
9,00	1,50	12,00	10,87	9,40
9,00	1,00	18,00	17,13	4,80
9,00	0,50	24,00	ND	ND

Tabela 2. Comparação dos valores de localização real e o localização estimada para a chapa 2.

Tempo de Aquecimento(s)	Profundidade (mm)	Localização Real (cm)	Localização Estimada (cm)	Erro (%)
3,00	2,00	6,00	5,69	5,20
3,00	1,50	12,00	11,38	5,10
3,00	1,00	18,00	17,24	4,20
3,00	0,50	24,00	ND	ND
6,00	2,00	6,00	5,52	8,00
6,00	1,50	12,00	11,39	5,00
6,00	1,00	18,00	17,27	4,00
6,00	0,50	24,00	23,32	2,80
9,00	2,00	6,00	ND	ND
9,00	1,50	12,00	ND	ND
9,00	1,00	18,00	ND	ND
9,00	0,50	24,00	ND	ND

Analisando os dados apresentados nas Tabelas 1 e 2, pode-se observar que o erro da localização estimada via processamento de imagem decresce quanto menor for a profundidade dos defeitos, isso se deve ao fato de que, quanto menor a profundidade, pois variou a quantidade de energia acumulada, alterando o local de pico, além do erro proveniente do *software ImageJ*[®], contudo, a maioria das estimativas ficaram abaixo dos 10%.

4.4 ETAPA 4 - ESTIMATIVA DO DIÂMETRO DOS DEFEITOS

Para a estimativa do diâmetro dos defeitos, foi utilizada a largura a meia altura, a partir das curvas mostradas nas Figuras 7 e 8. Nas Tabelas 3 e 4, é possível visualizar uma comparação entre as dimensões reais dos defeitos e os melhores resultados encontrados após a etapa de processamento de imagens.

Tabela 3. Comparação dos valores de diâmetro real e o diâmetro estimado para chapa 1.

Tempo de Aquecimento(s)	Profundidade (mm)	Diâmetro Real (mm)	Diâmetro Estimado (mm)	Erro (%)
3,00	2,00	10,00	10,80	8,00
3,00	1,50	10,00	14,50	45,00
3,00	1,00	10,00	10,90	9,00
3,00	0,50	10,00	8,10	19,00
6,00	2,00	10,00	7,40	26,00
6,00	1,50	10,00	9,20	8,00
6,00	1,00	10,00	11,10	11,10
6,00	0,50	10,00	ND	ND
9,00	2,00	10,00	7,20	28,00
9,00	1,50	10,00	7,50	25,00
9,00	1,00	10,00	8,90	11,00
9,00	0,50	10,00	ND	ND

Tabela 4. Comparação dos valores de diâmetro real e o diâmetro estimado para chapa 2.

Tempo de Aquecimento(s)	Profundidade (mm)	Diâmetro Real (mm)	Diâmetro Estimado (mm)	Erro (%)
3,00	2,00	5,00	5,40	8,00
3,00	1,50	5,00	7,00	40,00
3,00	1,00	5,00	7,20	44,00
3,00	0,50	5,00	ND	ND
6,00	2,00	5,00	5,30	6,00
6,00	1,50	5,00	7,00	40,00
6,00	1,00	5,00	7,20	44,00
6,00	0,50	5,00	5,40	8,00
9,00	2,00	5,00	ND	ND

9,00	1,50	5,00	ND	ND
9,00	1,00	5,00	ND	ND
9,00	0,50	5,00	ND	ND

Diante dos resultados apresentados nas Tabelas 3 e 4, nota-se que em alguns casos o diâmetro estimado via processamento de imagens se aproximou das dimensões dos defeitos reais, com alguns erros de 8%, 9% e 11%, por exemplo, nos defeitos de maiores profundidades. Isso se deve ao fato de que o acúmulo de calor nas regiões mais profundas, que possuem mais óxido, é maior, o que provoca uma maior emissão, facilitando a captura da imagem pela câmera termográfica. No entanto, a inspeção com o tempo de nove segundos de aquecimento na chapa 2, apresentou sinais que destoam dos demais, tornando inviável o dimensionamento utilizando o mesmo processamento das outras inspeções. Alguns dos defeitos com profundidade de 0,5mm não puderam ser dimensionados, pois não foram encontrados diferenciais de escala.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi utilizada a inspeção termográfica ativa, para detecção e estimativa do diâmetro das regiões afetadas por processos corrosivos em chapa de aço *SAE 1020*, revestido com pintura industrial. As curvas de valor da escala de cinza em função do comprimento longitudinal da placa localizado em um eixo que intercepta os pontos centrais de corrosão nos corpos de prova possibilitou determinar as áreas onde haviam defeitos e estimar o seu diâmetro, obtendo erros dentro do esperado nos primeiros segundos de troca térmica, porém foi observado que depois de ultrapassados 6 segundos de exposição, os dados excederam as condições favoráveis para o experimento, não só pelo alto percentual de erros obtidos, como também pelo aumento da demanda energética exigida pelo sistema, conseqüentemente impactando na viabilidade econômica de utilização da técnica. Concluindo que é de maior vantagem utilizar tempos de aquecimento iguais ou inferiores a seis segundos.

Considerando os valores estimados dos diâmetros via processamento de imagem, foram obtidos melhores resultados onde os defeitos possuíam maior profundidade, devido ao maior acúmulo de calor nesses locais. Entretanto, o oposto foi observado nos valores estimados de localização, mas neste caso, os erros, em sua maioria, se mantiveram abaixo dos 10%. Com isto, a termografia se mostra uma técnica de inspeção não destrutiva rápida e eficiente de inspeção desde que sejam controladas as possíveis fontes de erro.

REFERÊNCIAS

- AMBROZIN, A. R. P.; KURI, S. E.; MONTEIRO, M. R.. Corrosão metálica associada ao uso de combustíveis minerais e biocombustíveis. *Química Nova*, [s. l.], v. 32, n. 7, 2009.
- BARCELOS, E. Z.. **Termografia. Progressive evaluation of thermal images with segmentation and registration**. 2015. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, [S. l.], 2015.
- BARROSA, M. R.. Transmissão de Calor. *In: Princípios Fundamentais da Transferência de Calor*. Orientador: Hélio Morishita. 2004. Dissertação (Graduação em Engenharia Naval e Oceânica) - Dept. de Engenharia Naval e Oceânica, [S. l.], 2004. p. 48.
- CASTELLAN, G.. Fundamentos de Físico-Química. [S. l.]: LTC- Livros Técnicos e Científicos, 2011. 521p.
- COELHO, J. C. M.. Energia e Fluidos: Transferência de Calor. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2016. 292 p. v. 3.
- DUAN, Y., ZHANG, H., MALDAGUE, X. P., IBARRA-CASTANEDO, C., SERVAIS, P., GENEST, M., MENG, J. Reliability assessment of pulsed thermography and ultrasonic testing for impact damage of CFRP panels. *NDT and E International*, [S. l.], v. 102, p. 77-83, 19 nov. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963869518302627>. Acesso em: 15 abr. 2020.
- DWIVEDI, D.; LEPKOVÁ, K.; BECKER, T. Carbon steel corrosion: a review of key surface properties and characterization methods. *The Royal Society of Chemistry*, [S. l.], p. 4580-4610, 18 jan. 2017.
- GENTIL, V.. Corrosão. 3. ed. atual. e aum. [S. l.]: LTC- Livros Técnicos e Científicos, 1996.
- GROSSO, M. **Análise Termográfica de defeitos de corrosão em aços revestidos por materiais compósitos**. 2011. 88 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Metalúrgica) - Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, [S. l.], 2011. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10004533.pdf>. Acesso em: 17 fev. 2020.
- GROSSO, M.; ALMEIDA, P.; PACHECO, C.; SOARES, I.; REBELLO, J.; SOARES, S.; MARGARIT-MATTOS, I.; PEREIRA, G.; Evaluation of Non-destructive Techniques (Thermography, Ultrasound and Eddy Current) for Detection of Failures in Metallic Substrates with Composite Anticorrosive Coatings. *The Minerals, Metals & Materials Society*, [s. l.], 2017.
- GRYZAGORIDIS, J.; FINDEIS, D. Tap Testing vs. Thermography. *E-Journal of Nondestructive Testing (NDT)*, [s. l.], 2017. Disponível em: <https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=20626>. Acesso em: 17 abr. 2020.
- LI, D.; ZHANG, S.; YANG, Wei; ZHANG, Wenyao. Corrosion Monitoring and Evaluation of Reinforced Concrete Structures Utilizing the Ultrasonic Guided Wave Technique. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, [s. l.], v. 10, 20 fev. 2014.
- MORESI, C.; BELLAGUARDA, I. Metodologia Eficiente para Detecção de Corrosão em Estruturas de Concreto Armado. Orientador: MSc. Nielsen Alves. 2016. 32 p. TCC (Graduação) - Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ucb.br:9443/jspui/bitstream/123456789/8194/1/CarolineCostaMoresiTCCGRA DUACAO2016.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2020.

ROCHA, J. H. A.; PÓVOAS, Y. V. **Detecção de corrosão em concreto armado com termografia infravermelha e ultrassom. Ambiente Construído, Porto Alegre**, v. 19, n. 3, p. 53-68, jul./set. 2019. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

RODRIGUES, E.. Processos de Transmissão de Calor. In: Conforto Térmico das Construções. [S. l.]. 2020. Disponível em: https://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/images/c/c6/Transmissao_de_Calor_em_Edificacoes.pdf Acesso em: 19 mar. 2020.

SILVA, I. C.; BATISTA, L. S.; FARIAS, C. T. T.; SANTOS, Y. T. B.; 11TH EUROPEAN CONFERENCE ON NON-DESTRUCTIVE TESTING, 2014, Praga, República Tcheca. **Corrosion Inspection Using Pulsed Eddy Current**[...]. [S. l.: s. n.], 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/268809291_Corrosion_Inspection_Using_Pulsed_Eddy_Current. Acesso em: 14 mar. 2020.

TITMAN, D. Applications of thermography in non-destructive testing of structures. **NDT & E International**, [S. l.], p. 149-154, mar. 2001.

VICHESSI, R. B.; CALEGARI, F.; MARINO, C. E. B.; BERTON, M. A. C. SVET characterization of corrosion process in carbon steel 1020. P. 11-20 . In: **Proceedings of 2nd International Seminar on Industrial Innovation in Electrochemistry** . São Paulo: Blucher, 2016. São Paulo: Blucher, 2016.

ZAVAREH, M.; AHMED, S.; RAMIN, K.; RAMESH, S. Analysis of corrosion protection behavior of Al₂O₃-TiO₂ oxide ceramic coating on carbon steel pipes for petroleum industry. **Ceramics International**, [S. l.], p. 5967-5975, 15 abr. 2018.