

Detecção de corrosão de aço carbono revestida com tinta industrial aditivada com Óxido de Grafeno por termografia ativa

Corrosion detection of carbon steel coated with industrial paint with additives of Graphene Oxide through active thermography

DOI:10.34117/bjdv8n9-061

Recebimento dos originais: 25/07/2022

Aceitação para publicação: 31/08/2022

Caio de Oliveira Pinto

Graduando em Engenharia Química pelo Instituto Federal da Bahia (IFBA)
Instituição: Instituto Federal da Bahia (IFBA) - Campus Salvador
Endereço: Rua Emídio dos Santos, S/N, Barbalho, CEP: 40301-015, Salvador - BA
E-mail: caio191201@gmail.com

Olívia Karollyne Fidelix Magalhães

Graduando em Engenharia Química pelo Instituto Federal da Bahia (IFBA)
Instituição: Instituto Federal da Bahia (IFBA) - Campus Salvador
Endereço: Rua Emídio dos Santos, S/N, Barbalho, CEP: 40301-015, Salvador, BA
E-mail: omagalhaes94@gmail.com

Bruna Figueiredo do Nascimento

Doutoranda em Engenharia Química pela Universidade Federal de Pernambuco
Instituição: Universidade Federal de Pernambuco - Departamento de Engenharia Química
Endereço: Av. Prof, Moraes Rego, 1235, Recife - PE, CEP: 50670-910, Brazil
E-mail: figueiredoeq@gmail.com

Jorge Vinícius Fernandes Lima Cavalcanti

Doutor em Engenharia Química pela Universidade Federal de Pernambuco
Instituição: Universidade Federal de Pernambuco – Departamento de Engenharia Química
Endereço: Av. Prof, Moraes Rego, 1235, Recife - PE, CEP: 50670-910, Brazil
E-mail: jorge.cavalc@ufpe.br

Ivan Costa da Silva

Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Instituição: Instituto Federal da Bahia - Campus Salvador
Endereço: Rua Emídio dos Santos, S/N, Barbalho, CEP: 40301-015, Salvador - BA
E-mail: ivan.silva@ifba.edu.br

Cláudia Teresa Teles Farias

Doutora em Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Instituição: Instituto Federal da Bahia - Campus Salvador
Endereço: Rua Emídio dos Santos, S/N, Barbalho, CEP: 40301-015, Salvador - BA
E-mail: cttfarias@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

E-mail: luizufpe@yahoo.com.br

RESUMO

A corrosão é um problema de escala global e detectá-la de maneira eficiente representa um grande avanço para o setor industrial. Algumas técnicas não destrutivas (END's) possibilitam a detecção de processos corrosivos. A termografia infravermelho, técnica que se baseia no registro térmico da superfície do objeto, é amplamente utilizada nesse setor, possuindo rapidez, reprodutibilidade e baixo custo, mas com limitação de detecção a temperatura superficial do material, interferências de condições ambientais, e falta de precisão no acúmulo de calor nas descontinuidades. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a melhoria na detecção da corrosão por termografia ativa em corpos de prova de aço carbono SAE 1020, revestidos com pintura industrial aditivada com carga nanométrica de óxido de grafeno (OG). Foi sintetizado OG através do método de Hummers adaptado, sendo então designado para formulação da tinta de acabamento aditivada nas proporções de 0.1, 0.5, 1 e 2% (m/m). O corpo de provas foi pintado com duas demãos de tinta de base e uma de tinta de acabamento. Foram realizados ensaios de termografia ativa com intervalos de 3s, 6s e 9s, visando avaliar o período de tempo mais adequado para execução do ensaio. Como resultados, a utilização da tinta aditivada de OG auxiliou no sentido de maximizar a dispersão do calor pela superfície do corpo de prova, gerando imagens com menor interferências e possibilidade de dimensionamento mais preciso, os melhores resultados experimentais foram para o tempo de 6s e concentração de 0,5% de OG na tinta de acabamento.

Palavras-chave: termografia ativa, corrosão, inspeção.

ABSTRACT

The corrosion is a global scale problem and detecting it in an efficient way represents a great advance to the industrial sector. Some non-destructive testings (NDT's) allows the detection of corrosive processes. The infrared thermography, a technique based on the thermal registry of an object's surface, is widely used in this sector, owning quickness, reproducibility and low cost, but with the limitations of detecting only the material's surface, being interfered by environmental conditions, the lack of precision of heat buildup on discontinuities. In this context, the current study had the objective of evaluating the improvement on corrosion detection through active thermography in a specimen of carbon steel (SAE 1020), coated with industrial paint with nanometric additives of graphene oxide (GO). The GO was synthesized through the adapted Hummers method, being designated to the formulation of the industrial paint with additives on the proportion of 0.1, 0.5, 1 and 2% (m/m). The specimen was painted with two coats of foundation paint and one coat of finishing paint. Active thermography testings were accomplished with intervals of 3s, 6s and 9s, aiming to evaluate the most appropriate time for the testing execution. As results, the usage of paint with additives of OG helped the heat spread through the specimens surface, generating images with less interference and the possibility of precise sizing, the best experimental results were for the time of 6s and concentrations of 0.5% of GO on the finishing paint.

Keywords: active thermography, corrosion, inspection.

1 INTRODUÇÃO

A corrosão metálica em tubulações e equipamentos industriais, apresentam amplos prejuízos decorrentes da parada de processos e da reposição necessária de peças, além de acidentes de trabalho que custam a integridade e saúde dos funcionários (MELO, 2021). Acresce que, esses gastos não se limitam a metais, podendo ser estendidos para água, energia, e manufatura das chapas metálicas. Um estudo realizado pela NACE international foi utilizado para calcular o custo estimado da corrosão, retornando um valor de aproximadamente 3,4% do PIB, demonstrando um impacto de 2,5 trilhões de dólares na economia mundial e aproximadamente 70 bilhões de dólares na economia brasileira (MAZUMDER, 2020).

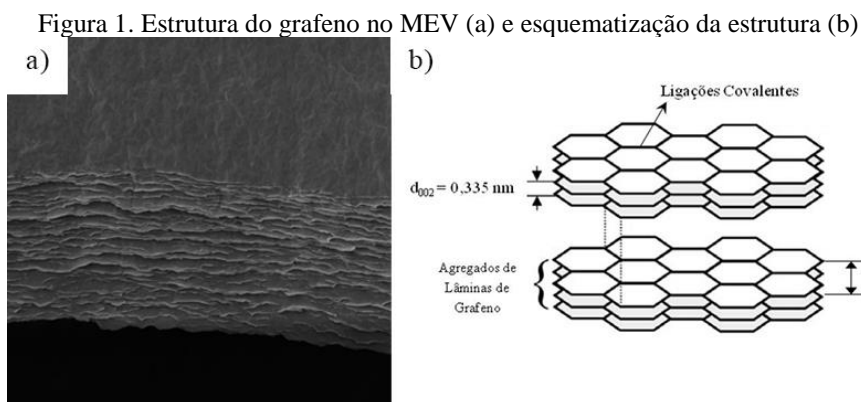
A fim de detectar discontinuidades provenientes de processos corrosivos, os ensaios não destrutivos (END's) são costumeiramente utilizados no monitoramento das tubulações e equipamentos industriais. Dentre os END's, a termografia por infravermelho tem sido usada na detecção de corrosão em equipamentos revestidos por pintura industrial.

A termografia por infravermelho é uma técnica que se baseia no registro térmico da superfície do objeto. No ensaio é utilizado um termógrafo, equipamento responsável por capturar radiação infravermelha e convertê-la em imagem térmica, que expressa a temperatura por meio de um espectro de cores visíveis. As vantagens do uso da termografia infravermelha são: rapidez, reprodutibilidade e baixo custo, além de não interferir no sistema de trabalho e processos dos corpos de prova, ampliando seu campo de atuação. Quanto às desvantagens, são notáveis: limitação de detecção a temperatura superficial do material, interferências de condições ambientais, e falta de precisão no acúmulo de calor nas discontinuidades (FORCELINI; MERINO; VARNIER, 2018).

No intuito de melhorar a condutividade térmica e a precisão no acúmulo de calor nas discontinuidades, o presente estudo visa avaliar, por meio de ensaios de termografia ativa, a melhoria na detecção da corrosão em corpos de prova de aço carbono SAE 1020, revestidos com pintura industrial aditivada com carga nanométrica de grafeno.

O grafeno é um material que vem sendo amplamente estudado para diversas aplicações, possui estrutura disposta em 2D, com espessura de um átomo e carbonos com hibridização sp^2 (Figura 1). Sua estrutura permite um melhor fluxo de elétrons em seu interior, dando ao material ótimas condutividade térmica e elétrica. O grafeno pode ainda ser aplicado na confecção de diferentes tipos de materiais como nanocompósitos, sendo

necessário, no entanto, desenvolver-se um processo viável industrialmente para fabricação e manejo do material (MOTA; CAMPOS, 2021).



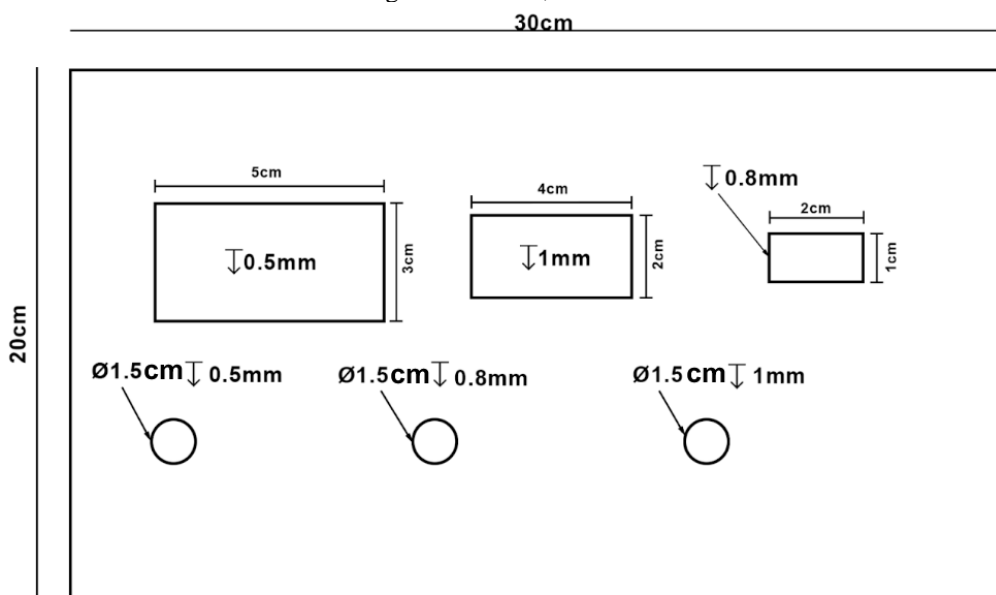
Fonte: GOMES; MATSUSHIMA; BALDAN, 2015; CAMARGOS; SEMMER; SILVA, 2017

2 METODOLOGIA

2.1 CORPO DE PROVA

O corpo de prova (chapa metálica), confeccionado em aço-carbono SAE 1020, foi usinado a fim de inserir descontinuidades análogas a processos corrosivos. Para tal, foi utilizada uma fresadora de bancada marca Manrod® e modelo MR-200. Foram inseridos três furos e três desbastes retangulares com dimensões visualizadas na Figura 2. Antes da pintura base do corpo de prova as descontinuidades foram preenchidas com óxido de ferro hidratado para simular produtos de corrosão.

Figura 2. Dimensionamento das descontinuidades da chapa: Três furos com 1.5cm de diâmetro e três retângulos com 5x3, 4x2 e 2x1 cm.



2.2 SÍNTESE DO GRAFENO

A síntese do grafeno foi realizada pela via *top-down*, pelo processo de esfoliação química, por garantir melhor rendimento e não exigir compostos de complexa obtenção. A síntese do presente estudo irá se basear na síntese de Hummers, tendo como produto esperado o óxido de grafeno (OG).

A síntese foi iniciada com a adição de 140 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado em um béquer de 1L, e posterior adição de 6g de grafite em pó (98% de grafite e 1% de cinza) da marca Synth[®], permanecendo em agitação até homogeneização completa. A mistura então foi colocada em *freezer* industrial até atingir 0° C, e submetida a banho de gelo para controle de temperatura. Logo em seguida, adicionou-se 3g de nitrato de sódio ($NaNO_3$) P.A. lentamente, de modo a evitar que a temperatura da solução exceda 20 °C. Posteriormente, adicionou-se 18g de permanganato de potássio ($KMnO_4$) P.A. em pequenas frações, e a solução foi mantida sob agitação por 1h, com o objetivo de estimular a oxidação do grafite (HAACK, 2021).

Em seguida, 250mL de água destilada foram adicionados à solução, onde a mesma permaneceu sob agitação por mais 30 min em temperatura de aproximadamente 95 °C. Após, completou-se o béquer com água destilada até 900 mL e, adicionou-se 30mL de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) 35% (v/v). Na etapa de purificação, a solução foi decantada e o líquido sobrenadante foi separado, adicionando-se 1L de solução de ácido clorídrico (HCl) a 5%(v/v). Aguardou-se nova a decantação, e a fase ácida sobrenadante foi descartada. O processo de adição de água destilada seguido de decantação e descarte da fase sobrenadante ocorreu repetidamente até que houvesse a estabilização do pH 5,5 (GOMES; MATSUSHIMA; BALDAN, 2015). Por fim, teve como resultado uma suspensão de óxido de grafeno, que foi submetida a banho ultrassônico por 1h, de modo a prosseguir com o processo de esfoliação por via mecânica.

2.3 CARACTERIZAÇÃO DO GRAFENO

O microscópio eletrônico de varredura marca Tescan[®] modelo LMU VEGA 3 foi utilizado na amostra do grafeno para avaliar a formação de monocamadas e o grau de esfoliação, as imagens foram comparadas com as da literatura. Análises das transmitância das bandas do OG foram realizadas utilizando espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FT-IR) da marca Perkin-Elmer[®] modelo *Spectrum Two*, sendo utilizadas as faixas de 4000-400 cm^{-1} .

2.4 DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DA SUSPENSÃO DE ÓXIDO DE GRAFENO (OG)

Quatro alíquotas de 10,00 mL da suspensão de óxido de grafeno foram tomadas e dispostas em placas de Petri, previamente pesadas em balança analítica, marca Shimadzu® modelo ATY224 e a secagem foi realizada em estufa a 150°C durante 3 horas. Ao fim, tem-se como resultado a massa de OG correspondente ao volume inicial de 10 mL, possibilitando a realização do cálculo de concentração da suspensão. |A partir das quatro medidas foi obtida a média das concentrações.

2.5 TINTA BASE, TINTA DE ACABAMENTO, FORMULAÇÃO DA TINTA ADITIVADA E PINTURA DAS CHAPAS METÁLICAS

As tintas utilizadas no corpo de prova foram da marca Perfortex®, onde se aplicou duas demãos de base (Perfordur WET- N-2680) e uma demão de tinta de acabamento (Perforthane HB- N-2677) com aspecto brilhoso, sendo o intervalo entre cada demão de 24h.

A formulação das tintas aditivadas foi realizada, adicionando-se a suspensão de OG na tinta de acabamento, levando em conta tanto a massa da tinta, bem como a massa de OG por volume de suspensão.

A chapa foi pintada seguindo a norma Petrobras N-C SC-14 e, aplicou-se no corpo de prova tinta industrial pura e aditivada de óxido de grafeno em proporções de 0.1%, 0.5%, 1% e 2% em massa, tendo como objetivo comparar se há impacto do nanocompósito nos ensaios de termografia ativa. Estes valores foram selecionados com base nos encontrados na literatura para adição de óxido de grafeno como aditivo em outros materiais (MADRONA, 2021).

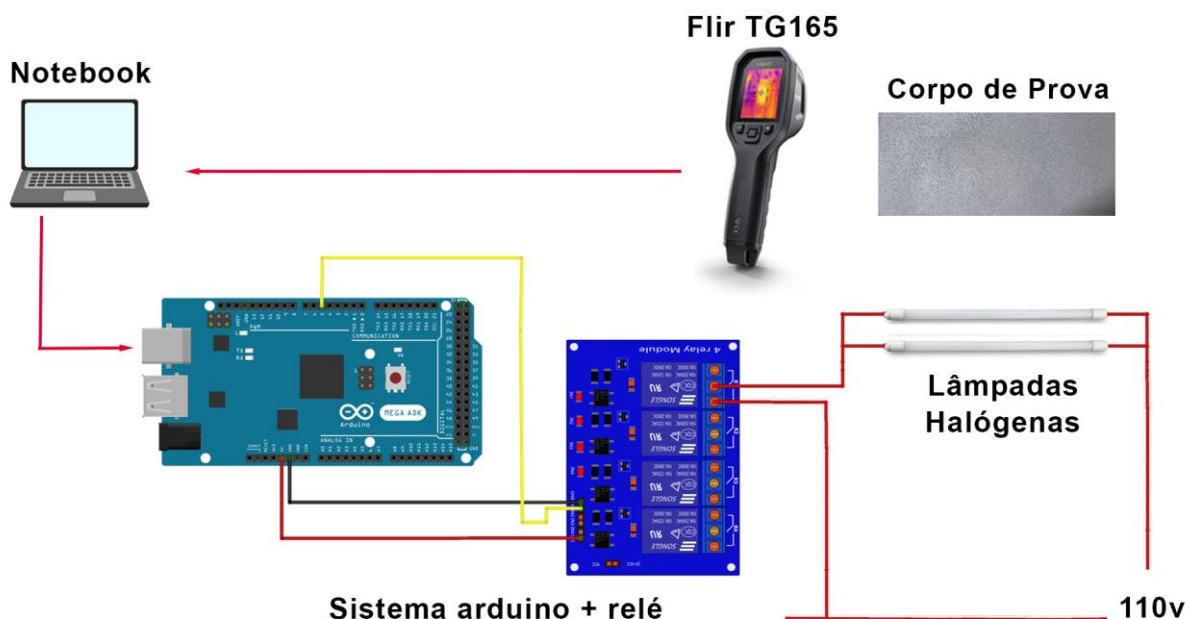
2.6 ENSAIO DE TERMOGRAFIA POR INFRAVERMELHO E PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM

O ensaio de termografia ativa foi realizado com o aquecimento do corpo de prova através de um sistema de lâmpadas halógenas da fabricante OuroLux® conectadas em paralelo, ambas possuem 500W/127V. O fluxo de calor emitido pelas lâmpadas foi direcionado ao corpo de prova que ficou a 0,015m da fonte de aquecimento, sendo o sistema acionado por uma placa contendo relês e um microcontrolador ATMEGA tipo Arduíno®. Períodos diferentes de aquecimento (3s, 6s e 9s) foram avaliados através da câmera termográfica Flir® modelo TG165, com uma resolução de 80 x 60 pixels, estando

a fixação dessa câmera a 0,4m do corpo de prova, a fim de abranger a superfície em sua totalidade, o esquema experimental pode ser visualizado na Figura 3.

Para o dimensionamento das descontinuidades utilizou-se o *software ImageJ*[®]. Foi aplicado o filtro *Smooth* na imagem, conversão de *RGB* para 8 *bits* e utilizou-se a ferramenta *Measure* no bloco *Analyze*, responsável por dimensionar os pontos traçados através de uma conversão de *pixels* em centímetros.

Figura 3. Esquemática do aparato utilizado para ensaio de termografia ativa



3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

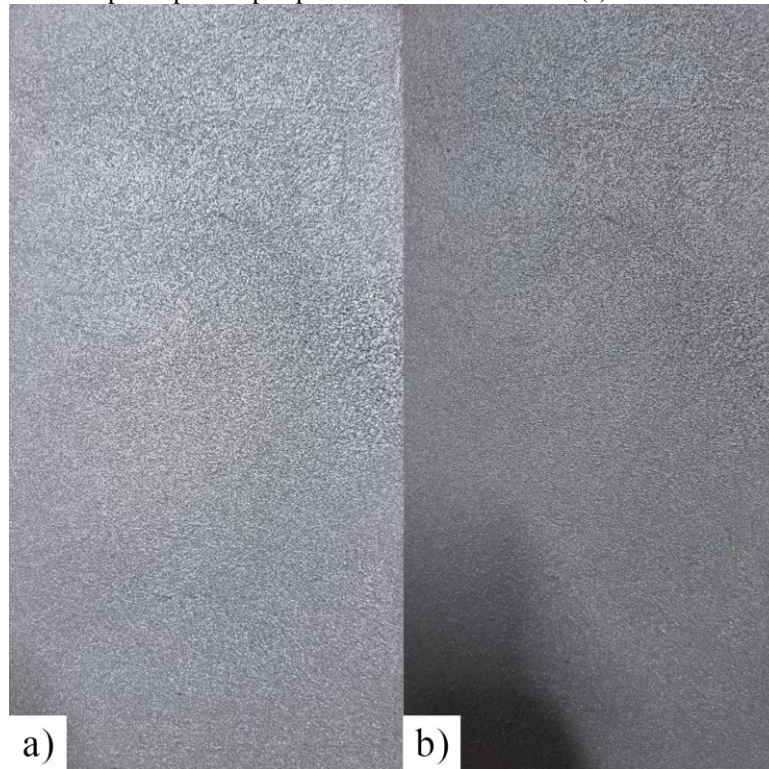
3.1 CORPO DE PROVA E PINTURA DA CHAPA METÁLICA

A Figura 4 mostra a chapa metálica com as descontinuidades preenchidas com óxido de ferro hidratado. Nas Figuras 5(a) e 5(b) respectivamente, pode ser visualizado o corpo de prova com aplicação da tinta base e tinta de acabamento sem o aditivo OG e com o aditivo.

Figura 4. Corpo de prova com descontinuidades com óxido de ferro compactado;



Figura 5. Corpo de prova após pintura com tinta sem OG (a) e tinta aditivada (b)



3.2 SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DO ÓXIDO DE GRAFENO

Após a purificação em pH 5,5, foi obtido um volume de 600 mL da suspensão de OG (Figura 6). Com a tomada das alíquotas dessa suspensão e secagem em estufa, o resultado obtido foram filmes de OG (Figura 7). Esses filmes foram utilizados tanto para caracterização através do MEV, quanto para cálculo da concentração de OG na suspensão. Para a concentração, o resultado obtido foi de $0,0168\text{g/mL} \pm 0,0009$.

Figura 6. OG obtido após a síntese por esfoliação química.

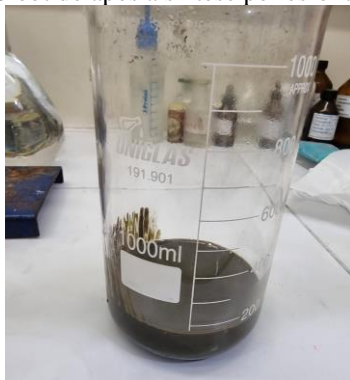
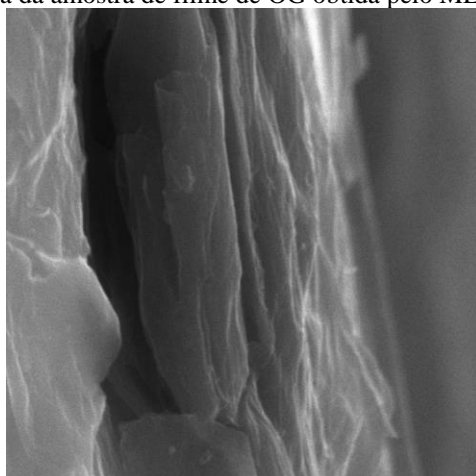


Figura 7. Alíquotas de 10,00mL de óxido de grafeno após secagem em estufa a 150°C por 3h



Na Figura 8, pode-se visualizar a imagem obtida pelo MEV com ampliação de 10.000 vezes. É possível observar as monocamadas de grafite expandidas, distantes umas das outras, sendo um indicativo da obtenção do óxido de grafeno.

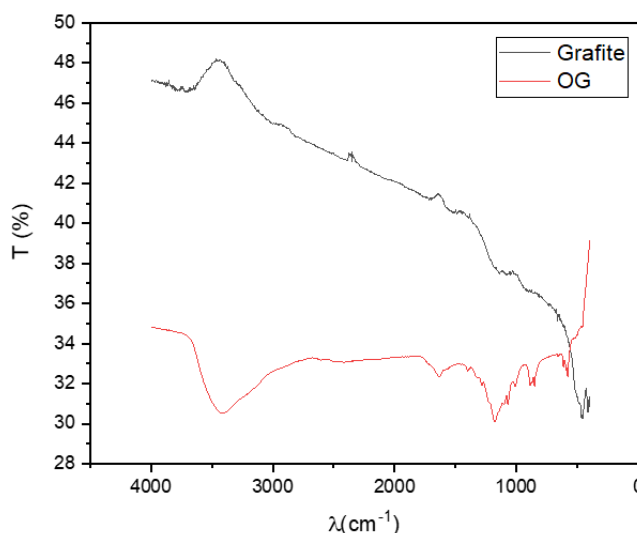
Figura 8. Imagem da espessura da amostra de filme de OG obtida pelo MEV, ampliação de 10.000 vezes.



Na Figura 9, é possível visualizar na linha vermelha os resultados obtidos da espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) para a amostra de OG, e na linha preta os resultados obtidos para o grafite puro, em termos de transmitância versus comprimento de onda. O FTIR visa avaliar as regiões de frequência associadas a grupos funcionais, possibilitando utilizar os espectros obtidos para identificar e caracterizar um determinado composto. Para a amostra de grafite puro, é possível perceber pouca presença de grupamentos oxigenados ao longo da amostra, referente às faixas de 1700 cm^{-1} , $1200\text{-}1300\text{ cm}^{-1}$, 1060 cm^{-1} , além um pico na região entre $3600\text{-}3400\text{ cm}^{-1}$ correspondente a grupamento hidroxila, indicando certo grau de pureza para a amostra de grafite, e evidenciando seu estado antes da oxidação.

Para os resultados da amostra de OG, é possível visualizar bandas menos pronunciadas no gráfico entre $3600\text{-}3400\text{ cm}^{-1}$, correspondendo a grupamentos hidroxílicos OH-, a faixa de 1700 cm^{-1} é relativa a cetonas, $1200\text{-}1300\text{ cm}^{-1}$ a deformação axial assimétrica da ligação C-O, 1060 cm^{-1} para grupos alcóxi. É possível perceber ainda que para a banda de 1620 cm^{-1} (deformação axial da ligação C=C de anel aromático), houve menor relevo, indicando que mesmo após a oxidação do grafite para OG, a sua estrutura principal foi mantida. Resultados similares foram obtidos pelo estudo de Oliveira *et al.* (2019) que caracterizou o óxido de grafeno sintetizado pela rota de Hummers adaptada.

Figura 9. Dados obtidos pelo FTIR para amostras de grafite e OG.



3.3 FORMULAÇÃO DAS TINTAS ADITIVADAS COM OG

A formulação das tintas com concentração de OG em 0.1, 0.5 e 1% foram compatíveis com o esperado das propriedades da tinta de acabamento para a aplicação no corpo de prova. Contudo, para a concentração de 2%, o aspecto da tinta tornou inviável a sua utilização (Figura 9).

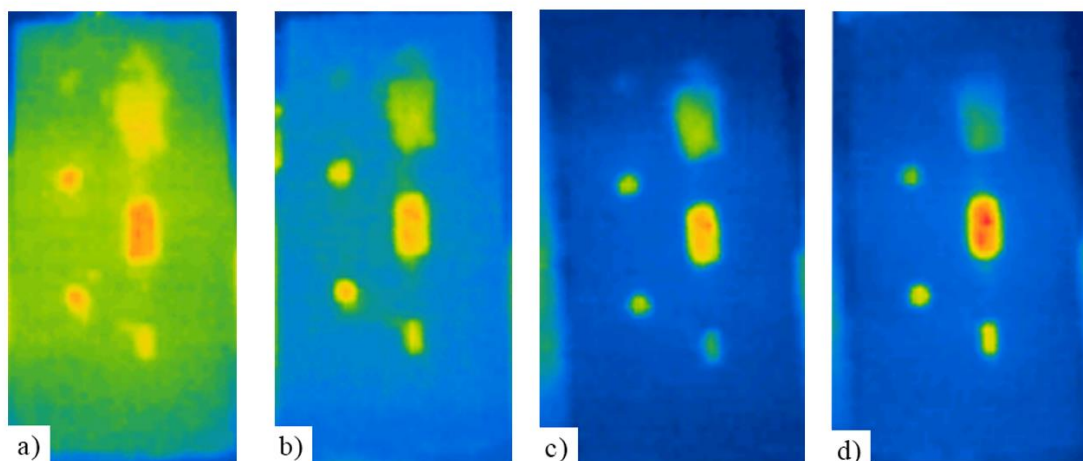
Figura 10. Aspecto granulado da tinta de acabamento após adição de 2% de OG



3.4 ENSAIOS DE TERMOGRAFIA

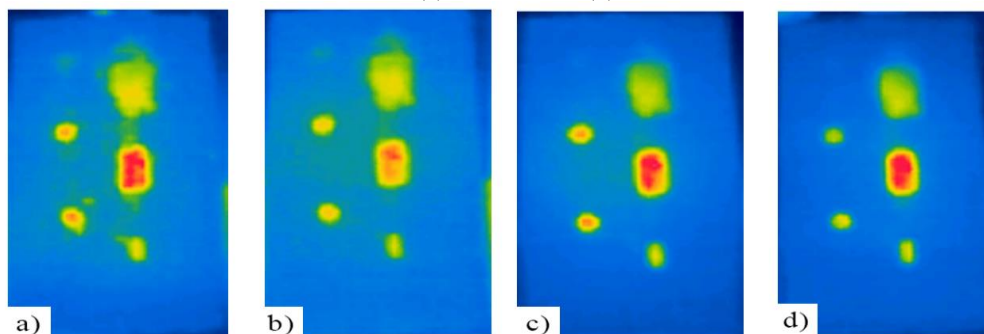
As Figuras 11, 12 e 13 mostram as imagens da placa com os defeitos após diferentes períodos de aquecimento, é notável os gradientes de temperatura, que são atribuídos a descontinuidades provenientes da corrosão, é válido ainda salientar que os pontos que possuem maior quantidade de massa oxidada concentram mais o calor, e que o tempo de aquecimento afeta a detecção dos defeitos. Na Figura 11 (a) pode-se verificar que o calor se propaga por toda a chapa, a região esverdeada possui menor gradiente de temperatura com as descontinuidades o que pode gerar interferência na interpretação dos resultados. Na Figura 11 (b), percebe-se que a adição de 0.1% de OG à tinta de acabamento fez com que o calor se dissipasse de maneira mais efetiva na chapa, gerando imagens com menores interferências comparadas com aquelas da Figura 11 (a). Na Figura 11 (c) a imagem obtida possui um tom azulado forte, indicando que a 0.5% de OG influenciou na difusividade térmica da tinta, gerando imagens com interferências menores quando comparadas às da Figura 11 (a) e 11 (b). Para concentrações de 1%, o resultado foi similar ao obtido em concentrações de 0.5%.

Figura 11. Imagens termográficas do corpo de prova pintado após aquecimento de 3s: (a) Sem OG; (b) OG a 0.1%; (c) OG a 0.5%; (d) OG a 1%.



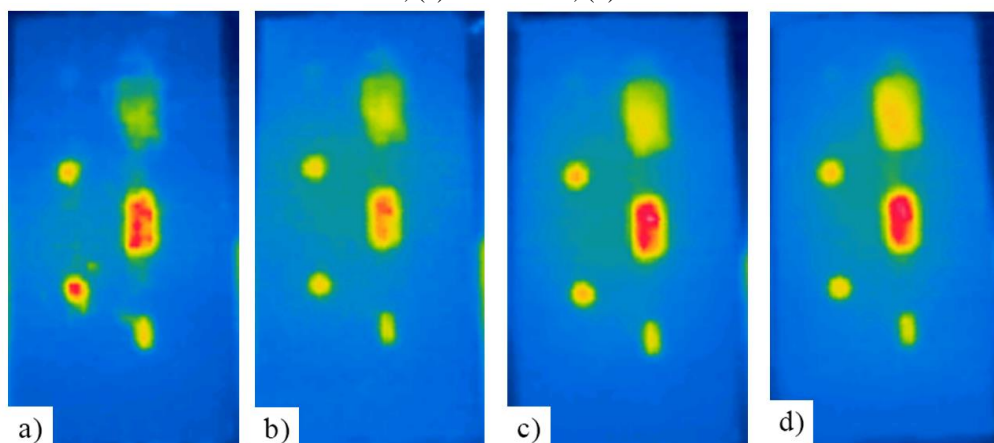
Para os ensaios que o corpo de prova foi submetido a fonte de calor no tempo de 6s (Figura 12a), percebe-se regiões de coloração esverdeada em regiões próximas aos defeitos, tal efeito pode ser explicado pelo acúmulo de calor nas descontinuidades, bem como o efeito da difusividade térmica. Esse fenômeno não influencia na detecção das descontinuidades (localização), porém influenciará o dimensionamento das descontinuidades devido aos formatos irregulares em seu contorno. Na Figura 12 (b), a tinta aditivada com 0.1% de OG tem influência direta na difusividade térmica, logo, os pontos esverdeados são menos perceptíveis, bem como a chapa apresenta uma tonalidade mais azulada nos pontos que não possuem descontinuidade. Na Figura 12 (c) o calor residual se dissipa de maneira ainda mais efetiva na chapa revestida com tinta a 0.5% de OG, fator atestado com a tonalidade azul forte em locais onde as descontinuidades estão presentes, por fim, os pontos concentram mais calor e geram imagens com menor interferência (contorno bem definidos). Para concentrações de aditivação com 1% de OG, podemos realizar uma análise similar a concentração de 0.5% de OG.

Figura 12. Imagens termográficas do corpo de prova pintado após aquecimento de 6s: (a) Sem OG; (b) OG a 0.1%; (c) OG a 0.5%; (d) OG a 1%



Para ensaios de 9s, o calor se concentra mais nos pontos de descontinuidades, porém na Figura 13 (a) ainda é perceptível coloração esverdeada em regiões próximas aos defeitos, fator que pode ser explicado pela difusividade térmica e pelo acúmulo de calor nas descontinuidades. Esse fenômeno não possui influência na localização das descontinuidades, mas irá influenciar no dimensionamento dos mesmos devido às irregularidades em seu formato. Na Figura 13 (b), a presença de OG a 0.1% na tinta tem influência direta na difusividade térmica, logo, os pontos esverdeados estão menos presentes. Na Figura 13 (c) o calor residual se dissipa de modo ainda mais efetivo na chapa revestida com tinta a 0.5% de OG, e a interferência dos pontos é menor quando comparado aos ensaios das Figuras 13 (a) e 13 (b). O resultado obtido para 1% de OG foi similar ao de 0.5% de OG.

Figura 13. Imagens termográficas do corpo de prova pintado após aquecimento de 9s: (a) Sem OG; (b) OG a 0.1%; (c) OG a 0.5%; (d) OG a 1%



Os pontos de descontinuidade concentram calor e emitem radiação na região do infravermelho, radiação que é captada pela câmera termográfica, e convertida nas imagens com diferentes espectros. A lei de Wien explica o porquê de não ser possível a visualização de alguns pontos, como o furo de profundidade 0.5mm da chapa metálica, o ponto é pouco observável nas imagens capturadas por não possuir massa o suficiente para concentrar calor e emitir comprimento de onda na região do infravermelho, não aparecendo de forma expressiva na câmera termográfica. É possível notar também que a utilização da tinta aditivada de óxido de grafeno promove melhor dispersão do calor pela chapa, auxiliando na localização dos pontos, e sendo notável seu efeito partindo de concentrações baixas de OG (0.1%).

Observa-se, no entanto, que a concentração que apresentou melhor resultado foi a de 0.5%, devido ao melhor custo-benefício, e por não afetar a aplicabilidade da tinta tal qual ocorre em concentrações de 2%. Para tempos de 3s, a irradiação de calor não foi o suficiente para dimensionar com precisão as descontinuidades, e acima de 6s o gasto energético acaba não compensando, visto que para os ensaios de 9s os resultados não demonstraram diferença relevante em comparação aos obtidos em 6s. Portanto, é possível inferir que o tempo ideal de exposição do corpo de prova a fonte de calor é de 6 segundos para o presente estudo.

3.5 DIMENSIONAMENTO DAS DESCONTINUIDADES

Com base nas dimensões do corpo de prova e das descontinuidades foi possível o processamento das imagens termográficas no intuito de determinar o erro no dimensionamento dos defeitos que simularam o processo corrosivo sob a película de tinta. Os erros relativos às dimensões reais são expressos nas Tabelas 1 a 4.

Tabela 1 - Erro no dimensionamento das descontinuidades do corpo de prova sem aditivo OG.

t_{aq} (s)	L_R (cm)	L_E (cm)	ϵ_L (%)	C_R (cm)	C_E (cm)	ϵ_C (%)	P (mm)	ϕ_R (cm)	ϕ_E (cm)	$\epsilon\phi$ (%)
3,00	1,00	1,19	19,20	2,00	2,35	17,55	0,50	1,50	1,026	31,60
3,00	2,00	2,55	27,50	4,00	4,40	10,10	0,80	1,50	1,72	14,80
3,00	3,00	2,78	7,27	5,00	5,66	13,24	1,00	1,50	1,52	1,53
6,00	1,00	0,78	21,80	2,00	1,95	2,30	0,50	1,50	0,62	58,73
6,00	2,00	2,22	10,85	4,00	4,85	21,35	0,80	1,50	1,40	6,60
6,00	3,00	2,77	7,70	5,00	5,41	8,14	1,00	1,50	1,43	4,47
9,00	1,00	0,97	2,60	2,00	2,05	2,25	0,50	1,50	1,11	25,87
9,00	2,00	2,50	25,00	4,00	4,45	11,20	0,80	1,50	1,66	10,40
9,00	3,00	2,53	15,60	5,00	4,90	1,94	1,00	1,50	1,75	16,93

Tabela 2 - Erro no dimensionamento das descontinuidades do corpo de prova com aditivo OG a 0,1%.

t_{aq} (s)	L_R (cm)	L_E (cm)	ϵ_L (%)	C_R (cm)	C_E (cm)	ϵ_C (%)	P (mm)	ϕ_R (cm)	ϕ_E (cm)	$\epsilon\phi$ (%)
3,00	1,00	0,96	4,20	2,00	1,95	2,65	0,50	1,50	1,15	2,65

3,00	2,00	2,11	5,30	4,00	4,34	8,50	0,80	1,50	1,44	8,50
3,00	3,00	2,46	18,10	5,00	4,53	9,36	1,00	1,50	1,47	9,36
6,00	1,00	0,95	4,60	2,00	1,95	2,55	0,50	1,50	0,86	2,55
6,00	2,00	2,10	5,20	4,00	4,15	3,82	0,80	1,50	1,41	3,82
6,00	3,00	2,65	11,63	5,00	4,98	0,34	1,00	1,50	1,44	0,34
9,00	1,00	1,04	3,90	2,00	2,17	8,55	0,50	1,50	ND	8,55
9,00	2,00	2,21	10,40	4,00	4,19	4,75	0,80	1,50	1,54	4,75
9,00	3,00	2,69	10,43	5,00	4,67	6,60	1,00	1,50	1,47	6,60

Tabela 3 - Erro no dimensionamento das descontinuidades do corpo de prova com aditivo OG a 0,5%.

t_{aq} (s)	L_R (cm)	L_E (cm)	ϵ_L (%)	C_R (cm)	C_E (cm)	ϵ_C (%)	P (mm)	ϕ_R (cm)	ϕ_E (cm)	$\epsilon\phi$ (%)
3,00	1,00	0,97	2,80	2,00	2,34	16,90	0,50	1,50	1,33	11,47
3,00	2,00	2,04	2,00	4,00	3,82	4,45	0,80	1,50	1,46	2,87
3,00	3,00	2,67	11,17	5,00	4,56	8,72	1,00	1,50	1,68	12,27
6,00	1,00	0,92	7,60	2,00	1,91	4,30	0,50	1,50	ND	ND
6,00	2,00	2,05	2,30	4,00	4,09	2,28	0,80	1,50	1,53	2,07
6,00	3,00	2,67	10,93	5,00	4,75	4,98	1,00	1,50	1,48	1,20
9,00	1,00	0,89	11,40	2,00	2,13	6,65	0,50	1,50	ND	ND
9,00	2,00	2,13	6,50	4,00	4,36	9,10	0,80	1,50	1,54	2,80
9,00	3,00	2,59	13,60	5,00	4,73	5,50	1,00	1,50	1,51	0,67

Tabela 4 - Erro no dimensionamento das descontinuidades do corpo de prova com aditivo OG a 1,0%.

t_{aq} (s)	L_R (cm)	L_E (cm)	ϵ_L (%)	C_R (cm)	C_E (cm)	ϵ_C (%)	P (mm)	ϕ_R (cm)	ϕ_E (cm)	$\epsilon\phi$ (%)
3,00	1,00	0,95	5,30	2,00	1,95	2,75	0,50	1,50	ND	ND
3,00	2,00	2,04	2,10	4,00	3,99	0,20	0,80	1,50	1,59	5,87
3,00	3,00	2,92	2,77	5,00	4,93	1,40	1,00	1,50	1,43	4,87
6,00	1,00	0,98	1,90	2,00	2,12	6,00	0,50	1,50	ND	ND
6,00	2,00	2,15	7,55	4,00	4,11	2,63	0,80	1,50	1,52	1,20
6,00	3,00	2,87	4,50	5,00	4,67	6,70	1,00	1,50	1,51	0,47

9,00	1,00	0,98	2,00	2,00	1,90	5,20	0,50	1,50	ND	ND
9,00	2,00	2,19	9,35	4,00	4,51	12,70	0,80	1,50	1,60	6,73
9,00	3,00	2,91	3,07	5,00	4,94	1,24	1,00	1,50	1,49	1,00

Ao observar as Tabelas 1 a 4, verifica-se que os valores obtidos na estimativa das dimensões das descontinuidades apresentam erros maiores quando o corpo de prova foi pintado com a tinta sem aditivo de OG, pois a concentração de calor na chapa gera imagens termográficas com formato não regulares, prejudicando a estimativa das dimensões dos defeitos. À medida que se aumenta o teor de óxido de grafeno presente na tinta, a difusividade de calor aumenta e, conseqüentemente, consegue-se obter imagens com contornos definidos, possibilitando uma medida com menor erro associado.

De modo geral, verifica-se que na maioria das medições realizadas com a inserção do óxido de grafeno à tinta, os resultados da estimativa das descontinuidades por termografia ativa foram inferiores a 10%, o que reforça a indicação que a aditivação da tinta industrial com OG possibilita uma melhor dissipação do calor no corpo de prova, obtendo-se imagens mais definidas, potencializando o nível de detecção.

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado o ensaio de termografia ativa para a detecção de regiões afetadas por corrosão em chapas de aço carbono *SAE 1020*, revestido com tinta industrial *Perfortex®* sem adição de óxido de grafeno (OG) e aditivada de OG nas proporções de 0.1, 0.5, 1% e 2%. Ao analisar o efeito da termografia ativa na detecção das descontinuidades, verificou-se que o equipamento conseguiu detectar tais defeitos presentes tanto sob uma camada de tinta sem a adição de OG quanto para aquelas aditivadas nas proporções supramencionadas. No primeiro caso, as imagens termográficas se apresentaram com formatos irregulares devido a má difusão do calor no corpo de prova, impactando diretamente no dimensionamento das descontinuidades, apresentando erros associados maiores quando comparados a medições com a tinta aditivada com OG.

Ao aditar a tinta com OG, verificou-se uma melhor dissipação de calor formando imagens com contornos bem definidos, possibilitando assim uma melhor detecção e estimativa das dimensões das descontinuidades com erros menores (na sua maioria inferiores a 10%). Considerando uma melhor definição das imagens e que tal fato

impacta diretamente no dimensionamento dos defeitos, pode-se constatar que o tempo de exposição do corpo de prova à fonte de calor na termografia ativa deve ser de 6 s nas condições avaliadas no presente trabalho.

Adicionalmente, foi possível constatar que os ensaios são mais efetivos em regiões onde há maior quantidade de massa de óxido de ferro, ou seja, maior efeito corrosivo, pois é necessário uma quantidade significativa de oxidação para acumular calor e emitir radiação na região do infravermelho, sendo então capturada pela câmera termográfica e possibilitando gerar imagens com maior nitidez e contornos definidos. Nessa perspectiva, com base nos resultados obtidos, conclui-se que as melhores condições para o ensaio de termografia ativa avaliados neste trabalho foram o tempo de exposição à fonte de calor por 6 s e a aditivação da tinta industrial de acabamento com 0,5% de OG.

REFERÊNCIAS

CAMARGOS, J. S. F.; SEMMER, A. O.; DA SILVA, S. N. Características e aplicações do grafeno e do óxido de grafeno e as principais rotas para síntese, **The Journal of Engineering and Exact Sciences**. v. 3, n. 8, p. 1118–1130, 2017. <https://doi.org/10.18540/jcecvl3iss8pp1118-1130>.

COSTA, N. S.; AZEVEDO, P. G. F.; OLIVEIRA, D. C. S.; MACEDO, L. T.; CAVALCANTI, L. A. P.; SILVA, I. C.; FARIAS, C. T. T. Detecção e dimensionamento de corrosão em aço carbono revestido utilizando termografia ativa. **Brazilian Journal of Development**. v. 6, n. 10, p. 74595 - 74612, 2020. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n10-038>.

FORCELINI, F; MERINO, E. A. D.; VARNIER, T. **Termografia Infravermelha e Captura de Movimentos: vantagens e desvantagens no desenvolvimento de projetos**. Anais do XIII Congresso Pesquisa e Desenvolvimento em Design, Joinville, 2018.

GOMES, M. L. M.; MATSUSHIMA, J. T.; BALDAN, M. R. Síntese e caracterização de óxido de grafeno e/ou grafeno pelo método de oxidação química da grafite visando suas aplicações como materiais nanoestruturados em capacitores eletroquímicos. **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**. Relatório final de iniciação científica, 2016.

HAACK, M. S. **Caracterização de grafeno obtido por diferentes métodos utilizando espectroscopia Raman**. 2017, 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

MAZUMDER, M. A. J. Global Impact of Corrosion: Occurrence, Cost and Mitigation. **Global Journal of Engineering Sciences - GJES**, v. 5, n. 4, p. 1-5, 2020. <http://dx.doi.org/10.33552/GJES.2020.05.000618>

MELO I. C. C. **Estratégias para elaboração de projetos de estruturas metálicas na ótica da manutenibilidade**, Dissertação (Mestrado em Projeto Integrado na Construção de Edifícios) - Universidade do Porto, Porto, 1-112 (Out) 2021.

MOTA, R. O.; CAMPOS, J. B. **Grafeno e suas aplicações na soldagem**. Anais do VII Congresso Técnico-Científico da Engenharia e da Agronomia, 2021.

OLIVEIRA, A. E. F.; PEREIRA, A. C.; BETTIO, G. B.; TARLEY, C. R. T. Síntese, Estudo e Caracterização Estrutural da Redução Térmica e com Hidrazina do Óxido de Grafeno por Espectroscopia Raman e Espectroscopia de Infravermelho. **Revista Virtual de Química**. v. 3, n. 11, p. 866 - 877, 2019. <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20190060>.