

## **AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS NA DETECÇÃO DE INCRUSTAÇÕES EM TUBULAÇÕES DE AÇO-CARBONO**

JESUS, A. S. de<sup>1</sup>; DINIZ, B.L. <sup>2</sup>; SANTIAGO, T. de O.<sup>3</sup>; SANTOS, Y.B. dos<sup>4</sup>; RÊGO, D.F. <sup>5</sup>; FARIAS, C. T. T. <sup>6</sup>; SILVA, I.C. da<sup>7</sup>; CAVALCANTI, L.A.P. <sup>8</sup>

1. Graduanda, Engenharia Química – GPEND/LABIND/IFBA – Rua Emídio dos Santos s/n – aliciasantanaj@gmail.com
2. Mestrando, Engenharia de Materiais – GPEND/LABIND/PPGEM/IFBA – Rua Emídio dos Santos s/n – brennolavigne@ifba.edu.br
3. Graduanda, Engenharia Química - LABIND/IFBA – Rua Emídio dos Santos s/n – tici.santiago16@gmail.com
4. Msc, Engenharia de Materiais – SENAI CIMATEC/GPEND/PPGEM/IFBA – Rua Emídio dos Santos s/n – tadeuygor@gmail.com
5. Dsc, Engenharia Elétrica – GPEND/LABIND/IFBA – Rua Emídio dos Santos s/n – davifr@ifba.edu.br
6. DSc, Engenharia Metalúrgica e de Materiais – GPEND/LABIND/PPGEM/IFBA – Rua Emídio dos Santos s/n – ctffarias@gmail.com
7. DSc, Engenharia Metalúrgica e de Materiais – Rua Emídio dos Santos s/n – GPEND/LABIND/PPGEM/IFBA – ivan.silva@ifba.edu.br
8. DSc, Engenharia Química – GPEND/LABIND/PPGEM/IFBA – Rua Emídio dos Santos s/n – luiz.cavalcanti@ifba.edu.br

## RESUMO

A formação de incrustação ocorre pelo acúmulo progressivo de espécies insolúveis presentes em um fluido transportado através de tubulações. Este é um problema comum em indústrias que lidam com transporte de fluido, causando diversos prejuízos à eficiência do processo. Este trabalho teve por objetivo avaliar a viabilidade de utilização de técnicas não destrutivas, como ultrassom e termografia passiva, na detecção e dimensionamento de incrustações em tubulações de aço-carbono. Para isso, utilizou-se gesso para simular incrustações na parede interna do tubo e montou-se um protótipo para simular condições reais de operação mantendo setpoint de temperatura de 70°C, 76°C e 82°C. Assim, foi possível detectar as incrustações por meio da termografia, servindo para tomada de decisões sobre a necessidade de intervenções de manutenção e identificação precoce dos pontos de incrustação. Entretanto, a técnica de ultrassom mostrou-se inviável devido à ausência de equipamento adequado para um material altamente atenuante, como o gesso.

**Palavras-chave:** Incrustações, Termografia, Manutenção Preventiva, Ensaios não Destrutivos.

## 1. Introdução e Justificativa

Fenômenos de incrustação podem ser encontrados em vários sistemas de produção de petróleo e gás, incluindo oleodutos *onshore* e *offshore*, equipamentos complexos como válvulas de segurança, e outros tipos de equipamentos de produção submarinos<sup>(1)</sup>. A incrustação ocorre frequentemente em trocadores de calor e representa um problema significativo no processamento de refinarias devido ao seu impacto tanto na economia quanto no meio ambiente<sup>(2)</sup>. A incrustação é um processo complexo influenciado por diversos fatores, como a natureza físico-química do fluido de processo, as condições operacionais e o *design* da tubulação<sup>(3)</sup>. Prever as taxas de incrustação com precisão a partir de dados de refinaria é desafiador devido à natureza intrincada dos mecanismos de incrustação. Esses desafios ressaltam a necessidade de desenvolver métodos mais eficazes de detecção e prevenção, como o uso de técnicas termográficas, para mitigar os efeitos adversos associados à incrustação em tubulações de aço carbono.

O processo de formação de uma incrustação é caracterizado pelo acúmulo progressivo de substâncias insolúveis presentes em um fluido transportado através de tubulações metálicas em unidades industriais. Frequentemente, os estudos acerca do tema correlacionam o processo de incrustação com o tipo de equipamento e o fluido em questão<sup>(1)</sup>. As indústrias alimentícia, petroquímica e farmacêutica são fortemente afetadas por problemas de deposição de sólidos, o que gera consequências indesejáveis como a diminuição do diâmetro interno do tubo, aumento de perda de carga para o processo, entupimento, além de resistência térmica à transferência de calor<sup>(3)</sup>.

Em função deste desafio, estas indústrias contabilizam grandes perdas econômicas que afetam os custos de produção no que tange à operação e manutenção dos equipamentos e tubos sujeitos aos fenômenos de incrustação<sup>(1)</sup>. Em 2021, foi estimado que a formação de incrustações em trocadores de calor nas indústrias brasileiras resultou em um impacto econômico de aproximadamente R\$15 bilhões por ano. Além disso, observou-se um aumento no custo energético de 5 a 10% para cada 1 mm de incrustação formada<sup>(4)</sup>.

Devido à perda de eficiência operacional e custos associados à formação de incrustações em tubulações industriais, deve ser implementada a prática de identificar prematuramente e com precisão os princípios de incrustações que possam vir a crescer

e provocar maiores prejuízos operacionais aos processos, de forma a removê-los em manutenções preventivas, mitigando as perdas econômicas a elas associadas. Dessa forma, torna-se indispensável a adoção de um plano eficiente de manutenção preventiva que não interrompa a operação da planta, sendo necessário, assim, entender as causas e como o processo de incrustação ocorre no equipamento, o que indica a necessidade de mapear quais são as variáveis mais importantes que sinalizam a formação de incrustações.

As incrustações são responsáveis por diminuir a eficiência da troca térmica entre a superfície interna e externa da tubulação, devido às suas características isolantes<sup>(5)</sup>, causando pontos com gradiente de temperatura na extensão do equipamento. Nesse contexto, a técnica de termografia surge como uma opção viável para avaliar a superfície do material a partir de um perfil de temperatura, o qual torna possível identificar gradientes significativos associados à presença de incrustações. O mapeamento do gradiente térmico da superfície possibilita a detecção de pontos de incrustação e se caracteriza como uma alternativa não destrutiva para a inspeção de tubulações industriais, podendo ser realizada sem que haja interrupções não planejadas do processo.

A incrustação por precipitação ocorre em superfícies aquecidas, quando as condições do processo favorecem a supersaturação dos sais inorgânicos dissolvidos no fluido; nesses casos, a força motriz para a cristalização é a diferença de potencial químico entre as substâncias no fluido (solução) e o depósito formado na superfície metálica<sup>(6)</sup>. Influenciam na cinética de incrustação diversos fatores operacionais e características físico-químicas do meio, como a supersaturação, o pH, o número de Reynolds e a concentração de íons. Dentre os sistemas industriais que apresentam incrustação por precipitação, pode-se citar: plantas de dessalinização de salmoura, sistemas de salmoura geotérmica, sistemas de água de resfriamento, sistemas de geração de vapor e sistemas de abastecimento de água potável<sup>(7)</sup>.

As principais substâncias que estão presentes nas incrustações são sulfatos de bário ( $\text{BaSO}_4$ ), estrôncio ( $\text{SrSO}_4$ ) e cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ), além do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Propriedades como temperatura, pressão, pH e concentração de sólidos em suspensão presentes no fluido variam com o tempo e influenciam o processo de deposição de sais inorgânicos em superfícies metálicas<sup>(8)</sup>. O gesso, material composto por sulfato de

cálcio hemidratado, com fórmula química  $CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$ , apresenta composição semelhante à das incrustações tipicamente encontradas em tubulações industriais. O sulfato de cálcio hemidratado é obtido a partir da calcinação — processo térmico de desidratação — do sulfato de cálcio dihidratado,  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ , em uma faixa de temperatura de 140°C a 160°C<sup>(9)</sup>.

Todas as formas comuns do sulfato de cálcio — dihidratado, hemidratado e anidro — possuem baixa solubilidade em água<sup>(10)</sup>. Notavelmente, o sulfato de cálcio é um sal cuja solubilidade diminui com o aumento da temperatura — o que não se verifica na maioria dos sais — sendo, portanto, classificado como um sal de solubilidade inversa; assim, se há um gradiente axial crescente de temperatura no escoamento de um fluido de processo através de uma tubulação, a espessura da camada incrustada de  $CaSO_4$  aumenta como função da posição, sendo maior em posições a jusante do fluxo<sup>(11)</sup>. A incidência de formação de incrustações de sulfato de cálcio em tubos de trocadores de calor é devida, exatamente, à diminuição da solubilidade desse sal com o aumento de temperatura.

Diante do desafio representado pela formação de incrustações em tubulações de fluidos de processo nos mais variados segmentos industriais, o presente trabalho teve como proposta avaliar a viabilidade de utilização de técnicas não destrutivas, como termografia, na detecção de incrustações em tubulações de aço-carbono. Para tanto, foi simulada uma incrustação na parede interna do tubo utilizando gesso, cuja composição química é semelhante à das incrustações por sulfato de cálcio típicas em ambientes industriais, com variação nas espessuras de aproximadamente 1, 2 e 3 cm. Antes da circulação do fluido aquecido, foram estabelecidos *setpoints* de temperatura de 70°C, 76°C e 82°C.

## **2. Materiais e Métodos**

Inicialmente, foi realizada a montagem do esquema experimental que consiste em um tubo de aço-carbono acoplado a um circuito, por meio de uma mangueira isolada termicamente, com uma bomba e um tanque (barrilete) contendo água aquecida com auxílio de um resistor ligado a um controlador *on/off* de temperatura mantendo *setpoints* de 70°C, 76°C e 82°C, conforme Figura 1. Com esse sistema, é possível promover a circulação de um fluxo de água aquecida, de forma a proporcionar uma

troca térmica entre a parede interna e externa da tubulação, simulando o que ocorre em tubulações e equipamentos como trocadores de calor.

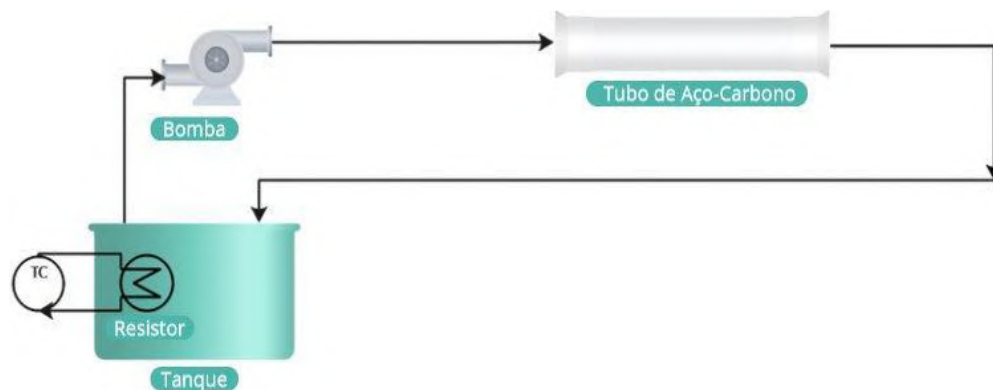


Figura 1: Montagem do esquema experimental. Fonte: Autoria própria.

Foram realizadas duas simulações de incrustações, diferenciadas pelas suas espessuras, que são, aproximadamente, 1, 2 e 3 cm (Figura 2). O gesso foi preparado a partir da mistura de massa de gesso comercial e água. Em um recipiente, foram adicionados 200 g em massa de gesso e aproximadamente 50 mL de água, com homogeneização mecânica contínua, até que a mistura atingisse uma consistência pastosa. Em seguida, a mistura foi despejada em um molde, em formato de rosca, impresso em uma impressora 3D, para adquirir a forma desejada. Após deixar a massa em repouso até completa secagem, a mesma foi aplicada na superfície interna do tubo, manualmente, com uma pequena quantidade de massa de gesso, ainda úmida, depositada em seu entorno, para auxílio na aderência.

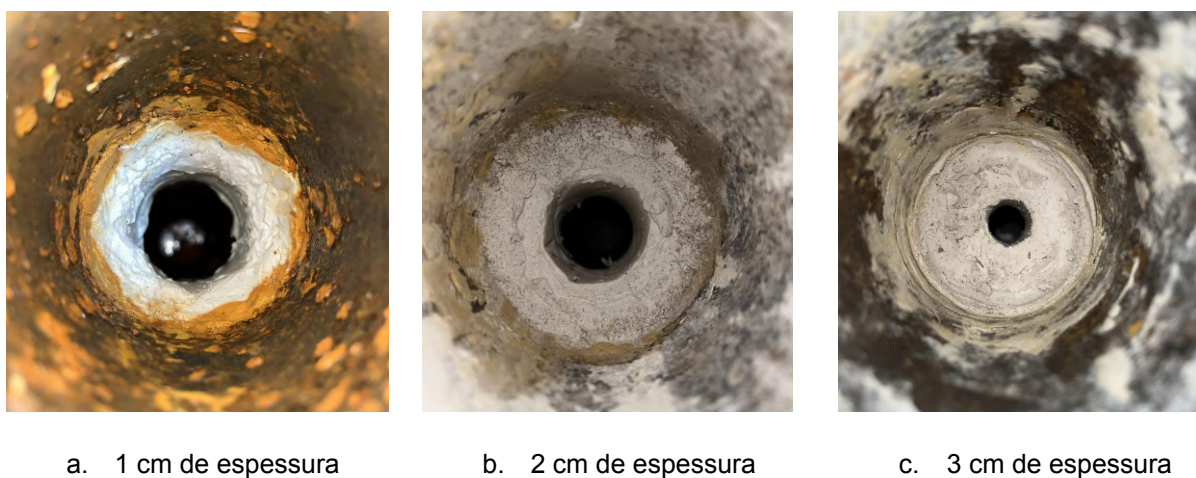


Figura 2: Simulação de Incrustação. Fonte: Autoria Própria.

Para a inspeção termográfica, foi utilizado o termovisor da marca Fluke® modelo Ti32. As imagens termográficas foram obtidas de forma estratégica, com a localização da incrustação previamente sinalizada com um marcador permanente na superfície do tubo, ao longo do processo de escoamento do fluido aquecido pelo tubo. Tal artifício possibilitou uma maior eficiência na captura dos termogramas para análise do gradiente térmico utilizando o *software SmartView*®.

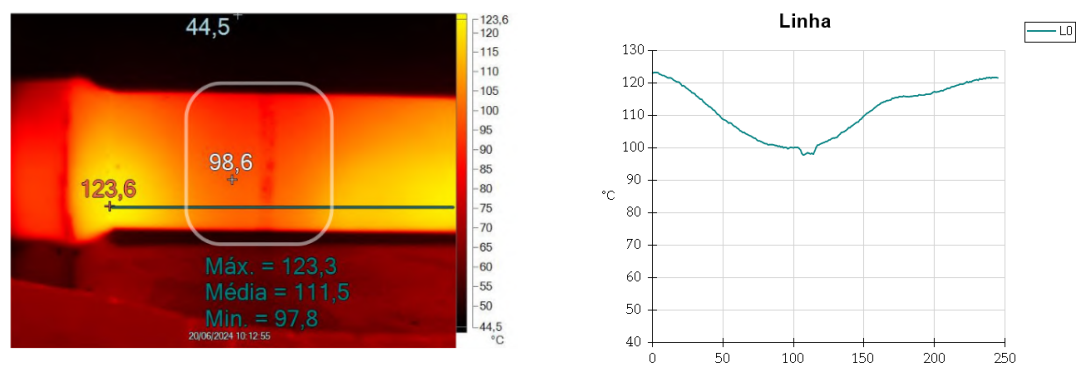
### 3. Resultados e Discussão

A partir do ensaio termográfico, foram obtidos termogramas para análise da distribuição de temperaturas na superfície do tubo. As imagens termográficas da simulação da incrustação com 1, 2 e 3 cm de espessura e seus respectivos gráficos de distribuição de temperatura para o *setpoint* de 70°C são exibidas na Figura 2. A Figura 3 exibe os termogramas e seus gráficos para o *setpoint* mantido a 76°C; e a Figura 4 apresenta os termogramas e seus respectivos gráficos mantendo *setpoint* de 82°C. A paleta utilizada, intitulada Metal Aquecido, retrata o gradiente de temperatura nas cores preta, para a regiões mais frias, laranja, para regiões com temperaturas intermediárias e amarela, para regiões mais quentes. As zonas mais frias detectadas no tubo demonstram o efeito de resistência térmica, advinda da presença do gesso, que dificulta a passagem de calor através das paredes do tubo. Utilizando o *software SmartView*®, foi possível gerar gráficos que possibilitam uma melhor análise do gradiente térmico presente nas imagens termográficas. Tais gráficos exibem as temperaturas dos *pixels*, em graus Celsius, no eixo das ordenadas, em cada ponto do marcador-linha desenhado, no eixo das abscissas. Todos os termogramas foram obtidos após 5 minutos da partida do sistema, já que para fins de avaliação do gradiente térmico na termografia passiva, não pode haver a condição de regime estacionário, em que há uniformidade da temperatura.

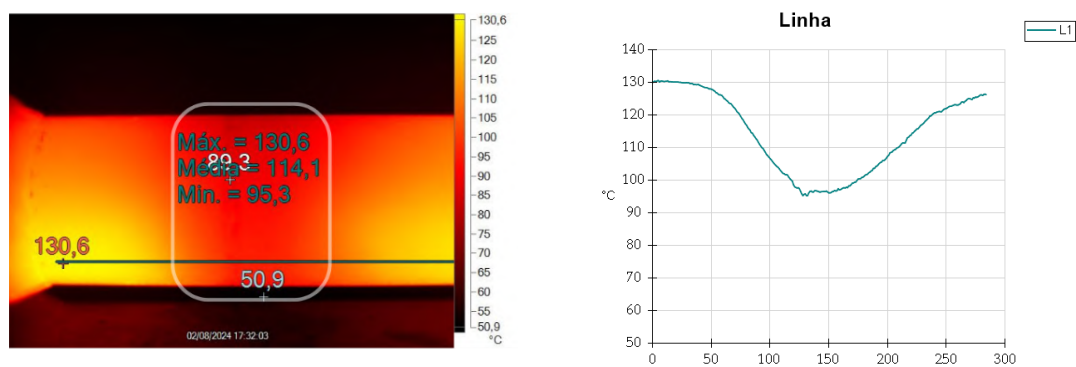
No conjunto da Figura 2, para um *setpoint* de 70°C, é possível observar uma área mais fria nos termogramas, na cor laranja, demarcada na imagem por um contorno branco, que corresponde à localização do gesso. Analisando o gradiente de temperatura ao longo do marcador-linha, pode-se obter, na Figura 2a, uma temperatura máxima na região de 123,3°C e mínima de 97,8°C, havendo uma diferença de 25,5°C. Na Figura 2c, tem-se uma  $T_{m\acute{a}x} = 130,6^{\circ}\text{C}$  e uma  $T_{m\acute{i}n} = 95,3^{\circ}\text{C}$ , obtendo-se um delta de

temperatura de 35,3°C. Já na Figura 2e, observamos uma  $T_{m\acute{a}x}=140,1^{\circ}\text{C}$  e uma  $T_{m\acute{i}n}=98,8^{\circ}\text{C}$ , resultando em um  $\Delta T=41,3^{\circ}\text{C}$ . Nos gráficos 2b, 2d e 2f, pode-se observar a região de declínio de temperatura, dos respectivos termogramas, característico da resistência térmica  transferência de calor.

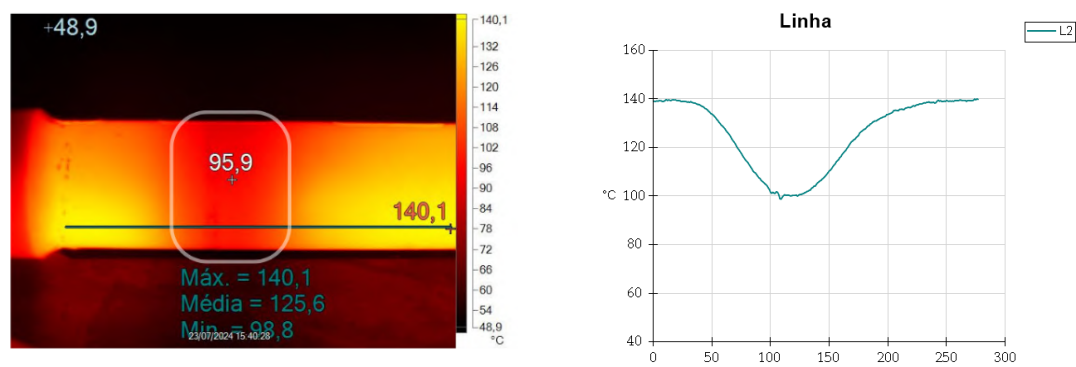
Figura 2: Mantendo Setpoint de 70°C



- a. Simulação com 1 cm de espessura.
- b. Gráfico de distribuição de temperatura.



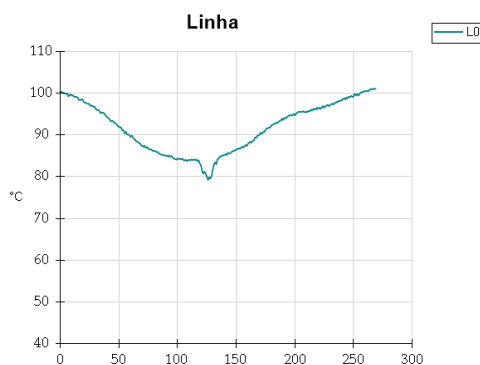
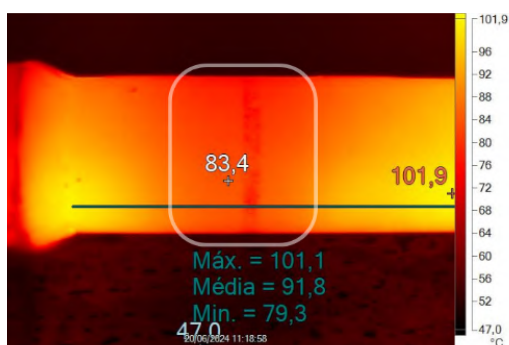
- c. Simulação com 2 cm de espessura.
- d. Gráfico de distribuição de temperatura.



- e. Simulação com 3 cm de espessura. f. Gráfico de distribuição de temperatura.

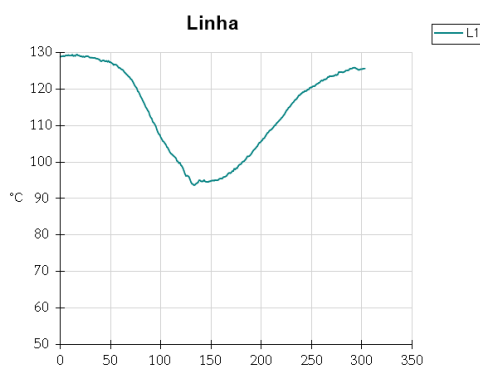
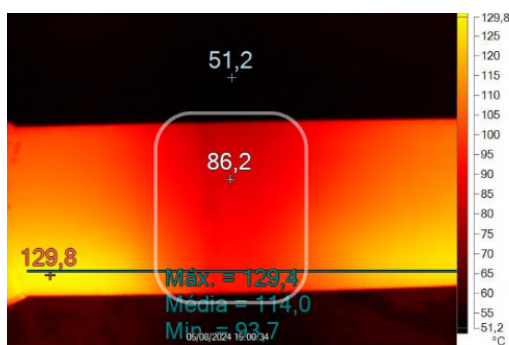
Já no conjunto da Figura 3, ainda pode-se notar a região do tubo que apresenta resistência térmica à passagem de calor, evidenciada pela região mais alaranjada do termograma, retratando uma região mais fria do que as amareladas, e sinalizando a presença do gesso. Na Figura 3a, temos uma  $T_{m\acute{a}x} = 101,1^{\circ}\text{C}$  e uma  $T_{m\acute{i}n} = 79,3^{\circ}\text{C}$ , obtendo-se um delta de temperatura de  $21,8^{\circ}\text{C}$ ; na Figura 3c,  $T_{m\acute{a}x} = 129,4^{\circ}\text{C}$ , uma  $T_{m\acute{i}n} = 93,7^{\circ}\text{C}$  e um  $\Delta T = 35,7^{\circ}\text{C}$ . Já na Figura 3e, tem-se uma  $T_{m\acute{a}x} = 139,7^{\circ}\text{C}$ , uma  $T_{m\acute{i}n} = 98,5^{\circ}\text{C}$  e um  $\Delta T = 41,2^{\circ}\text{C}$ . O decaimento de temperatura, devido à presença do material com características isolantes, pode ser verificado nas Figura 3b, 3d e 3f, onde se pode observar o comportamento da temperatura dos pixels ao longo do marcador-linha desenhado no tubo com o auxílio do *software*. O pico de temperatura na Figura 3b é justificado pela combinação da presença do gesso e de um cordão de solda, que apresenta propriedades diferentes da do restante do tubo.

Figura 3: Mantendo *Setpoint* de  $76^{\circ}\text{C}$

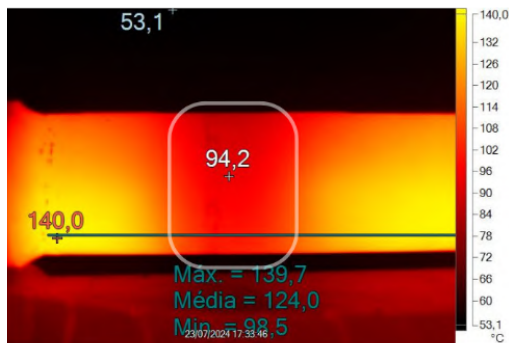


- a. Simulação com 1 cm de espessura.

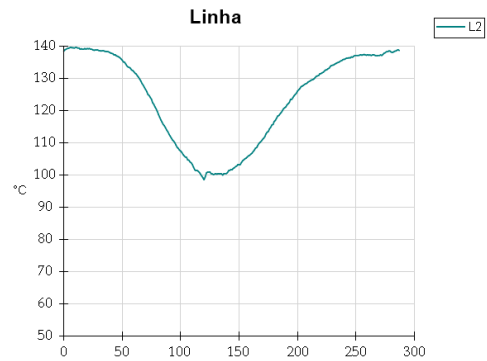
- b. Gráfico de distribuição de temperatura.



c. Simulação com 2 cm de espessura.



d. Gráfico de distribuição de temperatura.

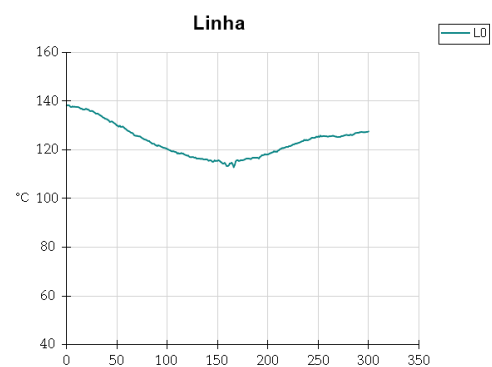
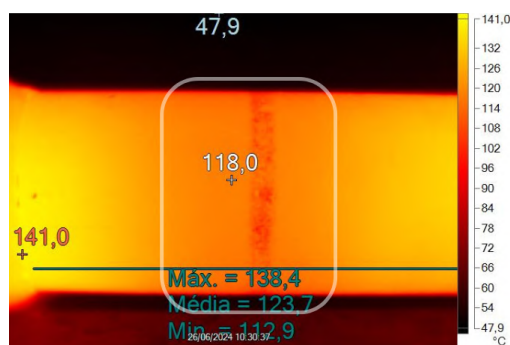


e. Simulação com 3 cm de espessura.

f. Gráfico de distribuição de temperatura.

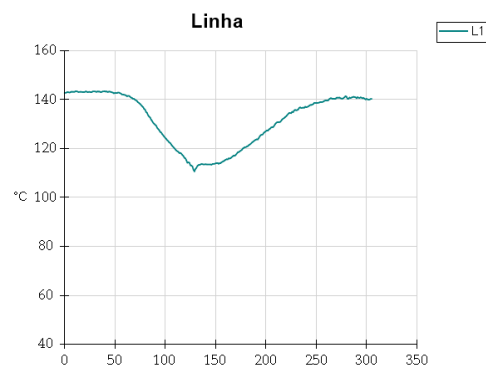
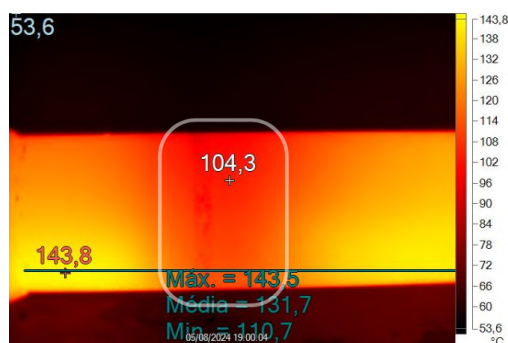
Nas Figura 4a, 4c e 4e, com simulação de espessuras de 1, 2 e 3 cm, respectivamente, mantendo *setpoint* de temperatura de 82°C, ainda é possível notar a região alaranjada presente no tubo relativa à presença da simulação da incrustação. Na Figura 4a, temos uma  $T_{máx} = 138,4^{\circ}\text{C}$  e uma  $T_{min} = 112,9^{\circ}\text{C}$ , obtendo-se um delta de temperatura de 25,5°C; na Figura 4c,  $T_{máx} = 143,5^{\circ}\text{C}$ , uma  $T_{min} = 110,7^{\circ}\text{C}$  e um  $\Delta T = 32,8^{\circ}\text{C}$ ; e na Figura 4e, tem-se uma  $T_{máx} = 136,3^{\circ}\text{C}$ , uma  $T_{min} = 96,6^{\circ}\text{C}$  e um  $\Delta T = 39,7^{\circ}\text{C}$ . Isto é evidenciado nas Figuras 4b, 4d e 4f, na região do marcador-linha que apresenta um decréscimo de temperatura, devido ao gesso, e o aumento de temperatura após ultrapassá-lo.

Figura 4: Mantendo *Setpoint* de 82°C



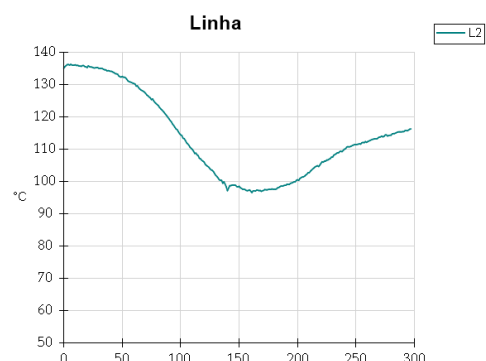
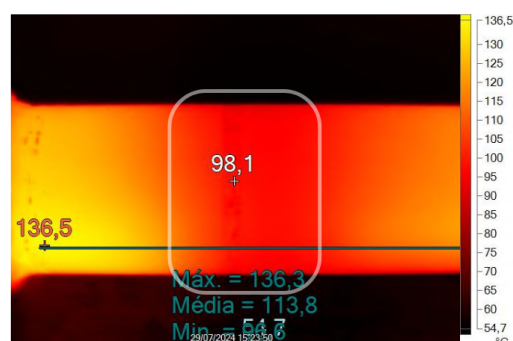
a. Simulação com 1 cm de espessura.

b. Gráfico de distribuição de temperatura.



c. Simulação com 2 cm de espessura.

d. Gráfico de distribuição de temperatura.



e. Simulação com 3 cm de espessura.

f. Gráfico de distribuição de temperatura.

A análise dos termogramas e seus respectivos gráficos possibilitam a confirmação da presença e localização da incrustação simulada nas condições de operação. É possível observar que, conforme esperado, a diferença de temperatura entre as áreas com e sem gesso, nos três conjuntos de Figuras, evidencia a característica isolante desse material, que apresenta semelhança quanto à natureza físico-química com as incrustações decorrentes do acúmulo de espécies insolúveis presentes em um fluido transportado em equipamentos industriais.

#### 4. Conclusão

Neste trabalho foi investigado a influência de incrustações no interior de tubos com passagem recirculante de água aquecida. Foram testadas espessuras de incrustações de 1cm, 2cm e 3 cm, e foram utilizados três valores de temperatura, 70°C, 76°C e 82°C. Os resultados obtidos exibem que, de fato, haverá uma redução da troca térmica na

superfície do tubo, apresentando uma diferença de temperatura entre as áreas com e sem incrustação.

Pode-se afirmar que a técnica de termografia mostrou boa aplicabilidade para o detecção de incrustação e apresentou precisão significativa para as condições estudadas. Nesse contexto, essa técnica se revela útil para a determinação precoce dos pontos de incrustação, fornecendo informações para tomada de decisões sobre a necessidade de intervenções de manutenção, podendo contribuir para a otimização das operações, redução de custos, além do aumento de segurança nas indústrias.

## **5. Referências Bibliográficas**

- (1) Melo, T. R. Projeto E Implementação De Sistemas De Controle Em Malha Fechada Para Uma Plataforma De Detecção De Incrustação., Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 1-3. (Fev) 2014.
- (2) Ratel M, Kapoor Y, Anxionnaz Minvielle Z, Seminel L and Vinet B, “Investigation of fouling rates in a heat exchanger using an innovative fouling rig”, Budapest: Proceedings of 10th International conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning), pág. 36, 201.
- (3) Muñoz Pinto D. A., Cuervo Camargo S. M., Orozco Parra M., Laverde D., García Vergara S. and Blanco Pinzon C., “Formation of fouling deposits on a carbon steel surface from Colombian heavy crude oil under preheating conditions”, Journal of Physics: Conference Series, 2016.
- (4) Gonçalves M., “Tecnologia Para Tratamento Corretivo E Preventivo De Incrustações De Águas Industriais”, Verso Assessoria de Imprensa, (Abr) 2021.
- (5) Moura C. E. S., “Análise De Falhas De Tubos De Uma Caldeira Aquatubular”, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 67, 2022.
- (6) Branch C. A. and Müller-Steinhagen H. M. (1991) “Influence of Scaling on the Performance of Shell-and-Tube Heat Exchangers”, Heat Transfer Engineering, 12(2), pag. 37–45.

- (7) Al-Hadhrani L. M., Quddus A. and Al-Otaibi D. A. (2013) "Calcium sulfate scale deposition on coated carbon steel and titanium", *Desalination and Water Treatment*, 51(13–15), pag. 2521–2528.
- (8) Contreras V. M. P., "Development Of A Meso-Scale Flow Loop Facility To Investigate Scale Deposition Phenomena In Pipes", Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, vii 5-7, 2019.
- (9) Barbosa A. A., Ferraz A. V., Santos G. A., "Caracterização Química, Mecânica E Morfológica Do Gesso B Obtido Do Pólo Do Araripe", Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus Juazeiro, Bahia, 501, 2014.
- (10) Linnikov O. D. (2000). "Investigation of the initial period of sulphate scale formation Part 2. Kinetics of calcium sulphate crystal growth at its crystallization on a heat-exchange surface". *Desalination*, 128(1), 35–46.
- (11) Mwaba M. G., Rindt C. C. M., Van Steenhoven A. A. and Vorstman M. A. G. (2006). "Experimental Investigation of  $\text{CaSO}_4$  Crystallization on a Flat Plate". *Heat Transfer Engineering*, 27(3), 42–54.

## EVALUATION OF NON-DESTRUCTIVE TESTING IN THE DETECTION OF INCRUSTATION IN CARBON STEEL PIPES

### ABSTRACT

Scale formation occurs due to the progressive accumulation of insoluble species present in a fluid transported through pipes. This is a common problem in industries that deal with fluid transport, causing various damages to the process efficiency. This work aimed to evaluate the feasibility of using non-destructive testing, such as ultrasound and passive thermography, in the detection and sizing of incrustation in carbon steel pipes. For this purpose, gypsum was used to simulate incrustation on the inner wall of the pipe, and a prototype was assembled to simulate real operating conditions, maintaining a temperature setpoint of 70°C, 76°C, and 82°C. Thus, it was possible to detect the scale through thermography, serving for decision-making on the need for maintenance interventions and early identification of incrustation points. However, the ultrasound technique proved to be unfeasible due to the lack of adequate equipment for a highly attenuating material such as gypsum.

**Keywords:** Incrustation, Thermography, Preventive Maintenance, Non-Destructive Testing.