



Análise de corrosão superficial através de imagens digitais em ambientes controlados

Analysis of surface corrosion through digital imaging in a controlled environment

Gustavo Melo de Lima¹

Fabiana Rodrigues Leta²

Laira Stephanie Batista de Oliveira³

Resumo: Este artigo apresenta a aplicação da metodologia de análise de corrosão superficial pela utilização de técnicas de análise por textura, possibilitando uma inspeção computacional. Este ensaio não destrutivo foi realizado em 4 dias, captando imagens digitais através de uma máquina fotográfica portátil. O material utilizado nos experimentos apresentados neste trabalho foram corpos de prova de aço carbono ASTM A-36, submersos em uma câmara de névoa salina ou salt spray. Esta câmara de névoa salina permite gerar um ambiente controlado, porém extremamente agressivo com relação a os ataques corrosivos. Este trabalho limitou-se a aplicação do parâmetro entropia para a análise da textura, sendo que existem outras técnicas para este tipo de análise por textura. Através de um gráfico entropia versus tempo foi possível uma análise precisa do comportamento da corrosão dos corpos de prova.

Palavras-chave: câmara de névoa salina, textura, inspeção, atmosfera corrosiva, inteligência artificial.

¹ UFF – Universidade Federal Fluminense

² UFF – Universidade Federal Fluminense

³ UFF – Universidade Federal Fluminense

Abstract: This paper deals with the application of the surface corrosion analyses method by using texture analyses technique, enabling computational inspection. This non-destructive test was performed during 4 days, acquiring digital images through a portable camera. Samples from low carbon steel ASTM A-36 was prepared, and then fixed into a salt spray chamber. The latter creates a controlled environment, which is extremely aggressive in the point of view of corrosion. This paper was limited to the application of the entropy parameter to analyze the texture, bearing in mind that other techniques for this kind of analyses there exist. In this sense, entropy versus time graph granted accurate analyses for the samples' corrosion behavior.

Keywords: salt spray, texture, inspection, corrosive atmosphere, artificial intelligence.

1. Introdução

A corrosão está presente na totalidade dos lugares em que passamos, sejam elas estruturas metálicas, como por exemplo, vigas de passarelas metálicas, suportes para cabos de transmissões elétricas e em lugares um pouco mais discretos, como por exemplo, estruturas concretadas. Um parâmetro muito utilizado para mensurar e desta forma monitorar qualquer tipo de corrosão é a taxa de corrosão (NUNES e LOBO, 2014)

Para Roberge (1999), a corrosão é muito danosa tanto para os materiais quanto para o ambiente. A corrosão pode ser monitorada e tratada com a finalidade de evitar uma paralisação de uma planta industrial, ou evitar um possível vazamento de algum produto tóxico que seja responsável por uma catástrofe ambiental, e indiretamente evitar uma perda de produto causando um prejuízo industrial. Para evitarmos tais eventos ou até possíveis sinistros, aconselha-se um bom planejamento de manutenção preditiva, pois nem sempre a manutenção preventiva é a mais eficaz, e com isso evitar ao máximo a manutenção corretiva não programada. Segundo Mainier *et al.* (2001), tanto as reações químicas quanto eletroquímicas com o ambiente são definidas como corrosão. As corrosões superficiais, as quais serão objeto de estudo deste artigo, afetam muito tubulações, cascos de navios e tanques de estocagem (TRUJILLO *et al.*, 2004). Segundo Leite (2015), microclimas gerados pelas diferentes localizações geográficas de algumas plantas industriais geram processos corrosivos.

Por Nunes e Lobo (2014), a maioria dos equipamentos industriais é fabricada em aço carbono, e para resistirem ao ambiente precisam ser revestidos e pintados para que a vida útil seja aumentada. São comuns as pinturas em trocadores de calor, tanques de estocagem e tubulações, pois estes equipamentos mesmo protegidos correm o risco de sofrerem corrosão principalmente se o ambiente for muito úmido.

De acordo com a NACE (2012), 30% dos custos anuais perdidos na manutenção das plantas industriais poderiam ser evitados com a implementação de um gerenciamento de engenharia de manutenção, pois dentro deste plano encontra-se a gestão da corrosão.

Segundo Gentil (2011), existem algumas técnicas não destrutivas que detectam, medem e preveem a corrosão, como por exemplo, ultrassom, correntes parasitas (*eddy current*), emissão acústica, radiografia, inspeção visual entre outras. A inspeção visual é ainda a mais comum praticada até hoje, e a mais subjetiva das avaliações disponíveis dentre as citadas acima. A subjetividade do método de inspeção, que varia de inspetor para inspetor, leva-se a proposição de uma metodologia de inspeção automática conhecida como visão computacional ou visão de máquina (FELICIANO *et al.*, 2015).

A visão de máquina é definida, por Steger, Wiedmann e Ulrich (2008), como sendo a área de conhecimento capaz de interpretar informações captadas através de um dispositivo visual e

alimentar uma máquina industrial. Os algoritmos na visão computacional são mais complexos quando comparados aos algoritmos na visão de máquinas e que isentam variáveis cognitivas (ZIBETTI, 2011). Os algoritmos na visão computacional são mais complexos porque envolvem análise de imagens e conceitos de inteligência artificial (IA).

A AOI (*Automated Optical Inspection*) é o sistema de visão que substitui a inspeção humana, pois antigamente as inspeções eram feitas através de amostragens. Atualmente com este sistema as inspeções ficaram mais rápidas e confiáveis, pois elimina-se a subjetividade da inspeção humana. Seres humanos submetidos a serviços repetitivos entram em fadiga com apenas 3 horas de serviço (BASCHERA e GRANDJEAN, 1979).

O custo de implementação de visão automática e o aumento de rendimento do processo de inspeção são duas grandes justificativas para o investimento neste tipo de metodologia.

A textura caracteriza-se por ser utilizada para descrever um determinado ponto qualquer ou uma certa região qualquer na análise de uma imagem. Imagens médicas, sensoriamento remoto, bancos de dados, controle de qualidade, entre outras, utiliza-se muito o conceito de textura.

Sistemas mais complexos como os citados acima (tratamento de imagens) necessitam de uma linguagem computacional bem mais robusta (PASCHOS e PETROU, 2003).

Outra importante propriedade que não se deve esquecer, para a análise de textura, é a luminescência, segundo Liu e Zhou (2003). Segundo Harilick (1973), alguns coeficientes como densidade, uniformidade, aspereza, intensidade, regularidade, podem caracterizar uma textura.

Existem outros métodos de análise de texturas, porém não farão parte deste trabalho, mas vale citá-los, como por exemplo, algumas imagens de sensoriamento remoto utilizando redes neurais híbridas SOM (*Self-Organizing Maps*) e LVQ (*Learning Vector Quantization*), juntamente com utilização de filtros (MARTINS, 2002).

Segundo Conci, Azevedo e Leta (2008), a textura pode ser fornecida através da medição randômica dos tons de pixels, isto é, quanto maior for o número de entropia da imagem mais irregular será a imagem e ela é calculada pela eq.1:

$$\text{Entropia} = \sum (p_i * \log_2(1/p_i)) \quad (1)$$

Vale chamar atenção para o detalhe que a definição de entropia para imagem se parece muito com a definição de entropia da termodinâmica, pois as duas definições trata-se de desordem do sistema, porém na termodinâmica nos referimos a desordem molecular. Em outras palavras, a entropia na termodinâmica está relacionada com a irreversibilidade do sistema.

Este trabalho tem como objetivo principal apresentar a análise do comportamento da corrosão superficial do aço carbono ASTM A-36 (ASTM, 2014) pelo método da textura através da utilização de uma câmara de névoa salina (*salt spray*). Esta câmara tem a função de simular um ambiente extremamente agressivo. Para que o objetivo principal seja atendido, alguns

objetivos específicos serão apresentados com a intenção de identificar o comportamento do aço carbono ASTM A-36 em um ambiente controlado pela temperatura da câmara de névoa salina, pH e concentração salina, bem como a geração de resultados pelo método da textura utilizando a entropia, apesar de existir vários outros métodos de caracterização da textura de um material, e apresentar uma metodologia de Inspeção Visual Automática (AOI) que independa da perícia humana para avaliação visual da corrosão.

A câmara de névoa salina tem por objetivo simular as condições mais severas possíveis e com isso acelerar o processo corrosivo do material que está sendo testado. Com isso, o mesmo material exposto na atmosfera sofre um processo de corrosão muito mais lento do que quando exposto ao da câmara de névoa salina.

Para este trabalho foram utilizados 4 corpos de prova de aço carbono ASTM A-36 submersos em uma câmara de névoa salina a uma temperatura de aproximadamente 35,8°C, um pH da água de 6,8 e uma concentração salina de 5% em massa, ou seja, 50 gramas de cloreto de sódio para 1 l d'água conforme ASTM B117 (ASTM, 2003). Para a validação dos resultados foi usado o software MatLab®.

2. Materiais e Métodos

A proposta deste trabalho é analisar a corrosão superficial de uma superfície metálica submetida à ação de uma câmara de névoa salina, cuja imagem digital é captada por uma câmera fotográfica portátil.

A câmara de névoa salina foi construída e operada seguindo rigorosamente todas as especificações da norma ASTM B117 (2003). O posicionamento dos CP (corpos de prova) dentro da câmara não são especificados, porém a temperatura da câmara, bem como o pH e a concentração salina foram seguidos conforme esta norma. A câmara de névoa salina é conhecida também como *salt spray* (Fog). Na fig.1 têm-se o esboço simplificado da câmara de névoa salina utilizada.

Quatro placas de aço carbono ASTM A-36 foram utilizados como corpo de provas (CP). Cada CP mede 100x100mm. Estes CP foram guilhotinados a partir de uma placa 1x1m². Este tipo de processo de corte não alterou a estrutura do material, pois não houve alteração na temperatura, diferentemente, se o material fosse cortado por maçarico. Mesmo não havendo alteração nas propriedades nas bordas dos CP, optou-se descartar 30mm correspondente as bordas dos CP, para evitar interferências devido a algum encruamento remanente. A figura 2 a seguir mostra a área útil analisada pelas imagens.

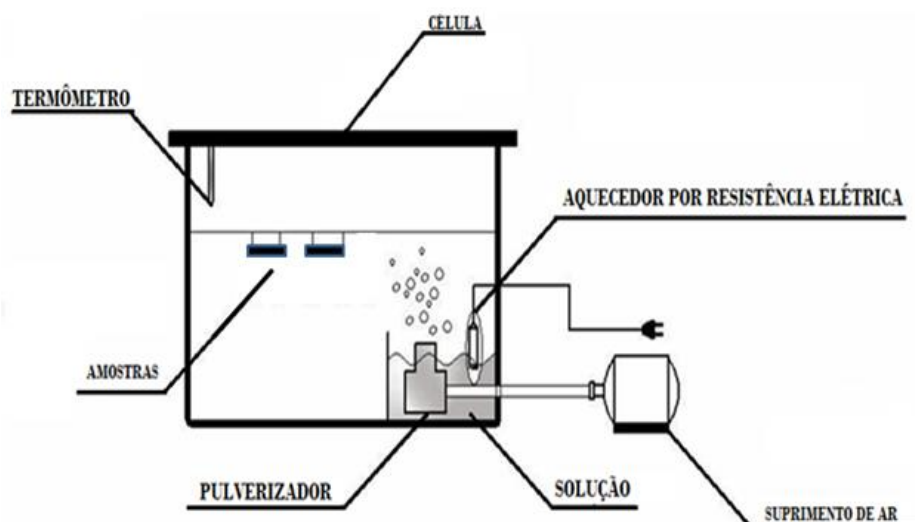


Figura 1: Esboço simplificado da câmara salina.

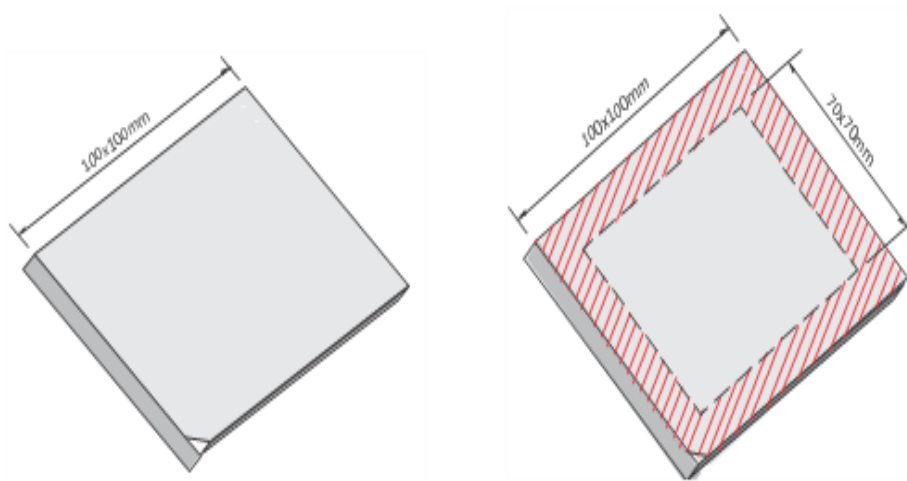


Figura 2: Esquemático do corpo de prova como todo e esquemático do corpo de prova com a área útil definida (70x70mm)

As imagens foram captadas em um intervalo de uma hora, isto é, a cada hora o CP era retirado da câmara de névoa salina para ser fotografado e logo após a captura da imagem digital do CP, o mesmo era recolocado no mesmo lugar. Os CP foram posicionados, dentro da câmara de névoa salina de forma horizontal para evitar escorrimento de algum condensado. As imagens captadas dos CP foram as da superfície inferior de contato com a névoa salina, para evitar qualquer interferência de algum possível acúmulo de sal na superfície superior dos CP e com isso interferir na análise dos tons de cinza na análise dos pixels.

Para que as imagens fossem padronizadas com relação à luminescência, as imagens digitais foram captadas dentro de uma câmara de luz. Na figura 3 têm-se um desenho esquemático da câmara de luz.

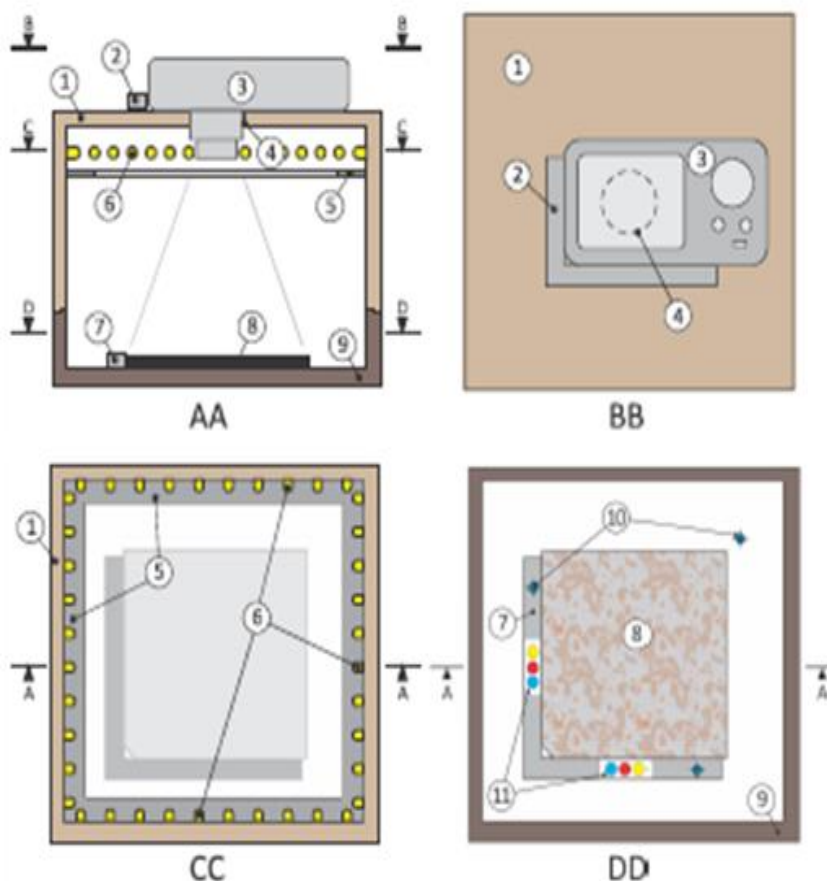


Figura 3: Câmara de luz. AA) corte lateral; BB) vista tampa; CC) Corte, vista base interna. Legenda: 1)Tampa; 2)Apoio para câmera; 3) Câmera; 4)Furo na tampa para encaixe lente da câmera; 5) Anteparo antirreflexo; 6)Fita leds; 7)Apoio corpo-de-prova; 8) Corpo-de-prova; 9) Base; 10) Marcas Fiduciais; 11) Padrão de cor para calibração.

Os CP foram colocados dentro da câmara de névoa salina em pares. No primeiro dia foram colocados os CP 1 e 2, e foram captadas oito imagens digitais. Ou seja, a cada hora, os CP eram retirados da câmara salina, as imagens eram captadas dentro da câmara de luz e depois voltavam para dentro da câmara de névoa salina. Ao final do primeiro dia, os CP foram colocados dentro de um dessecador com bastante sílica gel para que a umidade não interferisse nos resultados. No segundo dia, o procedimento foi repetido para os CP 1 e 2. Então ao final do segundo dia captou-se 16 imagens digitais dos CP. Então foram captadas 32 imagens digitais dos CP 1 e 2. No terceiro dia, o mesmo procedimento para os CP 1 e 2 foram repetidos para os CP 3 e 4, somando um total de 64 imagens digitais captadas de todos os CP. Segue na fig.4 uma fotografia captada do CP 1 no momento 14. A corrosão já estava bem avançada.

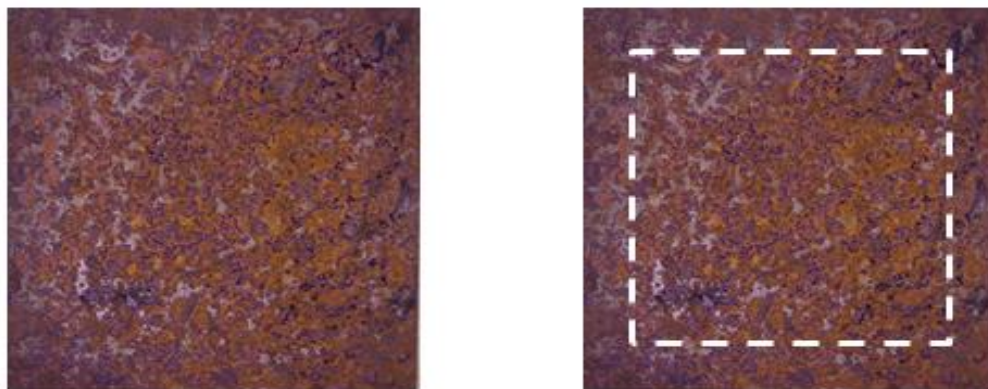


Figura 4: Corpo de prova número 1 na 14ª captura de imagem. Corrosão bem avançada. À direita mostra-se a área útil a ser analisada (70x70mm)

Apesar das imagens digitais captarem os CP por inteiro, o algoritmo foi escrito para analisar as imagens digitais em oito sub-amostras, conforme mostrado na figura 5 A-H. Isto foi adotado para os 4 CP. Estas amostras foram divididas em pequenos quadrados de 20x20mm, pois esta diminuição diminuiria a área de pixels.

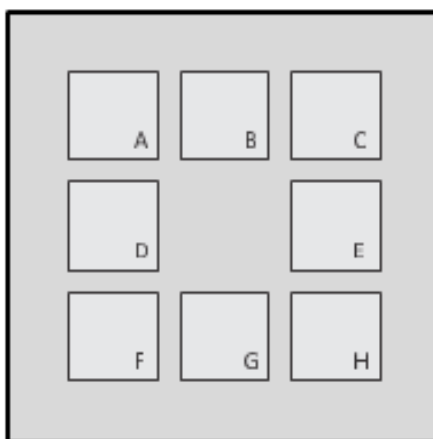


Figura 5: Amostras dos corpos de prova. Cada quadrado tem 20x20mm. Cada quadrado tem uma área de 0,26 Mpixels (514x514 pixels)

As imagens centrais dos CP não foram consideradas neste trabalho, devido à sombra produzida, e isto iria interferir diretamente nos resultados, já que tons de cinza foram empregados.

3. Resultados e Discussões

Conforme citado na introdução deste trabalho o software utilizado para cálculo da entropia foi o MatLab®.

Como a entropia capacita mensurar a desordem dos tons de cinza de uma imagem digital, isto é, quanto maior o número da entropia maior será a irregularidade da imagem digital. Então nota-se, conforme mostrado na figura 6, que até o tempo de 6h há significativo aumento da intensidade da entropia, com sensível redução dos desvios-padrão das medidas. Cabe informar que a textura aumenta, face ao aumento de pontos cinza que oriundos da corrosão do CP. O elevado desvios-padrão das medidas, observado para os tempos de 1 e 2h, deve-se à má distribuição dos pontos cinza, os quais se encontravam segregados em apenas uma região do CP – vide CP A01 e A02 da fig.7. Esta faixa de tempo, com entropia crescente, e elevados desvios-padrão, caracteriza o início do processo corrosivo do CP em *salt spray*, o que é muito bem verificado pelas fotos das superfícies do CP na fig.7, evoluindo de CP A01 a A06. É possível que o CP tenha experimentado uma taxa de corrosão crescente, neste período de tempo inicial. Resultados quase iguais obtidos para os tempos 5 e 6h são bem justificados, pois as fotos de CP A05 e A06 da fig.7 são praticamente iguais. Estes resultados são de grande significado, pois indicam que a técnica empregada é capaz de caracterizar, inclusive os estágios parciais de corrosão superficial do CP.

Na mesma fig.6, observa-se que no tempo 6h aparece um ponto com um valor de entropia elevado, e isto indica que houve uma evolução no início da corrosão, e após este tempo existe uma regularidade, ou seja, uma melhor distribuição da corrosão ao longo da superfície dos CP através da imagem digital, de 7 até 11h de ensaio. Isto pode indicar que a taxa de corrosão neste intervalo de tempo foi praticamente constante – isto é verificado para as fotos CP A07 a CP A11 da fig.7. Isto acontece quando a velocidade da degradação da superfície pela corrosão se iguala à velocidade de formação de camada protetora. Este mecanismo é competitivo e repetitivo: a camada protetora é formada, mas é, logo em seguida quebrada pela contínua ação corrosiva, mas como esta camada protetora é oriunda dos próprios produtos de corrosão, há uma continuidade do processo, até determinado tempo. Este tempo pode ser determinado por alguns fatores, por exemplo, quando a corrosão superficial por pites evoluir para corrosão alveolar (GENTIL, 2011).

Para tempos superiores a 11h de ensaio, observa-se claramente na fig.6 que sensível redução de entropia aconteceu. Isto deve-se à presença marcante de uma fase de cor alaranjada, que obviamente diminuiu a quantidade de pontos cinzas, conforme pode ser verificado para as fotos CP A11-A16 na fig.7. Importa ressaltar que a quantidade crescente deste produto de corrosão alaranjado acontece de maneira bem distribuída, ao longo de todo o CP, uma vez que os desvios-padrão pouco foram influenciados pelo tempo de exposição à névoa salina. Importa ressaltar que a técnica empregada foi capaz de caracterizar este estágio final de degradação superficial do CP.

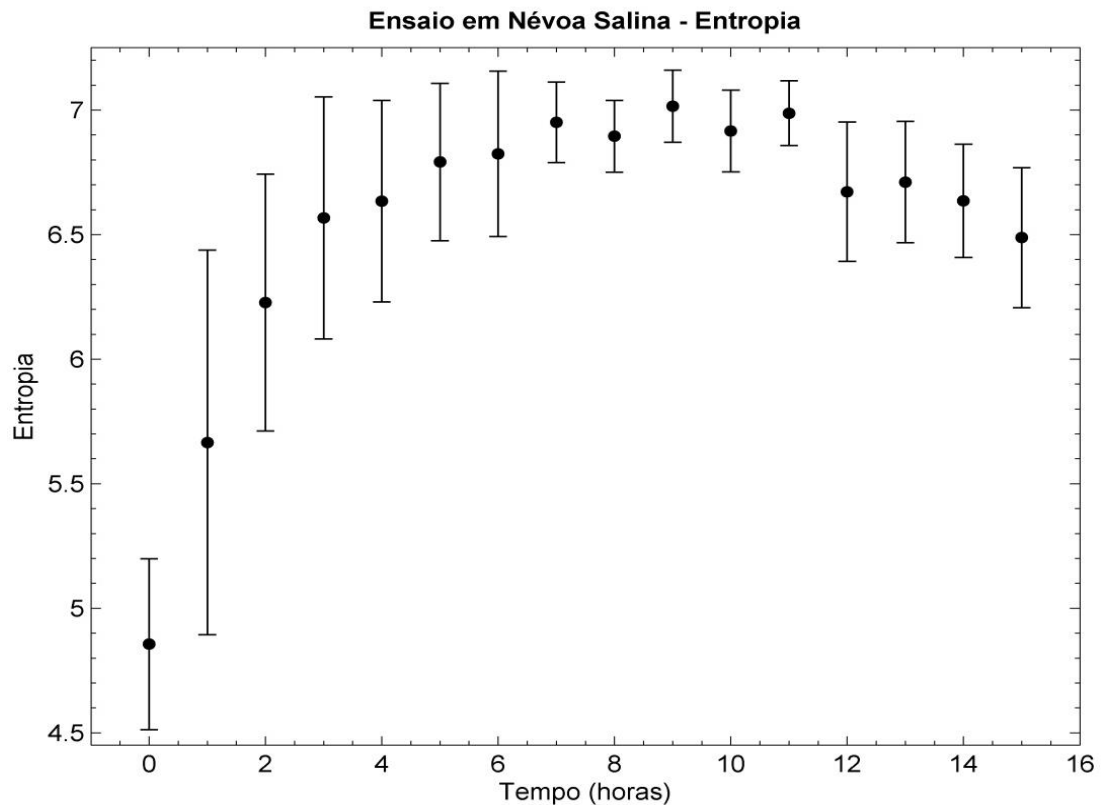


Figura 6: Entropia x tempo. Tempo zero é relativo à superfície do CP antes de ser submetido ao ensaio de corrosão. Cada ponto corresponde à média dos valores dos 4 CPs utilizados.

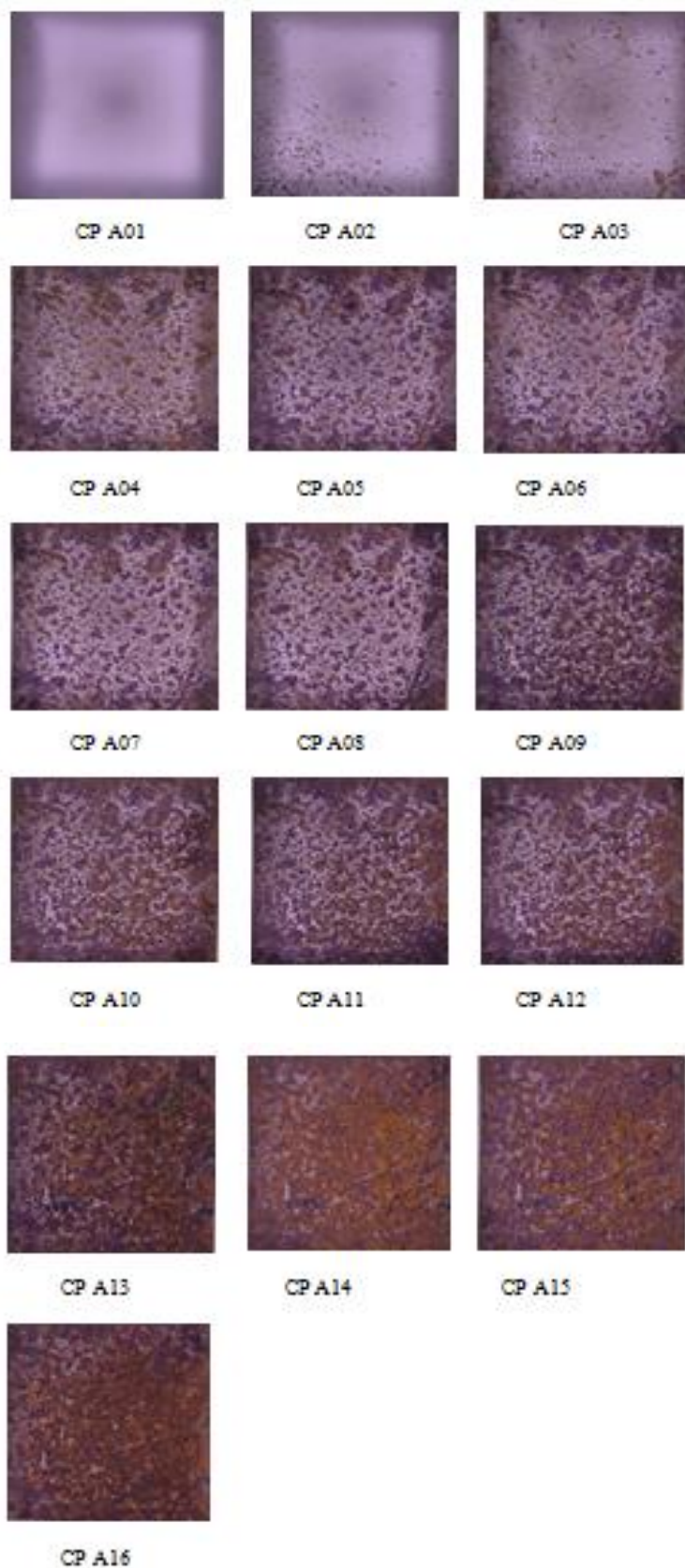


Figura 7: Sequência de imagens do CP "A"

4. Conclusões

O resultado gerado foi capaz de mostrar que a análise de textura para análise da corrosão superficial é viável como uma metodologia de inspeção através da visão computacional.

Foi possível demonstrar através do gráfico de entropia um aumento dos pontos de tons de cinza do CP, porém esta distribuição não foi homogênea ao elevado desvios-padrão das medidas, ou seja, quanto maior os desvios-padrão, maior o poder corrosivo que o CP sofre e isto é demonstrado principalmente nos tempos 1 e 2h nos corpos de prova A01 e A02 da figura 7.

Os estágios parciais de corrosão foram demonstrados nas fotos dos CPs A05 e A06 da figura 7, pois quase não houve alteração entre estas duas imagens, mostrando que estes resultados são extremamente significativos para esta metodologia de trabalho.

Percebe-se uma distribuição mais homogênea entre as imagens dos CPs A07 ao A11 indicando uma taxa de corrosão constante.

Observa-se na imagem do CP A11 na figura 7 uma coloração alaranjada e um aumento considerável da entropia. Esta coloração apresenta-se de forma distribuída, comprovada por um menor desvio-padrão no gráfico da figura 6. Então através da metodologia empregada foi possível a caracterização da degradação superficial do CP utilizando um *salt-spray*.

5. Referência Bibliográfica

ASM HANDBOOK 1992 Corrosion. ASM International Volume 13, CD-ROM. p. 3455.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. 2014 ASTM Standard A36. Standard Specification for Carbon Structural Steel. 3p. www.astm.org.

_____. ASTM Standard B117. 2003 Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus. 24p. www.astm.org.

_____. ASTM Standard D1068. 2010 Standard Test Methods for Iron in Water. 24p. www.astm.org.

ASM Handbook. 1987 vol 13A. Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection. ASM International, 1135p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6181:2003 – Classificação de meios corrosivos. Rio de Janeiro. 5p. <http://www.abntcatalogo.com.br>.

_____. NBR 14643:2001 – Corrosão atmosférica - Classificação da corrosividade de atmosferas. Rio de Janeiro. 11p. <http://www.abntcatalogo.com.br>

_____. NBR 15185:2004 – Inspeção visual de superfície para pintura industrial. Rio de Janeiro. 2p. <http://www.abntcatalogo.com.br>

_____. NBR 6210:2008 – Corrosão Atmosférica – Materiais metálicos – Preparo, limpeza e determinação da taxa de corrosão de corpos-de-prova em ensaios de corrosão. Rio de Janeiro. 9p. <http://www.abntcatalogo.com.br>

_____. NBR 8094:1983 – Corrosão por exposição à névoa salina - Método de ensaio. Rio de Janeiro. 3p. <http://www.abntcatalogo.com.br>

BASCHERA, P., GRANDJEAN, E. 1979, Effects of repetitive tasks with different degrees of difficulty on critical fusion frequency (CFF) and subjective state. *Ergonomics*, v.22.

CALLISTER JR, D. W. 2008, *Ciência e Engenharia de Materiais uma Introdução*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S. A.

CHIAVERINI, V. 2012. *Aços e Ferros Fundidos*. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração.

COLPAERT, H. 2008. *Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns*. 4. ed. São Paulo: Blucher,.

CONCI, Aura; AZEVEDO, Eduardo; LETA, Fabiana R. , 2008. *Computação Gráfica*. v2. Rio de Janeiro: Elsevier.

DUTRA, A. C.; NUNES, L. P. 2011. *Proteção Catódica: Técnica de Combate à Corrosão*. 5. ed. Rio de Janeiro: Interciência.

FELICIANO, Flávio F.; LETA, Fabiana R.; MAINIER, Fernando B., 2015; Texture digital analysis for corrosion monitoring. *Corrosion Science*, v.93, p 138–147.

GENTIL, V. 2011. *Corrosão*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros técnicos e Científicos.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R.E. 2000. *Processamento de Imagens Digitais*, Edgard Blucher, SP.

HARALICK, R. M.; SHANMUGAN, K.; DINSTEN, I. 1973, Texture Features for Image Classification. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, v.SMC-3, n.6, p.610-621.

- LEITE, P. P. B.; 2015. Identificação, Prevenção e Monitoramento dos Fatores Causadores da Corrosão sem Isolamento Térmico, Niterói. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós em Montagem Industrial, UFF.
- LIU, Z.; KRYS, D.; GENEST, M.; 2012. Processing thermography images for pitting corrosion quantification on small diameter ductile iron pipe. *NDT & E International*, v.47, p.105–115.
- LIU, Y., ZHOU, X., 2003. A simple texture Descriptor for texture retrieval, *Communication Technology Proceedings*, vol. 2, pp. 1662-1665.
- LU, R.S.; LI, Y.F.; YU, Q. 2001. Online measurement of the straightness of seamless steel pipes using machine vision techniques. *Sensors and Actuator A*, v.94.
- MAINIER, P. B.; LETA, F. R. 2001, O ensino da corrosão e de técnicas anticorrosivas compatíveis com o meio ambiente. *Anais: XXIX Congresso Brasileiro de Engenharia – COBENGE*, Setembro, Rio Grande do Sul.
- MARTINS, M. P., GUIMARÃES, L. N. F., FONSECA, L. M. G. 2002, Classificador de Texturas por Redes Neurais, *II Congresso Brasileiro de Computação – CB Comp*.
- MORAES, Cícero Couto de, 2007. *Engenharia de Automação Industrial*. 2. ed. [S.l.]: LTC
- NACE International The corrosion Society. *Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States*. n.FHWA-RD-01-156, 2012. Disponível em: <<http://www.nace.org/uploadedFiles/Publications/ccsupp.pdf>>. Acesso em: Set 2012
- _____. *NACE Standard RP-0775 – Preparation, Installation, Analysis and Interpretation of Corrosion Coupons in Oilfield Operations*. 2005.
- NUNES, L.P. e LOBO, 2014. *A.C.O. Pintura industrial na proteção anticorrosiva*. Rio de Janeiro: Interciência.
- NUNES, L. P. 2007. *Fundamentos de Resistência à Corrosão*. Rio de Janeiro: Interciência.
- PASCHOS, G.; PETROU, M.; 2003, Histogram ratio features for color texture classification, *Pattern Recognition Letters*, vol. 24, pp. 309-314.
- PEDRINI, Hélio; SCHWARTZ, Wilian Robson, 2008. *Análise de imagens digitais: princípios, algoritmos e aplicações*. São Paulo: Thomson Learning.
- ROBERGE, Pierre R. 1999. *Handbook of Corrosion Engineering*. McGraw-Hill.
- STEGER, C.; WIEDEMANN, C.; ULRICH, M. 2008. *Machine Vision Algorithms and Applications*. [S.l.]: Wiley-VCH.
- TRUJILLO, M.; SADKI, M. 2004. Sensitivity analysis for texture models applied to rust steel classification. In: *Machine Vision Applications in Industrial Inspection XII*. San Jose, CA: SPIE., v. 5303, p. 161-169.
- ZIBETTI, Marcelo V. W., 2011. *Visão de Máquina e suas Aplicações na Automação Industrial*. 48 f. Monografia (Especialização em Automação Industrial) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba,.