

## Monitoramento da corrosão do aço de baixo carbono em sistema com fluxo turbulento de NaCl 3%: uma investigação eletroquímica

Corrosion monitoring of low carbon steel in the system with 3% NaCl turbulence: an electrochemical investigation

Jhonatan Peres de Sousa<sup>1</sup>, José Marcos Soares do Nascimento<sup>2</sup>,  
Carmem Célia Francisco do Nascimento<sup>1</sup>, Gedeon Silva Reis<sup>1</sup>,  
Maria Eliziane Pires de Souza<sup>3</sup>, Ferdinando Marco Rodrigues Borges<sup>1</sup>,  
José Carlos Silva Rocha Junior<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, IFMA/Campus Monte Castelo, Departamento de Mecânica e Materiais - DMM, Avenida Getúlio Vargas, 04, Monte Castelo, CEP 65030. 005, São Luís, MA, Brasil.

<sup>2</sup> Faculdade NETCOM, Laboratório de Computação e Simulação, Rua Antônio Vieira, 37, Cohab Anil IV, CEP 65051.670, São Luís, MA, Brasil.

<sup>3</sup> Universidade Federal do Maranhão, UFMA, Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica, Avenida dos Portugueses, 1966, Vila Bacanga, CEP 65080.085, São Luís, MA, Brasil.

e-mail: corrossolab@gmail.com, jhonatan.peres@ifma.edu.br; jm.sn@ig.com.br; carmemfn@ifma.edu.br; engjuni-or.josecarlos@hotmail.com; maria.eliziane@ufma.br; ferdinando@ifma.edu.br; gedeonreis@ifma.edu.br

### RESUMO

Em dutos que operam em regime turbulento, o processo corrosivo é acelerado e diretamente responsável por inúmeros prejuízos em plantas industriais, tais como paradas nas linhas de produção, falhas em equipamentos e elevados custos de manutenção. Embora haja poucos estudos laboratoriais nesta condição de escoamento, há um consenso entre inúmeros pesquisadores que o monitoramento e investigações nesta condição são essenciais, uma vez que simulam condições representativas da realidade industrial. Este trabalho investigou a influência do fluxo do meio eletrolítico sobre os parâmetros eletroquímicos do aço ABNT 1020 em solução NaCl 3% submetido a diferentes velocidades (0,21, 0,42, 0,62 e 0,84 m.s<sup>-1</sup>), relacionando os resultados obtidos por Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) e Polarização Potenciodinâmica Linear (PPL). Os ensaios eletroquímicos foram realizados a partir de uma plataforma experimental construída para tal finalidade e acoplada às conexões do potenciostato, a fim de se obter curvas experimentais enquanto o eletrólito fluía dentro da célula e interagiu com a superfície do metal. Os resultados mostraram que a variação da velocidade provoca mudanças notáveis nos principais parâmetros do ensaio e que as técnicas eletroquímicas corroboraram entre si mesmo em condições turbulentas de escoamento na plataforma de testes.

**Palavras-chave:** Corrosão. Aço carbono. Fluxo turbulento. Eletroquímica.

### ABSTRACT

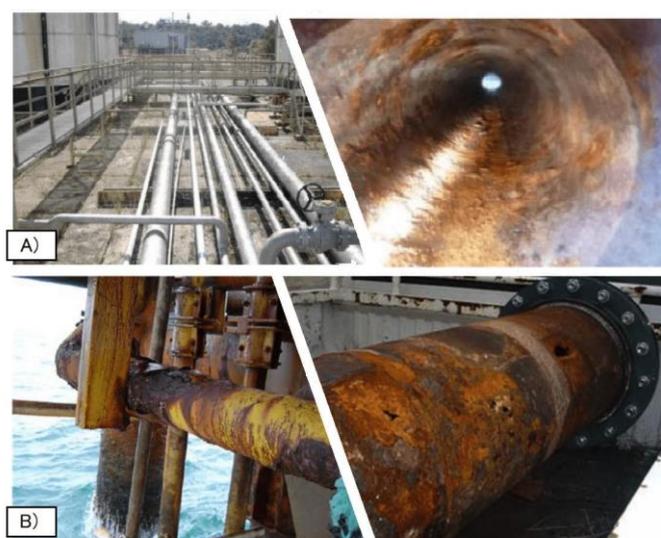
In pipelines that operate in turbulent conditions, the corrosive process is accelerated and directly responsible for numerous losses in industrial plants, such as downtime in production lines, equipment failures and high maintenance costs. Although there are few laboratory studies in this flow condition, there is a consensus among countless researchers that monitoring and investigations in this condition are essential, since they simulate conditions representative of industrial reality. This work investigated the influence of the flow of the electrolytic medium on the electrochemical parameters of ABNT 1020 steel in 3% NaCl solution submitted to different speeds (0.21, 0.42, 0.62 and 0.84 ms<sup>-1</sup>), relating the results obtained by Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIE) and Linear Potentiodynamic Polarization (LPP). The electrochemical tests were performed from an experimental platform built for this purpose and coupled to the connections of the poten-

tiostat, in order to obtain experimental curves while the electrolyte flowed inside the cell and interacted with the metal surface. The results showed that the variation in speed causes notable changes in the main parameters of the test and that the electrochemical techniques corroborated each other in turbulent flow conditions in the test platform.

**Keywords:** Corrosion. Carbon steel. Turbulent flow. Electrochemistry.

## 1. INTRODUÇÃO

A corrosão é responsável por grandes perdas na indústria, principalmente em processos expostos a meios agressivos e com influência de fatores como: fluxo do eletrólito, temperaturas elevadas, pH ácido, etc. Conforme ilustra a Figura 1, em adutoras, vertedores de barragens e indústrias de petróleo e gás, a corrosão representa grande parte dos custos de produção dessas companhias, pois a maioria das tubulações industriais trabalham com regime turbulento de escoamento. Este regime permite maior velocidade no transporte dos fluidos, acarretando assim um ganho de tempo e um aumento expressivo na produção. Por outro lado, demonstra-se agressivo à integridade física das instalações, uma vez que é caracterizado por movimentos caóticos e aleatórios das partículas que compõem o fluido processado ou transportado [1, 2].



**Figura 1:** Instalações industriais danificadas pela corrosão. A) Sistema STU-85 da Base Operacional Geólogo Pedro de Moura (BOGPM) [3], B) Tubulação offshore corroída [4].

Dessa forma, monitorar o comportamento dos aços em meios agressivos, proporcionam ferramentas indispensáveis para evitar elevadas perdas econômicas devido à queda na produção decorrente da paralisação da planta, assim como acidentes graves que levam a impactos sociais e ambientais sérios, incluindo a perda de vidas humanas. No Brasil, os custos estimados das perdas relativas aos desgastes provocados pela corrosão atingem 3,5% do PIB [5], o que equivale, em 2016, a aproximadamente R\$ 219 bilhões [6].

Este cenário aponta para a importância das pesquisas laboratoriais envolvendo testes eletroquímicos sob influência do fluxo, uma vez que as informações provenientes auxiliam na escolha de materiais mediante as limitações de trabalho ou parâmetros de um determinado processo. Alguns pesquisadores [7-10] já estão conscientes da importância de investigações nesta condição de ensaio. No entanto, ainda existe um número limitado de pesquisas envolvendo o tema e ainda existem muitos materiais a serem investigados em condições de fluxo.

OLVERA-MARTÍNEZ *et al.* [7] estudaram a influência do fluxo turbulento sobre o desempenho de inibidores de corrosão no aço API 5LX32 pela técnica do eletrodo de cilindro rotativo (ECR) em ambientes aquosos contendo CO<sub>2</sub>. Notou-se que a corrosão é influenciada pelo fluxo e que a corrosão interna pode ser controlada pela adição de inibidores pela formação de filme na superfície metálica. Os autores concluíram que, em velocidades constantes, com um aumento na concentração, ocorre uma diminuição na taxa de corrosão.

JING *et al.* [8] investigaram o efeito da velocidade sobre o comportamento à corrosão da liga de magnésio AZ91D num cotovelo utilizando um sistema de circuito fechado aliado as técnicas de polarização e

dinâmica dos fluidos computacional (CFD). Observou-se que a taxa de corrosão aumenta com o aumento da velocidade e que uma velocidade de escoamento crítica poderia existir na corrosão da liga de magnésio AZ91D. Verificou-se que o fluxo do fluido aumenta a convecção e a difusão das espécies reativas, acelerando as reações eletroquímicas de corrosão, ou seja, o fluxo acelera a remoção de produtos de corrosão na superfície do eletrodo.

LI *et al.* [9] analisaram a corrosão do aço API X65 na presença do CO<sub>2</sub> em soluções isentas de óleo e saturadas (emulsões de óleo-água) submetidas a fluxo contínuo por meios de técnicas eletroquímicas e CFD. Os autores concluíram que o aumento da velocidade de escoamento acelera a transferência de massa, contribuindo para o aumento da corrosão. A presença de óleo no fluido diminuiu a corrosão do aço em todas as concentrações, fato observado somente nos ensaios a 45°C e a 1 m/s<sup>-1</sup>. Isso foi atribuído ao aumento da possibilidade da parede do tubo se tornar mais umedecida na presença do óleo nesta temperatura, atuando assim como uma barreira ao processo corrosivo. Em temperaturas e velocidades mais elevadas, observou-se um aumento na taxa de corrosão.

FERREIRA [10] realizou uma avaliação da corrosão por fluxo do aço AISI 1020 em duas condições diferenciadas de acabamento superficial na presença do NaHCO<sub>3</sub> 0,5 M saturada com CO<sub>2</sub> utilizando um ECR para realização dos ensaios eletroquímicos. Verificou-se que, tanto a formação como a passivação da camada de FeCO<sub>3</sub> são influenciadas pela presença do fluxo e pela rugosidade superficial do aço, que o ECR é uma importante ferramenta para investigações envolvendo corrosão em fluxo e que o mecanismo de corrosão sob fluxo num meio contendo CO<sub>2</sub> envolve basicamente a formação da camada de FeCO<sub>3</sub> de acordo com a interação permitida pela estrutura da camada limite hidrodinâmica estabelecida.

Dentre uma gama de ligas metálicas, o aço carbono se destaca por ser amplamente utilizado em aplicações da engenharia, principalmente por satisfazer requisitos mecânicos, estruturais e de fabricação, além de ser mais viável financeiramente [3, 10, 11]. Embora este material apresente inúmeras aplicabilidades, a susceptibilidade a corrosão do aço carbono limita seu tempo de vida útil de acordo com as condições a que é exposto, isso demanda investigações mais detalhadas sobre seu comportamento eletroquímico em condições de fluxo. Neste contexto, este trabalho tem como principal objetivo investigar o comportamento eletroquímico do aço ABNT 1020 na presença de NaCl 3% em diferentes velocidades eletrolíticas por meio das técnicas de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) e Polarização Potenciodinâmica Linear (PPL) aplicada a uma bancada experimental construída para realização de ensaios eletroquímicos com controle do fluxo.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

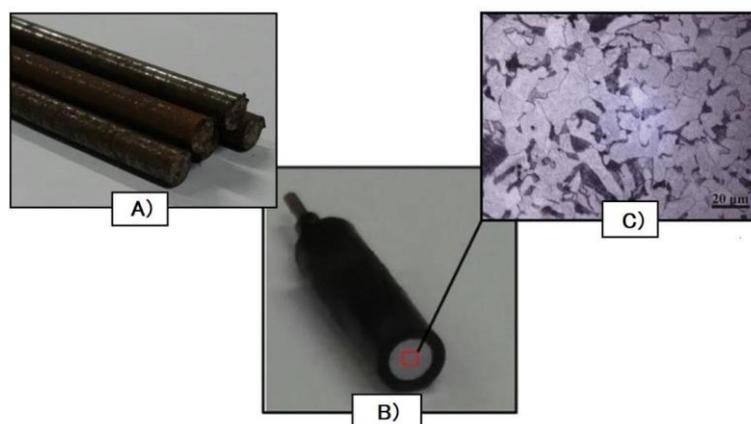
### 2.1 Eletrodos

O eletrodo de referência (ER) utilizado foi o de Ag/AgCl com KCl saturado e 7 mm de diâmetro. O contra eletrodo (CE) utilizado para o fechamento do circuito foi uma barra de grafite contendo 3 mm de diâmetro.

Os eletrodos de trabalho foram confeccionados a partir de barras de aço ABNT 1020, usinadas para as dimensões de 5 mm (Ø) e 30 mm (comprimento). Em seguida foram revestidas com borracha rígida para o perfeito encaixe na célula eletroquímica. Na sequência, a área dos eletrodos (0,2 cm<sup>2</sup>) exposta ao fluxo foi lixada com lixas d'água de carbetto de silício variando de 100 a 1200 mesh. Em seguida foram lavadas com água destilada e secadas com jato de ar quente. A Tabela 1 apresenta a composição do aço ABNT 1020 na condição de recebido e a Figura 2 exhibe um modelo de eletrodo de trabalho utilizado nos experimentos:

**Tabela 1:** Composição química nominal do aço ABNT 1020.

MATERIAL	C%	Mn %	Si %	P % (Máx.)	S% (Máx.)
ABNT 1020	0,18	0,30	0,05	0,04	0,05



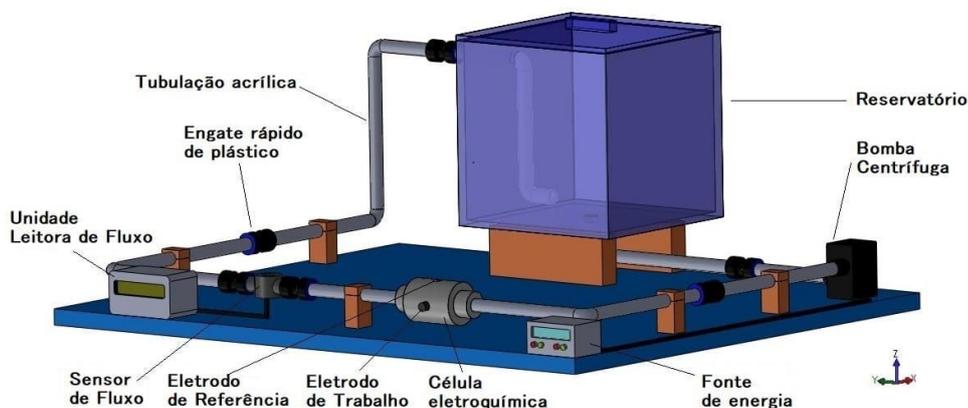
**Figura 2:** Modelo de eletrodo de trabalho utilizado nos experimentos. A) Barras na condição de recebido, B) Eletrodos de trabalho e C) Microscopia Óptica do aço ABNT 1020.

## 2.2 Preparação das soluções

Em todos os ensaios foram utilizadas soluções de NaCl 3% com pH 6,8 preparadas a partir de água destilada. Para cada ensaio foi utilizado 650 ml de solução de NaCl, a fim de possibilitar o perfeito funcionamento do sistema, garantindo que os eletrodos sempre estivessem em contato com a solução.

## 2.3 Sistema eletroquímico para ensaio com fluxo

Para o desenvolvimento desta pesquisa foi necessário a construção de uma bancada experimental com controle do fluxo. Antes da construção física, a maquete eletrônica foi projetada e simulada no Software Proteus<sup>®</sup> 2.1 com as formulações matemáticas compiladas em uma linguagem de programação arquivadas no dispositivo Arduino Uno, que permitiu a leitura da vazão proveniente da conversão de pulsos PWM (*Pulse Width Modulation*) emitidos pelo sensor de fluxo. O esquema da montagem experimental está ilustrado na Figura 3.

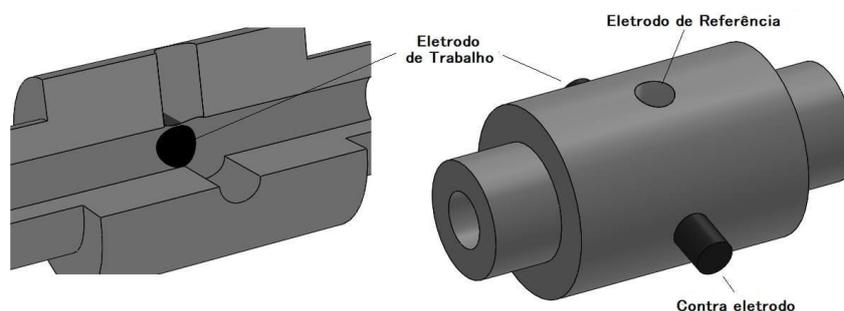


**Figura 3:** Plataforma experimental para ensaios eletroquímicos com controle de fluxo – Laboratório Multiusuário de Corrosão e Desgaste – IFMA/Campus Monte Castelo.

A fonte regulável IFTA 5020 alimentou a minibomba 12V DC, máxima corrente nominal de 350mA, 5W e vazão máxima de 240 L/h que por sua vez acionou o fluxo do eletrólito para que este circulasse por uma tubulação de acrílico 10 mm. A minibomba escolhida é totalmente impermeável e própria para trabalhar continuamente em fluidos como água, óleo, gasolina, solução ácida e alcalina. A velocidade, vazão e condição de escoamento do eletrólito foram definidas pelo sensor de fluxo de efeito Hall 1/2'' (modelo YF-S201) que faz portabilidade com a Unidade Leitora de Fluxo (ULF) por meio de um microcontrolador Arduino Uno.

O ensaio ocorreu com o acionamento do Potenciostato PGSTAT 302N, controlado pelo software Nova<sup>®</sup> (versão 1.11) da Metrohm Autolab B.V, acoplado a célula eletroquímica composta por um eletrodo de trabalho (ET), um contra eletrodo de grafite (CE, área superficial de 7,065 mm<sup>2</sup>) e um eletrodo de referência (ER) Ag/AgCl (KCl saturado). A célula eletroquímica foi fabricada com material Nylon (diâmetro externo de

40 mm e interno de 12 mm). O trabalho tem como referência a norma ASTM G59-97 [12] que trata do posicionamento dos eletrodos, assim como das conexões existentes entre o computador, a célula eletroquímica e o potenciostato. Os eletrodos foram dispostos de maneira que suas faces ficassem em contato com o fluxo da solução, como ilustrado na Figura 4:



**Figura 4:** Célula eletroquímica confeccionada para testes em fluxo – Laboratório Multiusuário de Corrosão e Desgaste - IFMA/Campus Monte Castelo.

## 2.4 Ensaios eletroquímicos

Primeiramente, foram executadas medidas de Potencial de Circuito Aberto (OCP) e sequencialmente medidas de Impedância Eletroquímica. As medidas de OCP foram realizadas para garantir a estabilização do sistema, procedimento que foi atingido em 1800s. Ainda no mesmo roteiro de programação, foram realizadas novas medidas de OCP e posteriormente medidas de Polarização Potenciodinâmica.

Nos ensaios de Impedância, a frequência aplicada variou de  $10^5$  Hz a 1Hz e amplitude de perturbação de 10 mV (RMS) com 10 pontos/década. A montagem do circuito equivalente foi gerada no próprio software que faz portabilidade com o equipamento e, em seguida, os valores obtidos nos experimentos foram transportados para o software Origin<sup>®</sup> para serem tratados estatisticamente e analisados.

Para os ensaios de Polarização Potenciodinâmica sob influência do fluxo, a taxa de varredura aplicada foi de  $1 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$  com sobretensões anódicas e catódicas de +200 e -200 mV, respectivamente, em relação a OCP obtida em cada experimento. A medição eletroquímica foi de 30 minutos. O método de Extrapolação de Tafel aplicado para obtenção dos parâmetros segue a metodologia apresentada por POORQASEMI *et al.* [13].

Para evitar a contaminação química da solução pela possível dissolução de algum material metálico da plataforma durante o experimento, tomou-se o cuidado de se utilizar materiais não metálicos em componentes da bomba que mantém contato com o eletrólito bem como as conexões utilizadas, todas ajustáveis e removidas facilmente para limpeza após os ensaios.

Todos os experimentos foram realizados em triplicata para maior confiabilidade dos resultados e realizados a temperatura ambiente ( $24 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Caracterização do fluxo de NaCl 3%

A leitura da velocidade cinemática no visor LCD do dispositivo foi dada a partir da emissão de pulsos PWM por meio de uma válvula em formato de catavento que trabalha juntamente com um ímã acoplado a sua estrutura. Cada pulso mede aproximadamente 2,25 mm e a emissão de 450 pulsos equivale a 1l. A frequência de rotação das palhetas do sensor de fluxo está associada a vazão Q do eletrólito neste instante e é dada pela Equação 1:

$$F_{\text{sensor}} (\text{Hz}) = 7,5 \cdot Q \left( \frac{\text{l}}{\text{min}} \right) \quad (1)$$

Considerando o diâmetro interno da tubulação ( $d = 0,01 \text{ m}$ ), a área da seção transversal ( $A = 7,85 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ ),  $\nu$  a viscosidade cinemática do NaCl 3% equivalente a  $0,93765 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $V$  a velocidade média do fluxo (m/s) e com os devidos tratamentos matemáticos, é possível determinar o Número de Reynolds (Re) através da Equação 2:

$$Re = \frac{0,01 V}{0,93765 \cdot 10^{-6}} \tag{2}$$

De acordo com a WHITE [1],  $Re < 2.000$  caracteriza um escoamento laminar, enquanto que  $Re > 2.400$  tipifica um escoamento turbulento. Valores intermediários, ou seja,  $2.000 < Re < 2.400$ , caracterizam um escoamento de transitório. De posse dessas informações, a Tabela 2 apresenta a caracterização dos escoamentos investigados neste trabalho:

**Tabela 2:** Detalhamento do fluxo para cada vazão investigada.

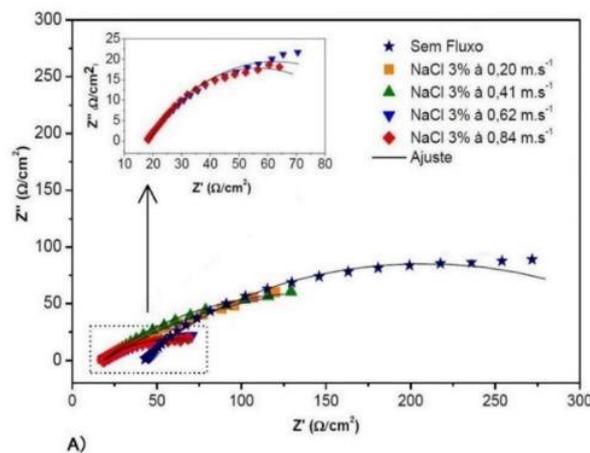
SOLUÇÃO ELETROLÍTICA	Q (L/min)	V (m.s <sup>-1</sup> )	REYNOLDS (Re)	CLASSIFICAÇÃO
NaCl 3%, pH 6,8	0,94 ± 0,047	0,20 ± 0,007	2180,34 ± 027,30	Transitório
	1,93 ± 0,096	0,41 ± 0,018	4372,63 ± 191,97	Turbulento
	2,91 ± 0,1450	0,62 ± 0,027	6583,58 ± 316,64	Turbulento
	3,97 ± 0,198	0,84 ± 0,042	8958,56 ± 447,93	Turbulento

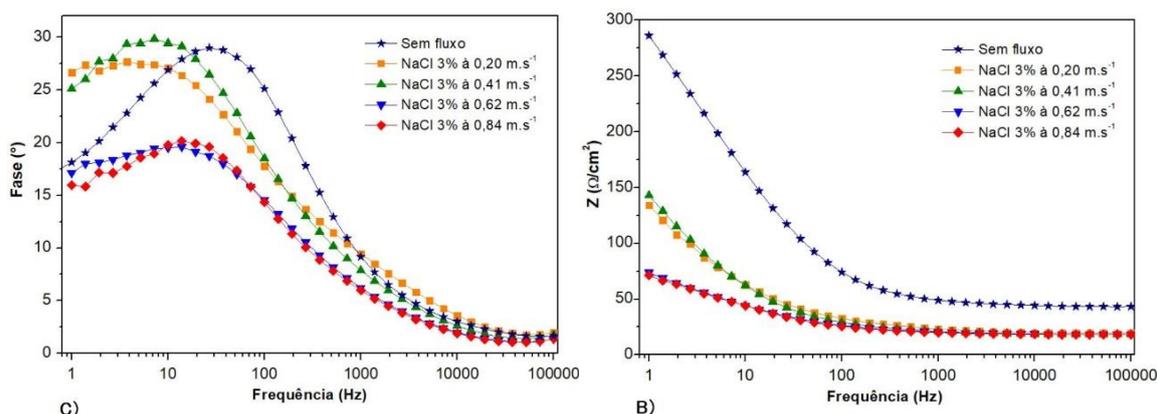
Isto significa que quando a bomba é alimentada de maneira a trabalhar com uma vazão acima de 1,5 L/min, o regime de fluxo em questão é turbulento, ou seja, nestas condições as partículas do fluido viajam num sentido aleatório, uma vez que a velocidade apresenta componentes transversais ao movimento geral do conjunto [1, 2].

### 3.2 Medidas de Impedância Eletroquímica

A Figura 5 apresenta os espectros eletroquímicos obtidos em várias velocidades do eletrólito NaCl 3%. Embora os ensaios tenham sido realizados numa mesma faixa de frequência (10<sup>5</sup> a 1 Hz), observou-se claramente a influência do fluxo do eletrólito nos valores de impedância real Z' e imaginária Z'' do sistema.

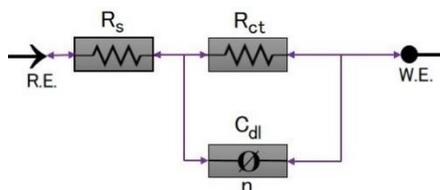
Em termos qualitativos, o arco formado pelos pontos experimentais na ausência de fluxo é maior que os demais na presença dos variados fluxos, isso é um indicativo da alta resistência à transferência de carga na condição estacionária [14]. No entanto, discussões em termos quantitativos e mais detalhados, necessitam da aplicação de um circuito elétrico equivalente que melhor simule os resultados experimentais e também apresente um pequeno desvio padrão  $\chi^2$  nos ajustes computacionais.





**Figura 5:** Resultados por Impedância Eletroquímica. A) Espectro de Nyquist, B) Bode Módulo e C) Bode Fase para as diferentes velocidades investigadas.

Os espectros de Nyquist da Figura 5A foram ajustados a um circuito RRQ, uma vez que este circuito representa as interações eletroquímicas existentes com base em estudos anteriores [15]. O circuito utilizado determina valores de resistência da solução ( $R_s$ ), resistência à transferência de carga ( $R_{ct}$ ) e a capacitância da dupla camada elétrica ( $C_{dl}$ ) acompanhada do índice  $n$  por meio do elemento CPE. A Figura 6 ilustra o circuito utilizado para realização dos ajustes computacionais.



**Figura 6:** Circuito elétrico equivalente RRQ utilizado nas simulações computacionais.

Teve-se como referência a norma ASTM SI 10 [16] que regulamenta as unidades convencionais para os ensaios de corrosão. De posse dessas informações, a Tabela 3 apresenta resultados mais detalhados mediante a aplicação do circuito RRQ nos espectros eletroquímicos.

**Tabela 3:** Parâmetros eletroquímicos obtidos através do circuito equivalente em variadas velocidades.

VELOCIDADE ( $m.s^{-1}$ )	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_{ct}$ ( $\Omega.cm^{-2}$ )	CPE		$Z$ ( $\Omega.cm^{-2}$ ), para $f = 1Hz$	$\chi^2$
			$C_{dl}$ ( $mF.cm^{-2}$ )	$n$		
Sem fluxo	42,3	330,19	0,131	0,6	285,98	0,0178
0,20	18,9	310	1,871	0,49	134,13	0,0116
0,41	18,4	249,89	0,951	0,56	142,75	0,0228
0,62	18,5	87,75	0,971	0,53	73,77	0,0104
0,84	18,2	76,46	0,743	0,55	71,21	0,0096

Observou-se que o ensaio realizado na ausência do fluxo apresenta a resistência à transferência de carga máxima de  $330,19 \Omega.cm^{-2}$ , uma vez que esta condição é menos agressiva à superfície do material em virtude da ausência dos efeitos difusivos proporcionados pela intensidade do fluxo.

Fora do estado estacionário, foi verificado que ocorreu uma redução nos valores de  $R_{ct}$  à proporção que a velocidade do eletrólito aumentou, isso está relacionado a maior difusão das espécies envolvidas nesta dinâmica, que por sua vez atingem a superfície metálica com maior intensidade. Para LÓPEZ *et al.* [17], a turbulência do fluido produz elevados gradientes de velocidade, grandes esforços de cisalhamento superficiais e com o aumento da velocidade, aumenta-se também a transferência de quantidade de movimento quando comparado a condição estacionária. O ensaio realizado a  $0,20 m.s^{-1}$  (2180,34 Reynolds) não garantiu um fluxo turbulento, mas sim um escoamento de transição. Para FERREIRA [10], nesta condição de escoamento ocorre a formação do vórtice de Taylor no espaço entre os eletrodos e a operação neste regime de escoamento não é aconselhável para estudos eletroquímicos.

A resistência de  $249,89 \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$  foi registrada no ensaio realizado com fluxo de  $0,41 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  e este valor foi reduzido para os ensaios realizados em velocidades superiores, atingindo a resistência mínima de  $76,46 \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$  quando realizado a  $0,84 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Nesta variação de velocidade, notou-se uma alteração nos valores de capacitância da dupla camada, fato atribuído a uma modificação da estrutura na dupla camada elétrica, bem como uma alteração na constante dielétrica do material [18]. Os valores de capacitância podem ser calculados com base na Equação 3 [19]:

$$C_{dl} = \left( Y_0 \frac{R_{ct}}{R_{ct}^n} \right)^{1/n} \quad (3)$$

onde  $Y_0$  representa a condutância elétrica (S),  $R_{ct}$  a resistência à transferência de carga ( $\Omega \cdot \text{cm}^{-2}$ ) e  $n$  representa o índice que mede a idealidade do elemento CPE, podendo este variar de 0 a 1.

O índice  $n$  registrou 0,6 no teste na ausência de fluxo e 0,49 na presença do escoamento transitório. Entretanto, para os ensaios na presença do fluxo turbulento este índice variou entre 0,53 e 0,56. Embora a faixa de frequência experimental ( $f$ ) seja a mesma ( $10^5 \text{ Hz} - 1 \text{ Hz}$ ) para todos os ensaios realizados, notou-se que a velocidade e as condições de escoamento também influenciaram na obtenção deste parâmetro. Vale pontuar que o ensaio realizado em condições de transição foi o que apresentou o menor índice  $n$  (0,49), o que pode estar relacionado a formação do vórtice de Taylor, que torna as abordagens e análises posteriores impróprias para esta pesquisa [10].

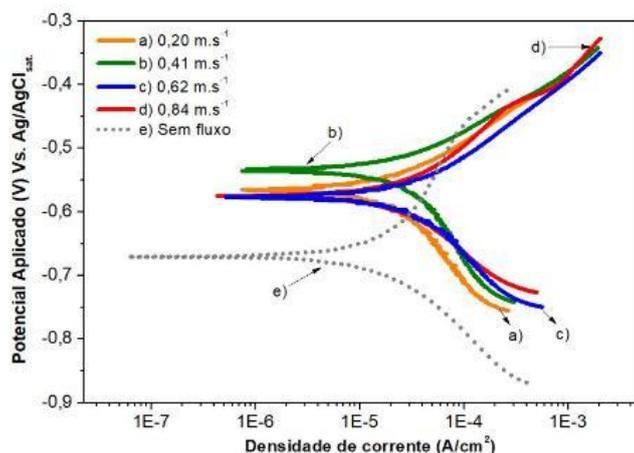
A Figura 5B apresenta o módulo da impedância em função da frequência experimental, onde  $Z = \sqrt{(Z')^2 + (Z'')^2}$  [15]. O posicionamento destas curvas corroborou com os resultados apresentados por Nyquist, pois indicam a natureza mais resistiva do sistema em velocidades menores ou até mesmo na condição estacionária, resultado novamente influenciado pela menor interação entre as espécies envolvidas e a superfície metálica ou a ausência dos efeitos difusivos proporcionados pelo fluxo, respectivamente. Essas análises corroboraram com as investigações de LÓPEZ *et al.* [17] no que tange ao efeito do aumento da velocidade do eletrólito sobre a superfície metálica.

O diagrama de Bode Fase na Figura 5C também corroborou com os resultados de Nyquist e Bode Módulo. De acordo com REHIM *et al.* [20], o ângulo de fase máximo para um sistema eletroquímico ajustado a um circuito RRQ é de  $90^\circ$  quando  $R_s = 0$ . Sendo assim, os baixos valores de fase ( $< 30^\circ$ ) encontrados podem ser justificados pelos elevados valores de  $R_s$  observados nos experimentos. Quanto ao perfil das curvas, observou-se a presença de duas constantes de tempo para todas as velocidades investigadas, sendo que a curva na ausência do fluxo se destaca por apresentar um alargamento dessa constante no intervalo entre médias e altas frequências, indicando a existência de uma condição mais resistiva do sistema se comparado as demais condições cuja constante de tempo é estreita e mais deslocada para baixas frequências [21].

O quadrado do desvio padrão ( $\chi^2$ ) representa o ajuste entre os resultados experimentais e as simulações produzidas. Os valores obtidos de  $\chi^2$  (0,0096 – 0,0104) indicaram um bom ajuste ao circuito proposto [22-25].

### 3.3 Medidas de Polarização Potenciodinâmica

As curvas experimentais obtidas por Polarização Potenciodinâmica para as variadas velocidades estão apresentadas na Figura 7. Destaca-se que a presença do fluxo deslocou as curvas para região de maiores potenciais, indicando assim uma aceleração no processo corrosivo [10].



**Figura 7:** Curvas de Polarização Potenciodinâmica para variadas velocidades investigadas.

A Tabela 4 apresenta o resultado da aplicação do Método de Extrapolação de Tafel nas curvas experimentais e possibilita uma melhor compreensão das mesmas.

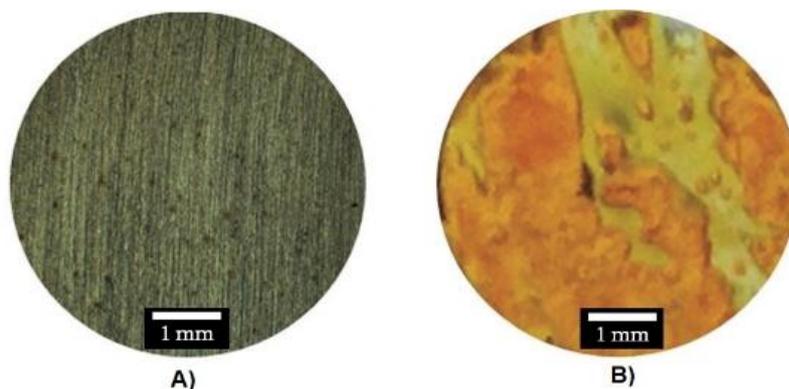
**Tabela 4:** Parâmetros eletroquímicos obtidos nos ensaios de polarização para as variadas velocidades.

VELOCIDADE (m.s <sup>-1</sup> )	E <sub>corr</sub> (mV)	j <sub>corr</sub> (μA.cm <sup>-2</sup> )	β <sub>a</sub> (mV.dec <sup>-1</sup> )	TAXA DE CORROSÃO (mm/ano)	R <sub>p</sub> (Ω)
Sem fluxo	-670,55	112,93	172,49	1,31	2140,03
0,20	-524,86	144,78	270,14	1,68	1279,90
0,41	-532,79	178,42	310,13	2,07	992,94
0,62	-575,28	217,69	213,34	2,52	989,97
0,84	-576,14	227,10	226,53	2,63	838,79

A Tabela 4 revelou como os parâmetros eletroquímicos foram alterados frente à variação controlada de velocidade do eletrólito. Notou-se uma variação nos potenciais de corrosão para valores mais nobres, bem como um aumento nas densidades de corrente. Pontualmente, a velocidade mínima (0,20 m.s<sup>-1</sup>) atingiu uma densidade de corrente de 144,78 μA.cm<sup>-2</sup> com E<sub>corr</sub> = -524,86 mV, enquanto que a velocidade máxima (0,84 m.s<sup>-1</sup>) atingiu 227,10 μA.cm<sup>-2</sup> com E<sub>corr</sub> = -576,14 mV. Com base nas investigações de FERREIRA [10], este fenômeno está associado ao efeito de um processo corrosivo mais acelerado na interface metal/eletrólito.

Observou-se que o aumento nas inclinações anódicas (β<sub>a</sub>) foram diretamente influenciadas pelo aumento na velocidade do eletrólito e sugerem uma maior dissolução de íons Fe<sup>+</sup> da amostra de aço carbono, resultado do contato agressivo e intenso dos íons cloretos na superfície metálica em virtude dos movimentos caóticos e aleatórios proporcionados pelo escoamento turbulento. Embora utilizando outra solução eletrolítica, também em diferentes velocidades, DOMINGUES [26] observou a mesma influência da velocidade na obtenção de β<sub>a</sub>.

Desta forma, o efeito do fluxo resultou em falhas na fina película instável formada na superfície metálica, ou seja, provocou uma degradação metálica acelerada tal como foi observado comparando o registro fotográfico realizado antes e após o ensaio à 0,62 m.s<sup>-1</sup>, conforme ilustra a Figura 8. Foi verificado um aspecto amarelado em grande proporção na Figura 8B, representativo dos produtos de corrosão formados nesta superfície.



**Figura 8:** Fotografias da superfície metálica do eletrodo de trabalho ABNT 1020 antes (A) e depois do ensaio (B) na presença do NaCl 3% à 0,62 m.s<sup>-1</sup>.

As explanações de FERREIRA [10] detalham que, nas reações de corrosão, os íons agressivos devem chegar até a superfície do metal por difusão molecular como resultado de um gradiente de concentração e os produtos provenientes da corrosão devem ser deslocados para longe da superfície. Nesta dinâmica, os íons de Fe<sup>+</sup> dissolvidos se deslocam para longe, efetuando um aumento na taxa de corrosão. Comparando, a fina camada instável formada em condições de fluxo é mais fina, descontínua e menos resistente do que a camada formada em condição estática [10, 27].

Comparando, o ensaio realizado na ausência do fluxo apresentou  $R_p$  máxima de 2140,03  $\Omega$ , fato que pode estar relacionado à ausência de difusão intensa na interface metal-eletrólito. Notou-se que a velocidade do eletrólito para  $V=0,41$  m.s<sup>-1</sup> reduziu a  $R_p$  em mais de 50% em comparação ao sistema na ausência de fluxo e este parâmetro foi reduzido até o valor mínimo de 838,79  $\Omega$  para  $V=0,84$  m.s<sup>-1</sup>. O ensaio realizado na velocidade máxima ( $V=0,84$  m.s<sup>-1</sup>) resultou na degradação máxima ( $TC=2,63$  mm/ano) da superfície metálica para o sistema estudado. Estes fenômenos corroboraram com as explicações anteriores e estão alinhados com as investigações de FERREIRA [10].

Os valores de resistência à polarização ( $R_p$ ) podem ser calculados através dos dados fornecidos pelo software ( $\beta_a, \beta_c$  e  $i_{corr}$ ) com auxílio da Equação 4 de Stern-Geary [15]:

$$R_p = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2,303 \cdot (\beta_a + \beta_c) \cdot i_{corr}} \quad (4)$$

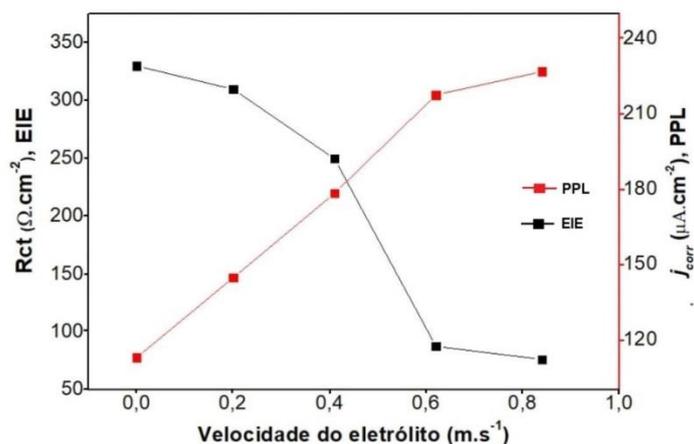
onde  $\beta_a$  (mV.dec<sup>-1</sup>) é a inclinação anódica,  $\beta_c$  (mV.dec<sup>-1</sup>) é a inclinação catódica e  $i_{corr}$  (A) é a corrente de corrosão do sistema. A taxa de corrosão (mm/ano) pode ser calculada pela Equação 5 [15]:

$$TC = 0,00327 + \frac{i_{corr} \cdot EW}{\rho} \quad (5)$$

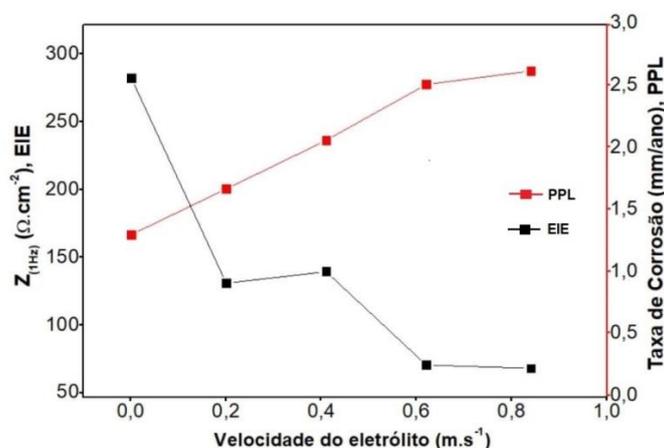
onde  $EW$  = peso equivalente do aço (g),  $\rho$  = densidade do aço (g/cm<sup>3</sup>) e 0,00327 é o fator de conversão do tempo.

### 3.3 Correlações entre as técnicas eletroquímicas

Conforme observado através das técnicas eletroquímicas, foi possível realizar um comparativo dos resultados obtidos nas condições estudadas na plataforma de testes confeccionada. Sendo assim, este tópico não tem por objetivo esgotar as discussões ou abranger todos os parâmetros envolvidos no processo, mas sim correlacionar, de forma argumentativa, os fenômenos que abordam variações que ganham destaque nas pesquisas envolvendo ensaios eletroquímicos. As Figuras 9 e 10 destacam como os resultados variaram em função da velocidade para cada técnica empregada:



**Figura 9:** Influência da velocidade do eletrólito NaCl 3% na resistência à transferência de carga e na densidade de corrente.



**Figura 10:** Influência da velocidade do eletrólito NaCl 3% no módulo da impedância à 1 Hz e na taxa de corrosão.

Nas investigações realizadas nas diferentes velocidades que garantem um fluxo turbulento (0,41, 0,62 e 0,84 m.s<sup>-1</sup> de NaCl 3%), foi verificado que nos ensaios de EIE, os valores de resistência à transferência de carga reduziram à proporção que a velocidade do eletrólito aumentava. Este também modificou a estrutura da dupla camada elétrica, conforme Tabela 3. Nos ensaios de PPL, nesta mesma faixa de velocidade, foi observado um comportamento condizente. Embora este seja um ensaio destrutivo, comparado ao ensaio de EIE, o resultado da polarização apresentou uma elevação nos valores de densidade de corrente, nas taxas de corrosão e um decréscimo nos valores de resistência à polarização em condições turbulentas, conforme Figuras 9 e 10 e Tabela 4. Em linhas gerais, a alta resistência à transferência de carga obtida no ensaio de EIE implicou numa baixa taxa de corrosão nos ensaios de PPL, este por sua vez é inversamente proporcional à resistência a polarização. Esta comparação entre as técnicas está de acordo com as abordagens de ANDRADE *et al.* [14] e DOMINGUES [26].

Dessa forma, foi demonstrado experimentalmente o mapeamento do sistema eletroquímico e o modo de resposta do mesmo às diferentes velocidades investigadas. Notou-se que a técnica de polarização e impedância corroboraram entre si, mesmo em condições turbulentas, indicando que as velocidades de 0,62 e 0,84 m.s<sup>-1</sup> foram as mais agressivas para o sistema estudado. A alta agressividade proporcionada por essas velocidades foi constatada pelos baixos valores de resistência à transferência de carga, elevadas inclinações anódicas e altas taxas de corrosão, conforme dados apresentados nas Tabelas 3 e 4.

#### 4. CONCLUSÕES

Diante das investigações realizadas, chegou-se as seguintes conclusões:

- A montagem experimental demonstrou-se eficiente nas condições testadas para fins de estudos eletroquímicos com controle de fluxo;

- As técnicas eletroquímicas de Polarização Potenciodinâmica Linear e Impedância Eletroquímica são ferramentas valiosas para o monitoramento da corrosão e corroboraram entre si, mesmo em condições turbulentas de escoamento;
- A diagramação de um circuito eletroquímico para os espectros de impedância e a aplicação do Método de Extrapolação de Tafel são ferramentas fundamentais para avaliar e poder quantificar dados que são úteis para estudos mais aprofundado em corrosão;
- Embora as técnicas apresentem parâmetros diferentes, os resultados eletroquímicos em condições turbulentas foram satisfatórios e condizentes, pois demonstraram o comportamento esperado para o aço-carbono frente aos variados fluxos investigados;
- A variação da velocidade do eletrólito provocou mudanças notáveis nos principais parâmetros de ambas as técnicas tais como: resistência à transferência de carga, capacitância da dupla camada, densidade de corrente, taxa de corrosão e resistência à polarização.

## 5. AGRADECIMENTOS

Ao PPGEM/Departamento de Mecânica e Materiais, IFMA – Campus Monte Castelo, São Luís -MA, pelo fornecimento das instalações instrumentais de laboratório. A Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão – FAPEMA pelo apoio financeiro. A Faculdade NETCOM pelo suporte técnico na construção da plataforma de testes.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] WHITE, F.M., *Mecânica dos Fluidos*, 6 ed., Porto Alegre, AMGH Editora, 2010.
- [2] BRUNETTI, F., *Mecânica dos Fluidos*, 2 ed., São Paulo, Pearson Prentice Hall, 2008.
- [3] ABREU, R.S.D.A., OLIVEIRA, R.T.D., GUIMARÃES, R.F., *et al.*, “Corrosão em tubulações de aço carbono pertencentes ao sistema STU-85 da Base Operacional Geólogo Pedro de Moura (BOGPM) - PETROBRAS/URUCU-AM: estudo de caso”, *Revista Matéria*, v. 24, n. 1, Jul. 2019.
- [4] SILVA, M.L.D., “Análise de dutos metálicos com defeitos de corrosão”, Tese de D.Sc., PGMEC/UFF, Niterói, RJ, Brasil, 2011.
- [5] PORTELLA, K.F., GARCIA, C.M., VERGES, G.R., *et al.*, “Physicochemical performance of metals and concrete structures used in electricity distribution networks: case study in Manaus region”, *Química Nova*, v. 29, n. 4, pp. 724-734, Apr. 2006.
- [6] CURY, A., SILVEIRA, D., G1-ECONOMIA, <http://g1.globo.com/economia>, acessado em Setembro de 2017.
- [7] OLVERA-MARTÍNEZ, M.E., MENDOZA-FLORES, J., GENESCA, J., “CO<sub>2</sub> corrosion control in steel pipelines. Influence of turbulent flow on the performance of corrosion inhibitors”, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 35, pp. 19-28, May. 2015.
- [8] JING, T.I.A.N., HUANG, H.L., PAN, Z.Q., *et al.*, “Effect of flow velocity on corrosion behavior of AZ91D magnesium alloy at elbow of loop system”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, v. 26, n. 11, pp. 2857-2867, Nov. 2016.
- [9] LI, Q., HU, H., CHENG, Y.F., “Corrosion of pipelines in CO<sub>2</sub>-saturated oil-water emulsion flow studied by electrochemical measurements and computational fluid dynamics modeling”, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 147, pp. 408-415, Nov. 2016.
- [10] FERREIRA, L.R.M., “Avaliação da corrosão por fluxo do aço AISI 1020 em solução de NaHCO<sub>3</sub> saturada com CO<sub>2</sub>”, Tese de M.Sc., PG-MEC/UFPR, Curitiba, PR, Brasil, 2012.
- [11] GENTIL, V., *Corrosão*, 6 ed., Rio de Janeiro, LTC - Livro Técnico e Científicos Editora SA, 2011.
- [12] ASTM G59-97. Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements. ASTM International.
- [13] POORQASEMI, E., ABOOTALEBI, O., PEIKARI, M., *et al.*, “Investigating accuracy of the Tafel extrapolation method in HCl solutions”, *Corrosion Science*, v. 51, n. 5, pp. 1043-1054, May. 2009.
- [14] ANDRADE, C., ALONSO, M.C., GONZALEZ, J.A., *et al.* Corrosion rates of steel in concrete. ASTM STP, v. 1065, p. 29, 1990.
- [15] WOLYNEC, S., *Técnicas Eletroquímicas em Corrosão*, 1 ed., São Paulo, Edusp, 2013.
- [16] ASTM SI10-16. IEEE/ASTM SI 10 American National Standard for Metric Practice. ASTM International.
- [17] LÓPEZ, D., FALLEIROS, N. A., TSCHIPTSCHIN, A. P., *et al.*, “Efeito do fluxo de eletrólito sobre a resistência à corrosão de um aço inoxidável austenítico AISI 304L”, *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 5, n. 4, p. 198-203, 2013.

- [18] PRADITYANA, A., SHAHAB, A., NOEROCHEM, L., *et al.*, “Inhibition of Corrosion of Carbon Steel in 3.5% NaCl Solution by Myrmecodia Pendans Extract”, *International Journal of Corrosion*, v. 2016, Aug. 2016.
- [19] JOKAR, M., FARAHANI, T.S., RAMEZANZADEH, B., “Electrochemical and surface characterizations of morus alba pendula leaves extract (MAPLE) as a green corrosion inhibitor for steel in 1 M HCl”, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, v. 63, pp. 436-452, Jun. 2016.
- [20] REHIM, S.S.A., HAZZAZI, O.A., AMIN, M.A., *et al.*, “On the corrosion inhibition of low carbon steel in concentrated sulphuric acid solutions. Part I: Chemical and electrochemical (AC and DC) studies”, *Corrosion Science*, v. 50, n. 8, pp. 2258-2271, Aug. 2008.
- [21] COSTA, J.G.D.R.D., SILVA, K.G.D., AMADO, F.D.R., *et al.*, “Avaliação da resistência à corrosão do filme de silanoviniltrimetoxisilano modificado com íons Ce (III) e Ce (IV) como pré-tratamento do aço carbono”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 24, n. 3, Sep. 2019.
- [22] OLASUNKANMI, L.O., OBOT, I.B., KABANDA, M.M., *et al.*, “Some quinoxalin-6-yl derivatives as corrosion inhibitors for mild steel in hydrochloric acid: experimental and theoretical studies”, *The Journal of Physical Chemistry C*, v. 119, n. 28, pp. 16004-16019, Jun. 2015.
- [23] SALEHIFAR, N., SHAYEH, J.S., SIADAT, S.O.R., *et al.*, “Electrochemical study of supercapacitor performance of polypyrrole ternary nanocomposite electrode by fast Fourier transform continuous cyclic voltammetry”, *RSC Advances*, v. 5, n. 116, pp. 96130-96137, Oct. 2015.
- [24] ROY, P., MAJI, T., DEY, S., *et al.*, “Adsorption behaviour of gluten hydrolysate on mild steel in 1 M HCl and its role as a green corrosion inhibitor”, *RSC Advances*, v. 5, n. 75, pp. 61170-61178, Jul. 2015.
- [25] ALKHATHLAN, H.Z., KHAN, M., ABDULLAH, M.M.S., *et al.*, “Anticorrosive assay-guided isolation of active phytoconstituents from Anthemis pseudocotula extracts and a detailed study of their effects on the corrosion of mild steel in acidic media”, *RSC Advances*, v. 5, n. 67, pp. 54283-54292, Jun. 2015.
- [26] DOMINGUES, H.C.N., “Estudo do comportamento eletroquímico do aço carbono, em meio de bicarbonato de sódio e gás carbônico, utilizando a técnica do ruído eletroquímico”, Tese de M.Sc., PG-MEC/UFPR, Curitiba, PR, Brasil, 2011.
- [27] OCHOA, D.M.L., “Estudo do desgaste erosivo-corrosivo de aços inoxidáveis de alto nitrogênio em meio lamacento”, Tese de D.Sc., DEMM/Poli-USP, São Paulo, SP, Brasil, 2007.

#### ORCID

Jhonatan Peres de Sousa	<a href="https://orcid.org/0000-0003-3047-6870">https://orcid.org/0000-0003-3047-6870</a>
Jose Marcos Soares do Nascimento	<a href="https://orcid.org/0000-0002-3607-5325">https://orcid.org/0000-0002-3607-5325</a>
Carmem Célia Francisco do Nascimento	<a href="https://orcid.org/0000-0002-3918-0366">https://orcid.org/0000-0002-3918-0366</a>
José Carlos Silva Rocha Junior	<a href="https://orcid.org/0000-0002-7315-5439">https://orcid.org/0000-0002-7315-5439</a>
Maria Eliziane Pires de Souza	<a href="https://orcid.org/0000-0002-9184-3921">https://orcid.org/0000-0002-9184-3921</a>
Ferdinando Marco Rodrigues Borges	<a href="https://orcid.org/0000-0002-0382-4254">https://orcid.org/0000-0002-0382-4254</a>
Gedeon Silva Reis	<a href="https://orcid.org/0000-0002-2117-2990">https://orcid.org/0000-0002-2117-2990</a>