

Avaliação do casquilho de guaraná como inibidor de corrosão em aço carbono aplicando o método de Taguchi no ensaio de perda de massa

Evaluation of guaraná leaves as an inhibitor of corrosion in carbon steel applying Taguchi method in weight loss test

Antonio dos Reis de Faria Neto¹ - Univ. Estadual Paulista - Fac. de Eng. de Guaratinguetá - Dep. de Materiais e Tecnologia
Amanda Pires Nogueira de Souza² - Univ. Tecnológica Federal do Paraná - Campus Curitiba - Dep. de Mecânica
Cristina Sayuri Fukugauchi³ - Instituto Federal de Educação - Ciência e Tecnologia de São Paulo - Campus São José dos Campos - Departamento de Mecânica
Marcelo dos Santos Pereira⁴ - Univ. Estadual Paulista - Fac. de Eng. de Guaratinguetá - Dep. de Materiais e Tecnologia

RESUMO

O interesse no estudo da corrosão não envolve apenas o campo científico, mas também o campo econômico e ambiental. Nesta situação os inibidores de corrosão à base de extratos vegetais surgem como novas alternativas por serem de fontes renováveis e baixo custo. Em vista disso, a proposta deste trabalho é realizar, com auxílio do Método de Taguchi e Análise da Variância, a avaliação da influência das variáveis e suas interações envolvidas no processo de corrosão através do ensaio de perda de massa utilizando como inibidor vegetal o casquilho de guaraná. Para tanto, foi selecionado o arranjo ortogonal L16 e os fatores analisados em dois níveis: Inibidor vegetal, temperatura, meio ácido, tempo de imersão, e material. A variável resposta dos experimentos realizados foi a perda de massa das amostras. Com os resultados obtidos conclui-se que o casquilho de guaraná tem grande potencial pra utilização como inibidor de corrosão vegetal. Através da avaliação da resposta obtido no Método de Taguchi, verificou-se também que o fator mais significativo do processo de corrosão em ensaio gravimétrico é o meio ácido seguido da temperatura do meio e não há interação entre os fatores.

Palavras-chave: Corrosão. Método de Taguchi. Inibidor Vegetal.

ABSTRACT

The interest in the study of corrosion is present not only in the scientific field, but also in the economic and environmental fields. In this situation, green corrosion inhibitors emerge as new alternatives because they are renewable and cheap. In view of this, the purpose of this work is to evaluate the influence of the variables and their interactions involved in the corrosion process by weight loss test using guaraná sleeves as a green inhibitor. To help in this endeavor, the Taguchi Method and Analysis of Variance were used. For this work, the orthogonal array L16 was selected and the factors were analyzed at two levels: Presence of the green corrosion inhibitor, temperature, acid medium, test time and material. The variable of response of the experiments performed was the loss of mass of the samples. With the results obtained it was concluded that the guaraná sleeves have great potential for use as green corrosion inhibitors. By assessing the response obtained in the Taguchi method, it has also been found that the most significant factor in the corrosion process in weight loss test is the acid media, followed by temperature of environment; there is no interaction between the factors.

Keywords: Corrosion. Green Inhibitor. Taguchi Method.

1. Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Pedregulho, Guaratinguetá-SP, 12.516-410, antonio.fariant@gmail.com; 2. amandapiresn17@gmail.com; 3. cristinafukugauchi@ifsp.edu.br; 4. marcelop@feg.unesp.br

NETO, A. R. F.; SOUZA, A. P. N.; FUKUGAUCHI, C. S.; PEREIRA, M. S. Avaliação do casquilho de guaraná como inibidor de corrosão em aço carbono aplicando o método de Taguchi no ensaio de perda de massa. **GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, Bauru, Ano 15, nº 1, jan-mar/2019, p. 77-94.

DOI: 10.15675/gepros.v14i1.2064

1. INTRODUÇÃO

O conceito de corrosão já é bem difundido na comunidade científica e segundo Chiaverini (1982) pode ser definido como a deterioração de um material química, bioquímica ou eletroquimicamente – quando há geração de corrente elétrica – por ação do ambiente na qual este material está exposto. Os custos associados à corrosão são enormes, consumindo mais de 5% do produto interno bruto de um país de acordo com os estudos de Gerhardus et al. (2002). A diminuição das reservas naturais de minério é causada pela necessidade de substituição de materiais devido, entre outras causas, à deterioração pela corrosão, estima-se que um quinto da produção mundial de aço é destinado a repor perdas causadas pela corrosão (RUST; RESINAR, 2011).

Em vista disso, para diminuir ou evitar a corrosão é necessário buscar métodos que sejam econômicas, tecnológica e ambientalmente viáveis. Atualmente, o uso de inibidores de corrosão representa o método mais utilizado no combate a este fenômeno. De acordo com Felipe et al. (2013) os inibidores de corrosão atenuam ou evitam a reação do metal com o meio, diminuindo a taxa de corrosão principalmente por: adsorção de íons/moléculas na superfície do metal, diminuição ou aumento da reação anódica e/ou catódica, diminuição da taxa de difusão dos reagentes até a superfície do metal e diminuição da resistência elétrica da superfície metálica.

Desta forma os inibidores de corrosão à base de vegetais surgem como alternativa promitente por serem de fontes renováveis, biodegradáveis, baixo custo e por não conterem metais pesados (FELIPE et al., 2013). Neste contexto está inserido o guaraná, que possui em sua composição química, segundo Basile et al. (2005), substâncias como: alcaloides tipo metilxantinas, como cafeína, teofilina e teobromina, além de taninos, ácido gálico, catequinas, entre outros compostos em menor concentração (ROCHETE, 2015). Além de ser um excelente estimulante devido à presença de cafeína, pesquisas recentes (ROCHETE, 2015) revelaram outras características encontradas no fruto como a atividade antioxidante que pode ser interessante na aplicação do guaraná como inibidor de corrosão vegetal.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O Método de Taguchi é um projeto robusto que se baseia em três procedimentos utilizados na avaliação do processo ou produto (VIANA, 2012; TAGUCHI; CHOWDHURY; WU, 2005; FUKUGAUCHI, 2016):

- Razão Sinal Ruído – Estuda os efeitos dos fatores de controle;
- Arranjo Ortogonal – Verifica a reprodutibilidade dos fatores de controle;
- Função Perda – Estima a economia, monetária, resultante da melhoria da qualidade.

Segundo Fukugauchi (2016) o termo projeto robusto significa insensível as variações, principalmente, de ruído, ou seja, fatores incontrolláveis. Seu objetivo é determinar as combinações dos parâmetros produto/processo que reduzem essa variabilidade.

Inibidor é uma substância ou mistura de substâncias que, em baixas concentrações e em meios agressivos previnem ou minimizam a corrosão (OBOT; OBI-EGBEDI; UMOREN, 2009). Entre os inibidores, os compostos orgânicos possuem boa eficiência devido às estruturas heteroatômicas como o enxofre, nitrogênio e oxigênio (ZAFERANI et al., 2013). O interesse científico no estudo de compostos orgânicos se fundamenta no poder anticorrosivo destes elementos e por eles não oferecerem risco ao meio ambiente. Em meio a esses inibidores, os compostos orgânicos que atuam por adsorção na superfície do metal, podem-se destacar o ácido ascórbico, ácido succínico, triptamina, cafeína e substâncias de origem natural como extratos de folhas, flores, sementes e frutas (YARO; KHADOM; WAEL, 2013).

Na literatura vem crescendo o número de trabalhos que estudam esses produtos aplicados ao combate da corrosão. Odewunmi et al.(2015) apresentaram os rejeitos da melancia (semente, casca e pele) com eficiências de inibição de 85,96%, 83,35% e 79,35%, respectivamente, utilizando aço carbono SAE 1020 em 1 mol.L⁻¹ de HCl. Mourya et al. (2014) estudaram a eficiência de inibição (96,1%) e os mecanismo de adsorção do cravo de defunto em aço carbono SAE 1020 em 0,5 mol.L⁻¹ de H₂SO₄. Ramanda Singh et al. (2015) utilizaram o extrato da casca de lichia para determinar a eficiência de inibição de corrosão (97,8%) frente ao aço carbono SAE 1020 em 0,5 mol.L⁻¹ de H₂SO₄.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1. Objeto de estudo

O casquilho de guaraná foi utilizado como inibidor vegetal e testado juntamente com outros quatro fatores em dois níveis, Tabela 1, para avaliação da influência sobre a taxa de corrosão - variável resposta - em ensaio de perda de massa. Esses fatores foram escolhidos devido a grande influência na taxa de corrosão dos materiais segundo a bibliografia.

- Inibidor: Utilizou-se o casquilho de guaraná em pó solubilizado nas soluções ácidas para verificar a sua eficiência como inibidor de corrosão;
- Temperatura: O aumento da temperatura, geralmente, tende ao aumento da taxa de corrosão e em inibidores vegetais a temperatura pode atuar como agente de degradação do composto;
- Meio ácido: Foram utilizados o HCl 1,0 molar e H₂SO₄ 0,5 molar com intuito de avaliar o inibidor em meios que promovem diferentes tipos de corrosão ao aço carbono: HCl – Corrosão localizada. H₂SO₄ – Corrosão uniforme. Para as duas soluções foi usado um volume de 50 ml de ácido;
- Tempo: A dissolução do ferro no meio pode ser um fator que diminui a taxa de corrosão, embora o aumento do tempo também possa degradar o inibidor diminuindo sua eficiência;
- Material: Com objetivo de estudar o efeito da porcentagem de carbono na corrosão e no processo de inibição.

Tabela 1 – Fatores e níveis analisados pelo Método de Taguchi.

Fator	Descrição	Nível baixo (1)	Nível Alto (2)
A	Inibidor	Não	Sim
B	Temperatura	25°C	50°C
C	Meio ácido	HCl 1,0 M	H ₂ SO ₄ 0,5 M
D	Tempo	4 horas	24 horas
E	Material	1010	1045

Fonte: Os autores.

A composição química dos aços utilizados nesta pesquisa é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição química dos corpos de prova de aço.

Material	C	Mn	Si	P	S	Cr	Al	Ni
Aço 1010	0,130	0,700	0,214	0,019	0,010	0,020	0,015	0,009
Aço 1045	0,440	0,800	0,230	0,010	0,002	0,350	-	-

Fonte: Os autores.

Nessa avaliação foi utilizado o Método de Taguchi para determinar a melhor combinação de fatores e interações que influenciam no comportamento da variável resposta e a Análise da Variância como análise complementar ao Método de Taguchi na interpretação dos resultados.

3.2. Procedimentos de coleta de dados

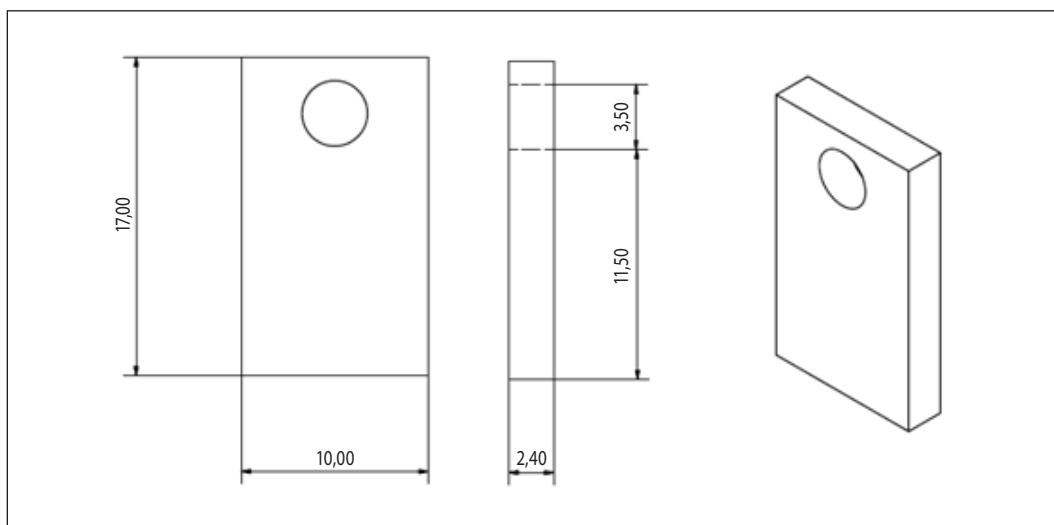
O inibidor utilizado neste trabalho é preparado a partir do casquilho de guaraná (*Paullinia cupana*) fornecido por agricultores da região de Maués – AM (Latitude 03°22'54"S e Longitude 57°42'54"W) localizada a margem direita do rio Maués – Açu à distância de 268 km, em linha reta, de Manaus. A preparação da solução com inibidor é feita de forma direta, o inibidor é solubilizado no meio ácido sem ser extraído utilizando solventes conforme as etapas descritas abaixo:

- O casquilho é mantido na estufa a 60 °C durante 24 horas para secagem e combate a microorganismos;
- Pulverização do casquilho de guaraná. Esta etapa tem por finalidade melhorar a solubilidade do casquilho nas soluções de HCl e H₂SO₄;
- Pesagem da quantidade de pó de casquilho de Guaraná. Neste trabalho utilizou-se uma concentração de 20 g/L, estabelecida em pré-análise como concentração de maior eficiência em ensaio de perda de massa;
- Utilizando um agitador magnético com aquecimento, mistura-se a solução ácida (clorídrica e sulfúrica) e o casquilho de guaraná em pó por 45 minutos. A temperatura de aquecimento é aumentada gradualmente até atingir 95 °C ao final do processo;
- A solução é filtrada utilizando-se uma bomba a vácuo.

Os testes de perda de massa seguiram os procedimentos normatizados pela NBR 6210 (2011) de preparo dos corpos de prova, remoção dos produtos de corrosão e determinação da massa final e da taxa de corrosão.

Os corpos de provas para o ensaio de perda de massa foram seccionados utilizando-se serra de fita vertical automática. A Figura 1 mostra o desenho do corpo de prova utilizado e sua respectiva dimensão em milímetros.

Figura 1 – Corpo de prova utilizado no ensaio de perda de massa.

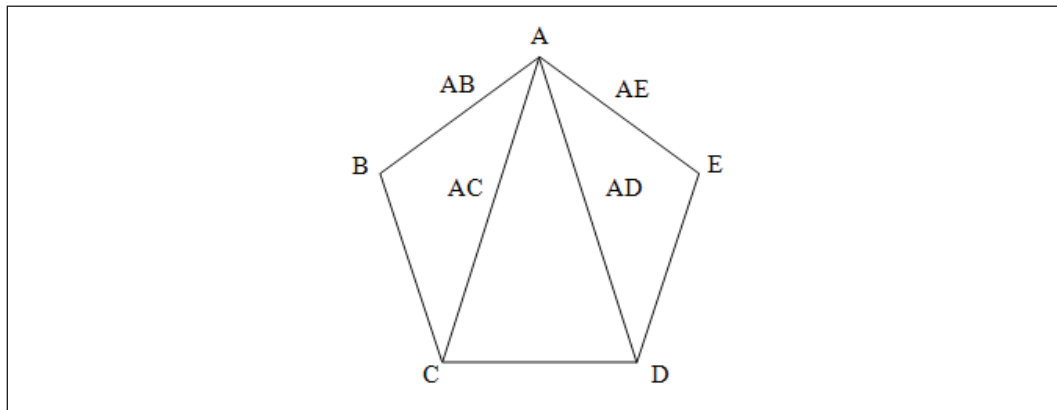


Fonte: Os autores.

Os corpos de prova cortados foram lixados na seguinte sequência granulométrica: 100, 220, 320, 400 e 600 *mesh*. Após esse procedimento os corpos de provas foram lavados, escovados e desengraxados com detergente. Posteriormente os mesmos foram deixados em banho ultrassônico em solução alcoólica por cinco minutos para finalizar a limpeza. Após a limpeza, procedeu-se a caracterização das amostras pesando-as. Esse processo foi realizado em balança analítica com resolução de 100 mg. A medida foi realizada em triplicata e a média dos valores é considerada a massa inicial do corpo de prova (m_i).

No ensaio de perda de massa para avaliação do inibidor variando os fatores de acordo com a Tabela 1 foi escolhido o Arranjo Ortogonal L_{16} por contemplar não só as cinco variáveis controláveis, mas também interações entre o inibidor e as demais variáveis. O Arranjo Ortogonal utilizado neste trabalho é mostrado na Tabela 3 e as interações na Figura 2. Para se tomar como exemplo, no experimento 1, a amostra de aço 1010 foi imersa em solução de HCl 1,0 M sem a presença de inibidor, a 25°C por 4 horas.

Figura 2 – Interações das variáveis.



Fonte: Os autores.

Tabela 3 – Arranjo Ortogonal L_{16} .

Experimento	A	B	C	D	E
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2
3	1	1	2	1	2
4	1	1	2	2	1
5	1	2	1	1	2
6	1	2	1	2	1
7	1	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2
9	2	1	1	1	2
10	2	1	1	2	1
11	2	1	2	1	1
12	2	1	2	2	2
13	2	2	1	1	1
14	2	2	1	2	2
15	2	2	2	1	2
16	2	2	2	2	1

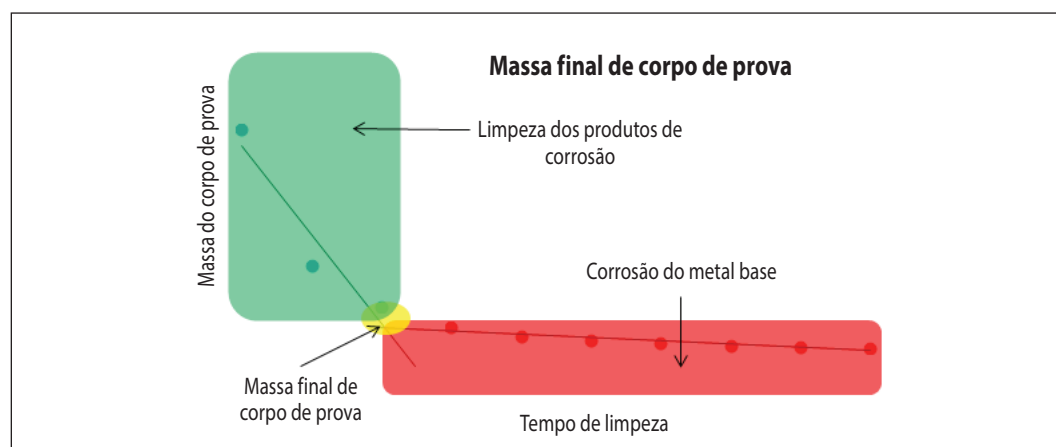
Fonte: Os autores.

Após o ensaio gravimétrico, o corpo de prova é pesado obtendo a massa inicial após ensaio, m_0 . A retirada do produto de corrosão dos corpos de prova foi realizada utilizando-se uma solução de limpeza (HCl P.A, hexametileno de tetramina e água destilada) conforme norma NBR 6210 (2011). A seguir é descrito a sequência para limpeza dos corpos de prova:

- Imersão do corpo de prova na solução de limpeza. Quantidade de 10 ml por cm^2 de área de corpo de prova;
- Lavagem em água;
- Escovamento para retirada do produto de corrosão;
- Lavagem em água;
- Imersão em acetona;
- Secagem da amostra;
- Pesagem da amostra.

A massa final, m_f , do corpo de prova foi obtida através do gráfico Remoção dos produtos de corrosão x Ataque ao metal base, conforme Figura 3.

Figura 3 – Gráfico para determinação da massa final dos corpos de prova de ensaio de perda de massa.



Fonte: Adaptado de NBR 6210 (2011).

Os tempos de imersão para limpeza estão representados na Tabela 4 abaixo.

Tabela 4 - Tempos de limpeza.

Tempo de limpeza por ciclo [s]	Tempo de limpeza acumulado [s]	Massa do corpo de prova [g]
t0 = 0	0	m ₀
t1 = 20	20	m ₁
t2 = 20	40	m ₂
t3 = 20	60	m ₃
t4 = 60	120	m ₄
t5 = 60	180	m ₅
t6 = 60	240	m ₆
t7 = 60	300	m ₇
t8 = 300	600	m ₈
t9 = 300	900	m ₉

Fonte: Os autores.

3.3. Procedimentos de análise de dados

Determinada a massa final do corpo de prova conforme procedimento já descrito, pode-se determinar a taxa de corrosão através da Equação 1:

$$r_{\text{corr}} = \frac{k \times w}{A \times t \times d} \quad (1)$$

Onde:

r_{corr} – Taxa de corrosão;

k – Constante para obter r_{corr} na unidade desejada, $k = 8,76 \times 10^4$ para mm/ano;

w – Perda de massa em gramas, $m_i - m_f$;

A – Área do corpo de prova em cm^2 ;

t – Tempo de duração do ensaio de perda de massa em horas;

d – Densidade do corpo de prova, aço carbono igual a $7,87 \text{ kg/m}^3$.

4. RESULTADOS

Após realizar os experimentos do Arranjo Ortogonal de Taguchi L_{16} , obteve-se as medianas da taxa de corrosão em milímetros por ano para cada experimento e o desvio padrão como mostrado na Tabela 5.

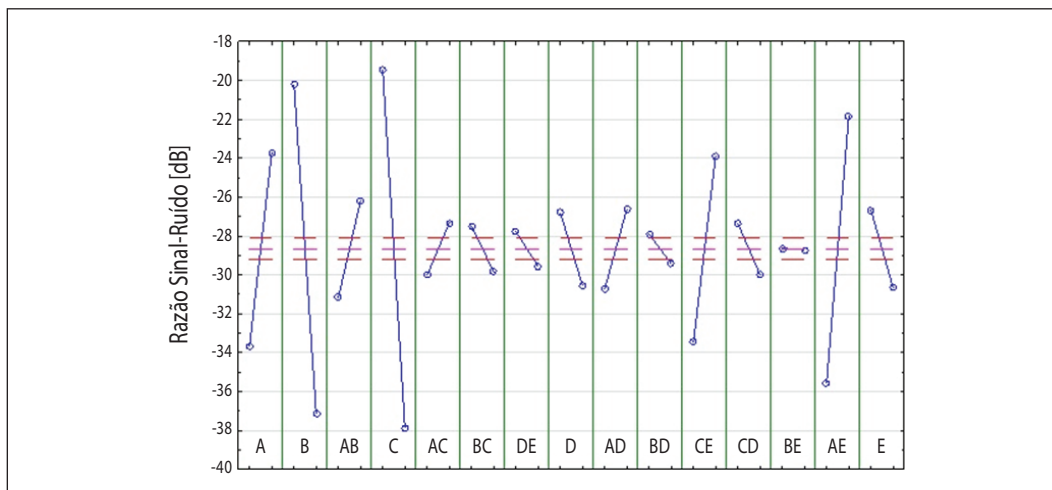
Tabela 5 – Taxa de corrosão obtida com o Arranjo Ortogonal de Taguchi L_{16} .

Exp	Inibidor	Temperatura	Ácido	Tempo	Material SAE	Taxa de Corrosão [mm/ano]	Desvio Padrão [mm/ano]
1	Não	25°C	HCl	4 h	1020	18,9	0,95
2	Não	25°C	HCl	24 h	1045	3,19	0,00
3	Não	25°C	H ₂ SO ₄	4 h	1045	82,49	2,45
4	Não	25°C	H ₂ SO ₄	24 h	1020	69,84	4,31
5	Não	50°C	HCl	4 h	1045	15,49	1,34
6	Não	50°C	HCl	24 h	1020	156,43	8,82
7	Não	50°C	H ₂ SO ₄	4 h	1020	244,1	7,3
8	Não	50°C	H ₂ SO ₄	24 h	1045	141,28	10,13
9	Sim	25°C	HCl	4 h	1045	1,01	0,01
10	Sim	25°C	HCl	24 h	1020	1,57	0,15
11	Sim	25°C	H ₂ SO ₄	4 h	1020	2,12	0,02
12	Sim	25°C	H ₂ SO ₄	24 h	1045	107,81	1,54
13	Sim	50°C	HCl	4 h	1020	6,29	0,85
14	Sim	50°C	HCl	24 h	1045	43,96	2,87
15	Sim	50°C	H ₂ SO ₄	4 h	1045	679,78	40,03
16	Sim	50°C	H ₂ SO ₄	24 h	1020	45,32	2,67

Fonte: Os autores.

O resultado obtido, com nível de confiança de 95%, mostra que todos os fatores, exceto interação Temperatura X Material (BE), são significativos neste ensaio de corrosão utilizando o inibidor de casquilho de guaraná, como pode ser visto no Gráfico dos efeitos dos fatores na relação Sinal – Ruído da Figura 4 e na Tabela 6, onde SQ é a soma dos quadrados, GL Graus de Liberdade, MQ a média quadrática, SQ' a soma pura dos quadrados e $(1-p) \times 100\%$ é a probabilidade de significância.

Figura 4 – Gráfico dos efeitos dos fatores na relação Sinal-Ruído – Utilizando Função Menor é Melhor.



Fonte: Os autores.

Tabela 6 – Análise da variância em relação à média das medianas da taxa de corrosão.

Fator	Denominação	SQ	GL	MQ	Teste F	SQ'	(1-p) x 100%
A	Inibidor	790,84	1	790,84	1338,14	790,84	100,00
B	Temperatura	2276,78	1	2276,78	3852,44	2276,78	100,00
AB	Inib X Temp	197,60	1	197,60	334,35	197,60	100,00
C	Ácido	2699,01	1	2699,01	4566,89	2699,01	100,00
AC	Inib X Ácido	58,06	1	58,06	98,23	58,06	100,00
BC	Temp X Ácido	43,98	1	43,98	74,41	43,98	100,00
DE	Tempo X Mat	25,54	1	25,54	43,21	25,54	100,00
D	Tempo	110,57	1	110,57	187,09	110,57	100,00
AD	Inib X Tempo	135,27	1	135,27	228,88	135,27	100,00
BD	Temp X Tempo	18,66	1	18,66	31,57	18,66	100,00
CE	Ácido X Mat	735,64	1	735,64	1244,74	735,64	100,00
CD	Ácido X Tempo	55,07	1	55,07	93,19	55,07	100,00
BE	Temp X Mat	0,07	1	0,07	0,12	0,07	27,05
AE	Inib X Mat	1504,20	1	1504,20	2545,19	1504,20	100,00
E	Material	127,70	1	127,70	216,07	127,70	100,00
Resíduo/Erro		9,46	16	0,59			

Fonte: Os autores.

Calculou-se também a porcentagem de contribuição de cada fator para análise de qual possui a maior contribuição na variação da taxa de corrosão no ensaio de perda de massa. A Tabela 7 mostra a porcentagem de contribuição de cada fator.

Tabela 7 – Porcentagem de Contribuição dos Fatores.

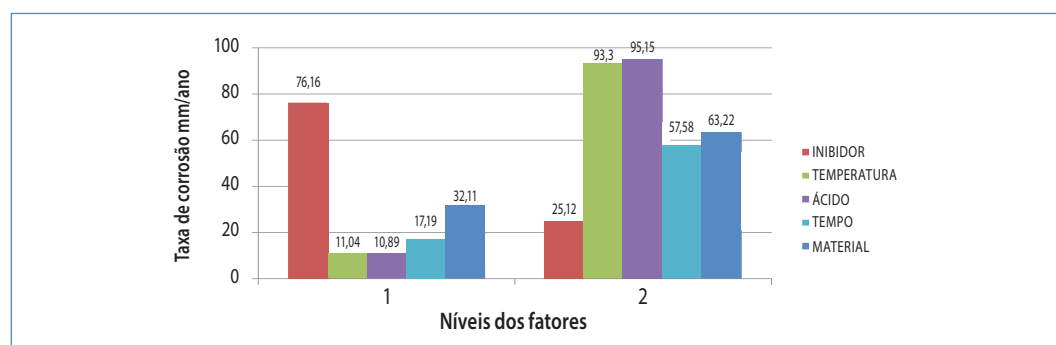
Porcentagem de Contribuição %														
A	B	AB	C	AC	BC	DE	D	AD	BD	CE	CD	BE	AE	E
9,0	25,9	2,2	30,7	0,7	0,5	0,3	1,3	1,5	0,2	8,5	0,6	0,1	17,1	1,4

Fonte: Os autores.

5. DISCUSSÕES

É possível observar na Tabela 5 que os resultados obtidos de taxa de corrosão variam muito conforme se varia os fatores. Esta variação da taxa de corrosão indica que os fatores escolhidos para o experimento são relevantes na corrosão dos corpos de prova por ensaio de perda de massa. Para quantificar e garantir que esses fatores influem no processo realizou-se análise estatística utilizando a Análise da Variância - ANOVA – com auxílio do *software* STATISTICA. Com os resultados da Tabela 7 observa-se que os fatores mais significativos na inibição de corrosão, utilizando-se ensaio gravimétrico, são o tipo de ácido (Fator C), temperatura (Fator B), inibidor (Fator A), interação inibidor x material (Fator AE) e interação ácido x material (Fator CE). O Gráfico da Figura 5 mostra os efeitos dos fatores sobre a média das medianas da taxa de corrosão dos cinco fatores analisados: Inibidor, temperatura, ácido, tempo e material.

Figura 5 - Gráfico dos efeitos dos fatores sobre a média das medianas na taxa de corrosão.



Fonte: Os autores.

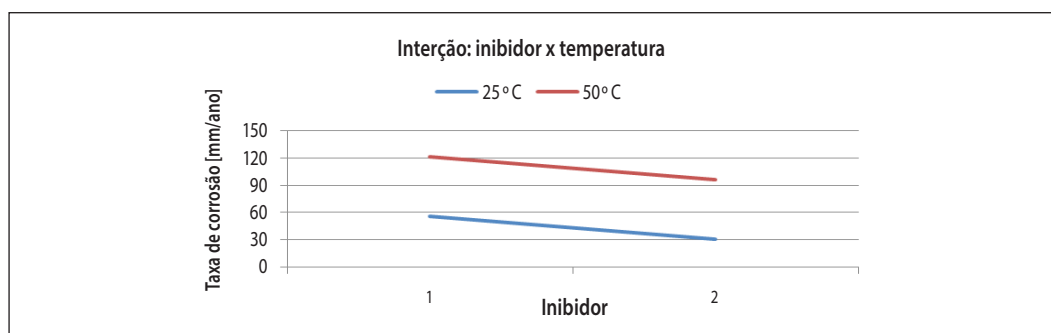
Este gráfico – Efeito dos fatores sobre a média das medianas na taxa de corrosão – fornece uma visão global de como os fatores se comportam no ensaio analisado. Para uma análise mais detalhada de cada fator, foi discutido em particular cada variável.

- **Inibidor:** A taxa de corrosão decresce de 76,16 mm/ano, nível 1 (sem inibidor), para 25,12 mm/ano, nível 2 (com inibidor), uma diminuição de 33% na taxa de corrosão, como pode ser visto no Gráfico da Figura 5. Esse resultado mostra que o inibidor de casquilho de guaraná tem potencial para ser aplicado como inibidor de corrosão de aço carbono em meios de ácido HCl e H₂SO₄.
- **Temperatura:** Quando aumentada de 25°C para 50°C eleva a taxa de corrosão de 11,04 mm/ano para 93,3 mm/ano conforme gráfico da Figura 5. De uma maneira geral, segundo Fontana (1987) e Roberge (2008) o aumento da temperatura eleva, em praticamente todas as reações químicas, a taxa de reação. Este aumento da taxa de corrosão em meio de HCl e H₂SO₄ é observado também nos estudos de Khadon et al. (2009) e Hussein et al. (2016), respectivamente. Mesmo com a presença de inibidor vegetal espera-se o aumento da taxa de corrosão com o aumento da temperatura, pois muitas pesquisas em que compostos vegetais são utilizados como inibidores de corrosão relatam que o aumento da temperatura diminui a eficiência do inibidor vegetal tanto pelo aumento da reação de corrosão quanto pela degradação e desorção dos compostos orgânicos da superfície do metal, pode-se citar os trabalhos de Chandrabhan Verma et al. (2015), De Barros et al. (2015), Ansari et al. (2015), Muthukrishan et al. (2015), Priyanka Singh et al. (2015) onde esse fenômeno é percebido.
- **Meio Ácido:** Quando se altera o meio ácido na qual o ensaio é realizado e o inibidor é extraído, altera-se a taxa de corrosão de 10,89 mm/ano utilizando HCl para 95,15 mm/ano utilizando H₂SO₄ conforme Figura 5. Em geral, a taxa de corrosão do aço carbono em ácido sulfúrico é maior do que aço carbono em ácido clorídrico em ensaios de perda de massa. Os trabalhos de Behpour et al. (2016), Deng e Li (2012), Li et al. (2012) e Deng et al. (2011) demonstram essa tendência de maior taxa de corrosão em H₂SO₄, além de uma maior eficiência do inibidor utilizado em meio de HCl. Uma explicação para a inibição ser menos eficiente em H₂SO₄ é que a adsorção do inibidor pode depender da natureza dos ânions, e a inibição da corrosão em meio de HCl, utilizando inibidores vegetais, tende a ser maior, pois os íons Cl⁻ têm maior tendência a adsorver na superfície exposta do metal do que os íons SO₄²⁻ (PANOSSIAN, 2012).

- Tempo: A taxa de corrosão aumenta quando se aumenta o tempo do ensaio de imersão. Para 4 horas a taxa de corrosão é de 17,19 mm/ano e para 24 horas 57,58 mm/ano. Figura 5. Analisando o experimento sem a presença de inibidor, o aumento da taxa de corrosão com aumento do tempo de duração do ensaio de perda de massa em meio ácido parece ser habitual nos estudos de inibidores e corrosão em aço carbono. O comportamento do inibidor em relação ao tempo varia de acordo com o inibidor utilizado, neste trabalho o inibidor vegetal de casquilho de guaraná não foi eficiente com o tempo maior de ensaio.
- Material: A taxa de corrosão, utilizando-se o aço carbono SAE 1010, é de 32,11 mm/ano. Ao se alterar o material para SAE 1045, a taxa de corrosão aumenta para 63,22 mm/ano. Figura 5. O aço carbono em contato com meio ácido acarreta, de forma rápida, a oxidação do metal, segundo a reação anódica: $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ e evolução de hidrogênio de acordo com a reação catódica: $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$ (GENTIL, 2007). A corrosão de aço carbono em ácidos diluídos é extremamente dependente da composição química do material, em especial a quantidade de carbono presente em sua microestrutura (MUTHUKRISHAN et al., 2015). A reação anódica, oxidação do ferro, ocorre na fase ferrítica enquanto a reação catódica, evolução de hidrogênio na cementita, carboneto de ferro (ANGELI; FÜREDER; KNEISS, 2006). À medida que se aumenta a quantidade de carbono nestes aços, aumenta a fração volumétrica de perlita, com isso forma-se uma maior quantidade de micropilhas galvânicas devido a diferença de potencial entre estas fases. Segundo Angeli et al. (2006) a cementita possui potencial de +75,3 mV em relação a ferrita. Isso pode explicar o aumento da taxa de corrosão em aços com maior quantidade de carbono presente em sua microestrutura.

A Figura 6 mostra o gráfico da interação Inibidor X Temperatura (AB). A primeira observação a se fazer é que as retas são paralelas entre si, ou seja, a combinação entre os fatores não age de forma contrária as tendências gerais da variação da taxa de corrosão, o que indica que não há um efeito de interação entre os fatores - o efeito do fator inibidor (Fator A) não se altera à medida que se altera os níveis do fator temperatura (Fator B) e dos outros fatores não mostrados aqui. Outra observação é que as retas paralelas possuem inclinação negativa, indicando que a presença inibidor de fato produziu uma diminuição na taxa de corrosão.

Figura 6 – Gráfico de interação Inibidor x Temperatura.



Fonte: Os autores.

A reta superior, vermelha, está em descendência, da esquerda para a direita, significando que quando a temperatura é de 50°C a taxa de corrosão diminui quando se utiliza inibidor de casquilho de guaraná no ensaio gravimétrico. A reta azul, inferior, encerra o mesmo comportamento, mesmo variando a temperatura ocorre diminuição da taxa de corrosão, isso reforça a significância do fator inibidor.

Ao se analisar o comportamento das retas uma em relação à outra, observa-se um considerável distanciamento entre elas, mostrando que a variação da taxa de corrosão é maior quanto utiliza-se temperatura de 50°C, reta superior, do que quando se utiliza temperatura de 25°C, sugerindo que o fator temperatura também é significativo.

O mesmo comportamento – a não interação entre os fatores – se observa nas curvas de interação Inibidor X Ácido (AC), Inibidor X Tempo (AD) e Inibidor X Material (AE) não mostrados aqui.

6. CONCLUSÃO

O inibidor vegetal de casquilho de guaraná mostrou-se um potencial composto para aplicação em meio de HCl e H₂SO₄ como inibidor de corrosão.

No processo de corrosão, todos os fatores mostraram significativos, demonstrando esse ser um processo complexo e depende de várias variáveis. O meio ácido e a temperatura foram os fatores mais influentes. Apesar de serem significativos os fatores não possuem interação entre si.

REFERÊNCIAS

- ANGELI, J.; FÜREDER, E; KNEISS, A. C. Etching Techniques for Characterizing the Phases of Low-Alloy Dual-Phase and TRIP Steels. **Practical Metallography**, v. 43, n. 4, p. 127-142, 2006.
- ANSARI, K. R.; QURAIISHI, M.A. Experimental and quantum chemical evaluation of Schiff bases of isantín as a new and Green corrosion inhibitors for mild steel in 20% H₂SO₄. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 54, p. 145-154, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT – NBR 6210: Corrosão atmosférica - Materiais metálicos - Preparo, limpeza e determinação da taxa de corrosão de corpos-de-prova em ensaios de corrosão**. 2008.
- BASILE, A.; FERRARA, L.; DEL PEZZO, M.; MELE, G.; SORBO, S.; BASSI, P.; MONTESANO, D. Antibacterial and antioxidant activities of ethanol extract from *Paullinia cupana* Mart. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 102, n. 1, p. 32–36, 2005.
- BEHPOUR, M.; GHOREISHI, S.M.; KHAYATKASHANI, M.; SOLTANI, N. Green approach to corrosion inhibition of mild steel in two acidic solutions by the extract of *Punica granatum* peel and main constituents. **Materials Chemistry and Physics**, p. 164-173, 2016.
- CHIAVERINI, V. **Aço e Ferros Fundidos**. São Paulo: ABM–Associação Brasileira de Metais, 1982.
- DE BARROS, I. B.; MOSCOSO, H. Z. L.; CUSTODIO, D. L.; VEIGA JUNIOR, V. F.; BASTOS, I. N. Casca Preciosa (*Aniba canelilla*) como inibidor de corrosão do aço carbono. **Revista Virtual de Química**, n. 6, 2015.
- DENG, S.; LI, X. Inhibition by Ginkgo leaves extract of the corrosion of steel in HCl and H₂SO₄ solutions. **Corrosion Science**, v. 55, p. 407–415, 2012.
- DENG, S.; LI, X.; FU, H. Alizarin violet 3B as a novel corrosion inhibitor for steel in HCl, H₂SO₄ solutions. **Corrosion Science**, v. 53, p. 3596–3602, 2011.
- FELIPE, M. B. M. C.; MACIEL, M. A. M.; MEDEIROS, S. R. B.; SILVA, D. R. Aspectos Gerais Sobre Corrosão e Inibidores Vegetais. **Química Nova**, v. 5, n. 4, 2013.
- FONTANA, M. G.; **Corrosion Engineering**. 3 ed. New York: McGraw-Hill: 1987.

FUKUGAUCHI, C. S. **Caracterização microestrutural de aços avançados de alta resistência**. 2016. 69f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, SP, 2015.

GENTIL, V. **Corrosão**. 6. ed. LTC, 2007.

GERHARDUS, H. K.; MICHIEL, P. H. B.; THOMPSON, N. G. **Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States**. Nace International. Houston. 2002. Disponível em: <<https://www.nace.org/Publications/Cost-of-Corrosion-Study/>>. Acesso em 09 jun. de 2016.

HUSSEIN, S. S.; AI, N. A.; HASAN, B. O. Corrosion of Carbon Steel in Flowing Sulfuric Acid. **International Journal of Current Engineering and Technology**, v. 6, n. 1, 2016.

KHADOM, A. A.; YARO, A. S.; KADUM, A. A. H.; ALTAIE, A. S.; MUSA, A. Y. The Effect of Temperature and Acid Concentration on Corrosion of Low Carbon Steel in Hydrochloric Acid Media. **American Journal of Applied Sciences**, v. 6, n. 7, p. 1403-1409, 2009.

LI, X.; DENG, S.; FU, H. Inhibition of the corrosion of steel in HCl, H₂SO₄ solutions by bamboo leaf extract. **Corrosion Science**, v. 62, p. 163–175, 2012.

MOURYA, P.; BANERJEE, S.; SINGH, M. M. M. Corrosion inhibition of mild steel in acidic solution by *Tagetes erecta* (Marigold flower) extract as a green inhibitor. **Corrosion Science**, v. 85, p. 352–363, 2014.

MUTHUKRISHNAN, P.; PRAKASH, P.; JEYAPRABHA, B.; SHANKAR, K. Stigmasterol extracted from *Ficus hispida* leaves as a green inhibitor for the mild steel corrosion in 1 M HCl solution. **Arabian Journal of Chemistry**, 2015. In Press.

OBOT, I. B. B.; OBI-EGBEDI, N. O. O.; UMOREN, S. A. A. Antifungal drugs as corrosion inhibitors for aluminium in 0.1 M HCl. **Corrosion Science**, v. 51, n. 8, p. 1868–1875, 2009.

ODEWUNMI, N. A.; UMOREN, S. A.; GASEM, Z. M. Watermelon waste products as green corrosion inhibitors for mild steel in HCl solution. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 3, n. 1, p. 286–296, 2015.

PANOSSIAN, Z.; ALMEIDA, N. L.; SOUSA, R. M. F.; PIMENTA, G. S.; MARQUES, L. B. S. Corrosion of carbon steel pipes and tanks by concentrated sulfuric acid: A review. **Corrosion Science**, v. 58, p. 1-11, 2012.

RAMANANDA SINGH, M.; GUPTA, P.; GUPTA, K. The litchi (Litchi Chinnensis) peels extract as a potential green inhibitor in prevention of corrosion of mild steel in 0.5 M H₂SO₄ solution. **Arabian Journal of Chemistry**, 2015. In Press.

ROBERGUE, P. R. **Corrosion Engineering – Principles and Practice**. McGraw-Hill: 2008.

ROCHETE, A. L. **Caracterização dos efeitos antitumorais do guaraná sobre modelo murino de células tronco cancerosas**. 2015. 137f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, São Paulo: USP, 2015.

RUST, R. **Corrosão causa grandes perdas em todo o mundo**. 2011. Disponível em: <<http://www.rust.com.br/noticias/corrosao-causa-grandes-perdas-em-todo-o-mundo>>. Acesso em 07 jun. de 2016.

SINGH, P.; SRIVASTAVA, V.; QURAIISHI, M.A. Novel quinoline derivatives as green corrosion inhibitors for mild steel in acidic medium: Electrochemical, SEM, AFM, and XPS studies. **Journal of Molecular Liquids** **216**, p. 164–173. 2016.

TAGUCHI, G.; CHOWDHURY, S.; WU, Y. **Taguchi's Quality Engineering Handbook**. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005.

VERMA, C.; SINGH, P.; QURAIISHI, M. A. A thermodynamical, electrochemical and surface investigation of Bis (indolyl) methanes as Green corrosion inhibitors for mild steel in 1 M hydrochloric acid solution. **Journal of the Association of Arab Universities of Basic and Applied Sciences**, v. 21, p. 24-30, 2015.

VIANA, D. J. **Aplicação do Método de Taguchi para redução de porosidade de peças fundidas sob pressão**. 2012. 68f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Taubaté, Taubaté, SP, 2012.

YARO, A. S.; KHADOM, A. A.; WAEL, R. K. Apricot juice as green corrosion inhibitor of mild steel in phosphoric acid. **Alexandria Engineering Journal**, v. 52, n. 1, p. 129–135, 2013.

ZAFERANI, S. H.; SHARIFI, M.; ZAAREI, D.; SHISHESAZ, M. R. Application of eco-friendly products as corrosion inhibitors for metals in acid pickling processes – A review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 1, n. 4, p. 652-657, 2013.