

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA

MAIARA CURSINO PEREIRA

**AVALIAÇÃO E SELEÇÃO DE MATERIAL PARA COMPONENTE
ESTRUTURAL DA DESPALETIZADORA PARA ENVASE DE CERVEJA**

LORENA
2021

MAIARA CURSINO PEREIRA

**AVALIAÇÃO E SELEÇÃO DE MATERIAL PARA COMPONENTE
ESTRUTURAL DA DESPALETIZADORA PARA ENVASE DE CERVEJA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia de
Lorena – Universidade de São Paulo para
conclusão de Graduação do curso de
Engenharia de Materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Ismenia
Sodero Toledo Faria

Versão Original

LORENA
2021

Dedico este trabalho à minha família, meu pai Ariosto, minha mãe Walkyria e minha irmã Tatiana que não mediram esforços para me apoiar, me dando força e amor para que eu seguisse em frente aos desafios me superando frente a eles.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à meus pais e minha irmã que me apoiaram e me suportaram em cada decisão e desafio enfrentado até agora. Tenho convicção de que sem eles, eu não seria o ser humano que sou hoje, conquistando meus sonhos e criando novos caminhos. Minha família é meu exemplo de determinação e superação, eles são meus exemplos de vida.

Agradeço a todos os docentes e funcionários da EEL - USP que acreditaram em mim e tiveram toda a paciência e dedicação em me fazer crescer durante essa caminhada. Principalmente à professora Maria Ismênia Sodero Toledo Faria e ao professor Sebastião Ribeiro. Ainda a professora Maria Ismênia Sodero Toledo Faria, agradeço por ter aceitado ser minha orientadora durante o TCC, obrigada pela paciência, disponibilidade e dedicação. Aos técnicos do Departamento de Engenharia de Materiais, obrigada. Ao doutorando Julio Cesar e a mestrandona Raisa Rodrigues pelo auxílio para a realização deste trabalho, estando sempre dispostos a ajudar. Ao mestrando Danilo Abreu pelo suporte tanto durante o TCC quanto durante a graduação.

À empresa onde estagiei, pela oportunidade e pelos materiais disponibilizados para que o trabalho pudesse ser realizado. Além da confiança depositada em mim no período em que estive lá. Um agradecimento especial ao Thiago Cleyton e ao Leonardo Ramiro que não mediram esforços para que eu tivesse em mãos tudo que fosse necessário para realização deste trabalho.

Aos meus amigos de São Carlos, Sara Kelade e Herisson Oliveira por acreditarem no meu potencial e me apoiarem. Às minhas amigas de infância por me suportarem nessa longa caminhada, amigas, essa etapa está finalizando, obrigada! Agradeço principalmente à Kelmi Takino e Annelise Sakurai. Vocês foram minha base em Lorena e essa graduação não teria sido a mesma sem a amizade de vocês. Ganhei duas grandes amigas pra vida. Agradeço também ao Rafael Hummel, que entrou na minha vida em 2021, e fez de um ano que seria dos mais desafiadores, ficar mais leve. À Empresa Júnior EEL Júnior, por abrir meus olhos para a profissional que eu quero me tornar e aos valores que prezo. O crescimento proporcionado pelos projetos e as amizades feitas serão inesquecíveis. Amanda Vianna, Camilla Nogueira e Alex Crivelaro, obrigada.

A todos que estiveram comigo nessa longa jornada, muito obrigada, e contém comigo.

“Tente mover o mundo - o primeiro passo
será mover a si mesmo”

Platão

RESUMO

PEREIRA, M. Avaliação e seleção de material para componente estrutural da despaletizadora para envase de cerveja, 2021. 43 p. Monografia para defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Materiais – Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, Lorena, 2021.

Em uma linha de envase de garrafas de vidro retornáveis de cerveja de 300mL de volume, uma das máquinas existentes é a despaletizadora. Ela é responsável por retirar as caixas de cerveja do palete e colocar na linha de produção de forma unitária. Dentre os componentes da máquina, há a mesa elevatória que contém barras de metalon (aço carbono). Devido as condições de trabalho da despaletizadora, as barras de metalon (amostra do presente trabalho) tem em média uma vida útil de 5 a 7 anos, sofrendo corrosão generalizada. Visando melhorar a segurança do trabalho, a qualidade da despaletização, a performance da máquina e a vida útil do componente, o trabalho avaliou as possíveis causas que levavam à falha do componente estrutural da despaletizadora, bem como a ação do meio corrosivo sobre o material e propos uma substituição por um material de melhor resistência à corrosão para esta aplicação. Para a seleção de um material a ser utilizado como estrutura, mais adequado às condições de trabalho da máquina, realizou-se ensaio eletroquímico com eletrólito de NaCl 3,5%p, eletrodo de referência de calamelano saturado e contra eletrodo de folha de platina. Além disso, obteve-se micro e macrografias da amostra comprovando a corrosão generalizada da amostra. Os resultados obtidos no trabalho e a pesquisa de outros aços na literatura, permitiram concluir que o metalon não é o material mais indicado para esta aplicação, devido as condições de trabalho encontradas na máquina. A tinta usada como proteção pelo fabricante também não é a mais eficiente. Uma possibilidade do agravamento da corrosão pode ser devido o líquido parado entre a proteção polímerica e o metal em si. E por fim, o material que melhor substituiria o metalon em sua função estrutural de acordo com o esse estudo seria o AISI 304, devido suas características compostionais e também o acesso mais facilitado no mercado ao comparar com outros aços inox.

Palavras-chave: Aço Metalon, AISI 304, Corrosão, Despaletizadora.

ABSTRACT

PEREIRA, M. Avaliação e seleção de material para componente estrutural da despaletizadora para envase de cerveja, 2021. 43 p. Monografia para defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Materiais – Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, Lorena, 2021.

In a filling line for returnable glass beer bottles of 300mL volume, one of the existing machines is the depalletizer. She is responsible for removing the beer crates from the pallet and placing them on the production line as a unit. Among the components of the machine, there is the lifting table that contains metalon (carbon steel) bars. Due to the working conditions of the depalletizer, the metalon bars (sample of the present work) have an average useful life of 5 to 7 years, suffering generalized corrosion. Aiming to improve work safety, depalletization quality, machine performance and component life, the work evaluated the possible causes that led to the failure of the depalletizer's structural component, as well as the action of the corrosive environment on the material and proposed a replacement for a material with better corrosion resistance for this application. For the selection of a material to be used as a structure, more suitable for the working conditions of the machine, an electrochemical test was carried out with an electrolyte of NaCl 3.5% p, saturated calamel reference electrode and platinum foil counter electrode. In addition, micro and macrographs of the sample were obtained, proving the generalized corrosion of the sample. The results obtained in the work and the research of other steels in the literature, allowed us to conclude that metalon is not the most suitable material for this application, due to the working conditions found in the machine. The paint used as protection by the manufacturer is also not the most efficient. A possibility of aggravation of corrosion could be due to the liquid stopped between the polymeric protection and the metal itself. And finally, the material that would best replace metalon in its structural function according to this study would be AISI 304, due to its compositional characteristics and also easier access to the market when compared to other stainless steels.

Keywords: Metalon steel, AISI 304, Corrosion, Depalletizer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processo para a realização de envase em garrafas de vidros retornáveis.	14
Figura 2: Componentes de uma despaletizadora.	15
Figura 3: Estrutura metálica da mesa elevatória nova, não corroída (a) e Estrutura metálica da mesa elevatória corroída durante a substituição da mesma (b).	15
Figura 4: Principais formas de corrosão.	21
Figura 5: Modelo de ensaio potenciômetro.	22
Figura 6: Variação com o tempo do potencial de corrosão de aço inoxidável austenítico AISI 304 em solução 5 % HNO ₃ . Curva 1: corpo-de-prova lixado e exposto à atmosfera por 1,5 horas; curva 2: idem, por 170 horas; curva 3: corpo-de-prova passivado e exposto atmosfera por 1,5 horas s; curva 2: idem, por 170 horas; curva 3: corpo-de-prova passivado e exposto à atmosfera por 170 horas.	23
Figura 7: Variação do potencial de corrosão do zinco em função do tempo na solução saturada de hidróxido de cálcio.	23
Figura 8: Curvas teóricas ilustrando o método de extração de Tafel.	25
Figura 9: Relação do potencial com densidade de corrente, incluindo processos anódicos e catódicos para o aço carbono em água gaseificada (a) sem Na ₂ SiO ₃ , (b) com 0,0014 m Na ₂ SiO ₃ e (c) com 0,008 m Na ₂ SiO ₃ .	26
Figura 10: Comparação entre uma curva experimental e curva ajustada para Mg AZ31 revestido com polímero exposto a 0,5 M NaCl.	27
Figura 11: Redução da taxa de corrosão em um aço em função da adição de Cromo em um meio industrial.	29
Figura 12: (a) Esmeril de bancada com escova de aço circular. (b) Peça antes do lixamento. (c) Peça após os lixamentos.	32
Figura 13: Amostra de aço AISI 304 antes do preparo.	32
Figura 14: (a) Esquema utilizado no ensaio. (b) Contra eletrodo de platina e eletrodo de referência calamelano saturado. (c) Esquema com balde.	33
Figura 15: Imagens realizadas pelo Microscópio Zeiss AXIO Image M2m.(a) Micrografia da amostra corroída. (b) Macrografia da amostra corroída.	34
Figura 16: Gráfico de Potencial de Corrosão em circuito aberto obtido no ensaio.	35
Figura 17: Gráfico de Potencial de Corrosão obtido no ensaio.	36

Figura 18: Gráfico do Módulo de Impedância e Ângulo de Fase da amostra metalon e da amostra do aço AISI 304..... 38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de aço e suas propriedades estimadas de acordo com o teor de carbono em peso	19
Tabela 2: Impedâncias dos elementos do circuito equivalente.....	27
Tabela 3: Valores do potencial de corrosão das amostras.....	36
Tabela 4: Valores da densidade de corrente de corrosão das amostras.....	37
Tabela 5: Comparação entre o metalon e o aço AISI 304.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Ampere (unidade de medida)
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	Instituto Americano do Ferro e do Aço
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais
C	Capacitor
CE	Contra eletrodo
cm ²	Centímetros quadrados (unidade de medida)
CPE	Elemento de fase constante
Cr	Cromo
Cr – Ni	Sistema Cromo - Níquel
d.C.	Depois de Cristo
DCX	Desencaixotadora
Demar	Departamento de Engenharia de Materiais
DPL	Despaletizadora
E	Potencial
E _{appl}	Potencial aplicado
ECS	Soluções da Engenharia de Corrosão
Ecorr	Potencial de corrosão
ENCA	Encaixotadora
ER	Eletrodo de referência
ET	Eletrodo de trabalho
h	Horas (unidade de medida)
HNO ₃	Ácido nítrico
Hz	Hertz (unidade de medida)
i _{corr}	Corrente de corrosão
kHz	Kilo Hertz (unidade de medida)
L	Indutor
M	Molar (unidade de medida)
m	Metros (unidade de medida)
mA	Micro Ampere (unidade de medida)
mHz	Micro Hertz (unidade de medida)

mm	Milímetro (unidade de medida)
MPa	MegaPascal (unidade de medida)
mV	Micro Volts (unidade de medida)
NaCl	Cloreto de sódio
Na ₂ SiO ₃	Silicato de sódio
NBR	Norma Brasileira
P.A.	Substâncias padrões Para Análise
PAL	Paletizadora
PZ	Pasteurizador
R	Resistência
s	Segundos (unidade de medida)
SAE	Sociedade dos Engenheiros Automotivos
t	Tempo
UIP	Inspetor eletrônico de garrafas
V	Volts (unidade de medida)
W	Impedância de Wasburg
Z	Impedância
Ω	Ohm (unidade de medida)
θ	Theta – ângulo de fase
Δi	Variação da corrente
% p.	Porcentagem em peso

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVO	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1. DESPALETIZADORAS	18
3.2. AÇO CARBONO	18
3.3. CORROSÃO	20
3.3.1. Definição	20
3.3.2. Principais ensaios de corrosão	21
3.4. AÇOS RESISTENTES À CORROSÃO	28
4. MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.1. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	32
4.2. IMAGENS MICROSCÓPIO	33
4.3. ENSAIO ELETROQUÍMICO	33
5. RESULTADOS	34
5.1. IMAGENS MICROSCÓPIO	34
5.2. POTENCIAL DE CORROSÃO	34
5.3. MÓDULO DE IMPEDÂNCIA	37
5.4. ANÁLISE FINANCEIRA	38
6. CONCLUSÃO	40
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Automatizado
da Escola de Engenharia de Lorena,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Pereira, Maiara

Avaliação e seleção de material para componente estrutural da despaletizadora para envase de cerveja

/ Maiara Pereira; orientadora Maria Ismenia Faria.
Lorena, 2021.

45 p.

Monografia apresentada como requisito parcial para a conclusão de Graduação do Curso de Engenharia de Materiais - Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo. 2021

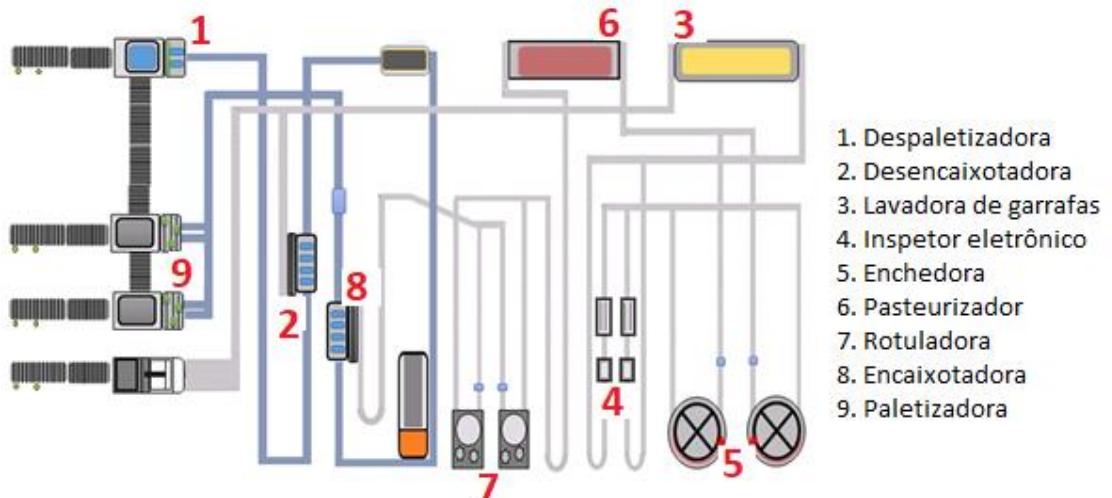
1. Aço metalon. 2. Aisi 304. 3. Corrosão. 4. despaletizadora. I. Título. II. Faria, Maria Ismenia, orient.

1. INTRODUÇÃO

Uma grande companhia produtora de cerveja possui três modelos de embalagem do produto, sendo elas: as latas, as garrafas de vidro descartáveis e as garrafas de vidro retornáveis. As garrafas retornáveis de vidro são aquelas entregues/trocadas pelo consumidor vazias por uma nova cheia. As linhas de envase entre os três modelos de embalagens são diferentes. Para as latas não há rotulagem e as esteiras transportadoras contêm uma proteção extra para que não se amasse as latas. Já as garrafas de vidro descartáveis e retornáveis são muito similares, com exceção ao processo de lavagem da garrafa que se diferencia. As garrafas de vidro retornáveis contêm uma etapa de lavagem extra em relação as descartáveis.

As caixas de cerveja chegam paletizadas para serem inseridas na linha de envase. De acordo com a Figura 1, a Despaletizadora (identificado por 1) inicialmente individualiza as caixas de cerveja. Depois disso, as caixas são levadas para a Desencaixotadora (identificado por 2), onde as garrafas são desencaixotadas, ou seja, são retiradas de dentro das caixas. Deste ponto em diante, as garrafas são direcionadas para a Lavadora de garrafas (identificado 3), onde são higienizadas. Posteriormente, na etapa de Inspeção Eletrônica de Garrafas as garrafas são inspecionadas e classificadas como aptas para o processo de enchimento ou não. As garrafas aptas para o enchimento são direcionadas à Enchedora (identificado por 5), onde são envasadas com chopp e arrolhadas (tampadas). De lá, as garrafas são direcionadas ao Pasteurizador (identificado por 6), onde passam pelo processo de pasteurização, transformando então o chopp em cerveja, prolongando, portanto, o período de validade do produto. Posteriormente, as garrafas são rotuladas nas Rotuladoras (identificado por 7) e encaixotadas na Encaixotadora (identificado por 8). Por fim, as caixas são paletizadas pela Paletizadora (identificado por 9), estando prontas para serem distribuídas para os Centros de Distribuição e Vendas.

Figura 1: Processo para a realização de envase em garrafas de vidros retornáveis.

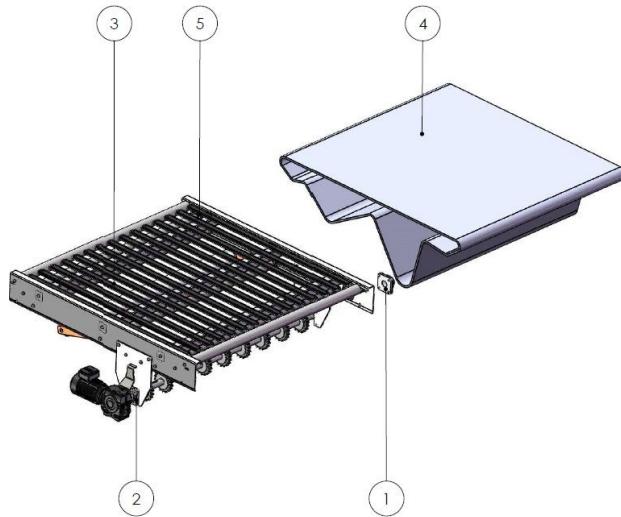


Fonte: Arquivo pessoal.

A primeira máquina da linha, a Despaletizadora (1), tem a função de despaletizar as caixas que vêm do mercado com garrafas trocadas. Ou seja, deixar as caixas de forma unitária na linha de produção, para que possam ser retiradas as garrafas posteriormente e seguir o fluxo da linha de envase. As caixas vindas do mercado contêm garrafas teoricamente vazias, porém as condições de armazenamento dessas caixas em alguns locais não são as ideais. As garrafas ao chegarem na linha de produção, podem conter algum tipo de fluido dentro, como água, uréia, outras bebidas, e as vezes, além de fluido, areia.

Estruturalmente a despaletizadora contém ganchos que retiram as caixas dos paletes. De acordo com a Figura 2, a despaletizadora possui uma mesa elevatória com esteira (identificado por 4). Por debaixo desta esteira, há uma estrutura de metal (identificado por 5), com uma proteção polimérica (identificado por 3).

Figura 2: Componentes de uma despaletizadora.



Fonte: Manual Despaletizadora – Sanmartin.

Como abordado anteriormente, algumas garrafas podem chegar com fluidos e impurezas dentro. Quando isso ocorre, o líquido pode entrar em contato com a máquina. Além disso, alguns paletes chegam para a linha com má formação, ou seja, com lacunas de caixas ou até mesmo caixas mal encaixadas umas nas outras. Quando a máquina despaletiza paletes imperfeitos (mal formados), o gancho não consegue segurar as caixas de forma correta, havendo queda das caixas, quebra das garrafas e contato do fluido com a máquina. Dentro de um intervalo de operação de aproximadamente 7 anos, a parte metálica, que inicialmente é representada pela Figura 3a, passa a ficar completamente corroída, como exibido na Figura 3b, necessitando substituição da mesma.

Figura 3: Estrutura metálica da mesa elevatória nova, não corroída (a) e Estrutura metálica da mesa elevatória corroída durante a substituição da mesma (b).



Fonte: Arquivo pessoal.

A proposta deste trabalho envolveu diversos desafios que englobam engenharia, ciência dos materiais, propriedades mecânicas dos materiais, técnicas de análises químicas e conhecimentos sobre degradação de uma forma bastante aplicada. O estudo realizado envolve desafios diretamente ligados à produção ao selecionar um material mais resistente à corrosão do que o atual. Com o objetivo de selecionar um material com maior resistência à corrosão, foram feitos ensaios eletroquímicos no aço carbono metalon e no aço AISI 304. Concluiu-se que a melhor opção para as condições de trabalho em questão, é o AISI 304, sendo mais resistente à corrosão.

A realização do Trabalho de Conclusão de Curso permitiu validar conhecimentos aprendidos durante a graduação, adquirir novos e colocar o conhecimento em prática em uma grande empresa. Todo o aprendizado, tanto técnico quanto gerencial adquirido no decorrer da execução deste trabalho foi de grande relevância, pessoal e profissional.

2. OBJETIVO

O presente trabalho possui a finalidade de identificar as possíveis causas que levam à falha de um dos componentes estrutural da despelatizadora: a grelha. Também, este trabalho propõe a busca por uma alternativa de material com melhor resistência à corrosão para esta aplicação estrutural, de modo a aumentar a vida útil do componente.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Despaletizadoras

A despaletização é o posicionamento ou retirada de embalagens de um determinado palete. Muitas tecnologias são desenvolvidas no mundo da logística para facilitar e otimizar as etapas de movimentação de cargas. O uso de robôs na paletização é um dos importantes elementos dessa evolução. Assim como na logística, essa tecnologia foi incluída nas linhas de produção, no “fim de linha”, onde a matéria prima chega e após o processo, quando o produto é entregue à logística. (Honeywell, 2021)

A automatização está muito presente na maioria das empresas, porém grande parte ainda utilizam sistemas manuais de despaletização e paletização. A robotização influencia de maneira positiva o processo, pois diminui significativamente o desgaste dos profissionais, evitando lesões e outros incidentes, a máquina aguenta maior tempo de atividade, maior velocidade, e retorno sobre o investimento. (Honeywell, 2021)

A estrutura mais comum entre as despaletizadora e paletizadora é o aço carbono (barras estruturais de metalon). Essas barras podem ser galvanizadas ou não. É importante a verificação de acordo com as normas:

- NBR 6591: Destinado para fins estruturais, define os parâmetros necessários para os tubos com costura. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008);
- NBR 8261: Possui a mesma finalidade da norma 6591. Destinado para tubos estruturais, sejam eles quadrados, retangulares ou redondos. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019)

Metalon é a forma popular de se referenciar ao aço carbono muito utilizado em estruturas industriais e de máquinas. Uma característica do metalon é sua durabilidade. Comparado com outros materiais, como o alumínio por exemplo, sua vida útil é de aproximadamente 10 anos, além de ter um custo menor em relação a compra e manutenção. (Honeywell, 2021)

3.2. Aço carbono

Até o ano de 1400 d.C, o ferro era encontrado na forma de ferro forjado ou ferro fundido. Ele tinha alto teor de carbono, era duro, com alto ponto de fusão e quebradiço. Apesar dessas características, o ferro fundido ainda é amplamente usado em aplicações que demandam baixo choque térmico ou mecânico. Há grandes probabilidades do aço ter

nascido pelo aquecimento do ferro em um fogo de carvão, que assim, tem um conteúdo menor de carbono que o ferro fundido, apresentando uma maior resistência a corrosão. Devido a essa característica, entre outras, o aço carbono é conhecido por sua alta utilização na área industrial, como apresentado na Tabela 1. Assim, o aço é uma liga de ferro com 2% ou menos de carbono em sua composição. Ele é produzido a partir do ferro gusa no processo de oxigênio básico e tem propriedades que são modificadas pela adição de outros metais. (Atkins, 2012)

Tabela 1: Tipos de aço e suas propriedades estimadas de acordo com o teor de carbono em peso.

Tipo de aço	Conteúdo de carbono (%)	Propriedades e aplicações
Aço de baixo teor de carbono	<0,15	Ductibilidade e baixa dureza, arame de ferro
Aço de moderado teor de carbono	0,15 a 0,25	Cabos, pregos, grades e ferraduras
Aço de médio teor de carbono	0,20 a 0,60	Pregos, vigas, trilhos e componentes estruturais
Aço de alto teor de carbono	0,61 a 1,5	Facas, navalhas, ferramentas de corte e brocas

Fonte: Atkins, 2012

As diferentes formulações dos aços apresentam diferentes graus de dureza, resistência à tensão e ductilidade. Quanto maior for o teor de carbono, mais duro e quebradiço tende a ser o aço. Em relação a corrosão, a adição de outros elementos em sua microestrutura (como Cr por exemplo) pode vir a aumentar significativamente a resistência à corrosão. Os aços inoxidáveis apresentam boa resistência à corrosão devido a camada fina de óxido de cromo que se forma na superfície do aço e protege o substrato da oxidação posterior. (Atkins, 2012).

Há diversas formas e normas de classificação dos aços, no Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, junto das normas NBR 6006, classifica os aços-carbono e os de baixo teor em liga segundo os critérios adotados pela AISI e SAE. Ou seja, é considerado a composição química dos aços. Um aço 1023 significa que tem 0,23% de aço em média na sua composição. (Chiaverini, 2012).

Aços estruturais são utilizados como materiais de construção, que combinam resistência mecânica, trabalhabilidade, disponibilidade e baixo custo. Podendo ser estruturas fixas como edifícios e pontes, ou móveis, como na indústria ferroviária, automobilística, naval e aeronáutica. Podem ser classificados como aços carbono e aços

de alta resistência e baixo teor em liga. Os aços carbono têm uma resistência razoável à corrosão, que só é alcançada com adição de pequenos teores de cobre (0,25% de cobre já é o suficiente), melhorando a resistência em até duas vezes. O efeito é mais acentuado pelo aumento simultâneo do teor de fósforo. Já os aços de alta resistência e baixo teor em ligas tem característica de resistência à corrosão atmosférica. (Chiaverini, 2012).

O aço que apresenta melhor resistência à corrosão atmosférica segundo Chiaverinir é o A847 (ASTM). Este aço possui alta resistência mecânica, baixa liga para tubos conformados a frio e soldados e/ou sem costura com resistência à corrosão atmosférica melhorada. Sua forma disponível é em tubulação soldada com periferia máx de 1625 mm e espessura de parede de 16 mm ou tubos sem costura com periferia máx de 810 mm de espessura de parede de 13 mm. Apresentam limite de escoamento 345 MPa com o dobro de resistência à corrosão atmosférica de aço-carbono. São aplicados como tubos estruturais redondos, quadrados ou secções especiais para construção de pontes ou edifícios soldadas, parafusadas ou rebitadas. (Chiaverini, 2012).

Aços resistentes à corrosão é uma outra classificação que será abordada de forma mais profunda no próximo tópico.

3.3.Corrosão

3.3.1. Definição

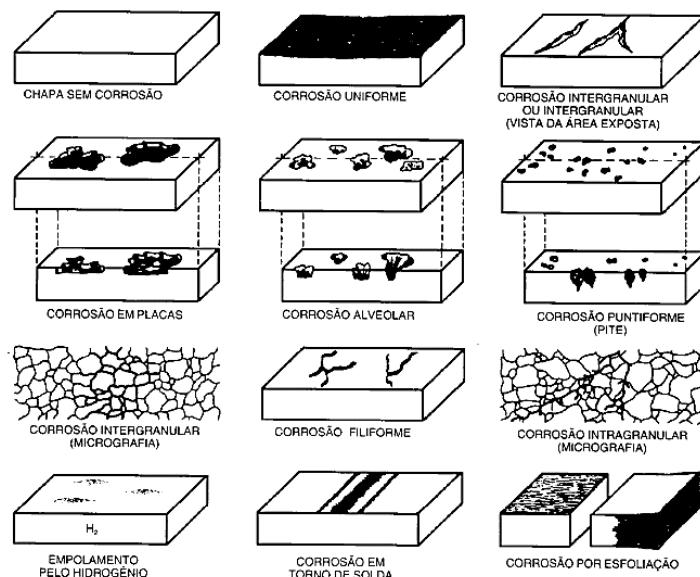
Tem chamado o foco de engenheiros e metalurgistas a perda de peças metálicas por ação da corrosão. É uma procura constante para o aperfeiçoamento e desenvolvimento de novos métodos de proteção e criação de novas ligas que apresentem resistência à corrosão. (Chiaverini, 2012).

Pode-se definir corrosão como “a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos”. Essa deterioração pode estar presente em estruturas metálicas submersas, estruturas metálicas sobre o solo ou aéreas, equipamentos eletrônicos e meios de transporte. A deterioração causada pela corrosão faz com que o material apresente características indesejáveis como desgaste, variações químicas ou modificações estruturais. (Gentil, 1996)

A corrosão ocorre geralmente na superfície de separação do metal e o meio corrosivo. São reações químicas ou eletroquímicas que cedem ou recebem elétrons (reações de oxidação-redução). Dessa forma o metal age como redutor, cedendo elétrons que são recebidos por uma substância, o oxidante, existente no meio corrosivo. Essas

reações podem ocorrer de diferentes formas, sendo importante o estudo e entendimento das mesmas para desenvolver as soluções mais efetivas. Algumas das formas da corrosão principais são apresentadas na Figura 4: uniforme, por placas, alveolar, puntiforme ou por pite, intergranular (ou intercristalina), intragranular (ou transgranular ou transcristalina), filiforme, por esfoliação, grafítica, dezincificação, sob tensão, empolamento pelo hidrogênio e em torno do cordão de solda. (Gentil, 1996)

Figura 4: Principais formas de corrosão.



Fonte: Corrosão. (GENTIL, VICENTE). 3^a edição, 1996. LTC – Livros Técnicos e Científicos S.A., Rio de Janeiro – RJ

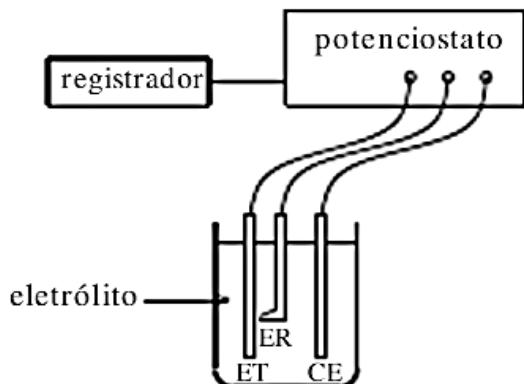
3.3.2. Principais ensaios de corrosão

Para realização de estudo e pesquisa, existem os ensaios de corrosão, que podem ser uma experiência potenciosônica, onde há um potencial aplicado (Eappl) que é mantido entre o eletrodo de referência (ER) e o eletrodo de trabalho (ET). É necessário que se tenha uma célula de teste com eletrodo de trabalho (ET), eletrodo de referência (ER), contra eletrodo (CE), um potenciosômetro e um dispositivo de gravação. Regularmente é utilizado um software fornecido pelo fabricante do instrumento ou um outro disponível a partir de outras fontes comerciais. (ASM HANDBOOK V.13A, 2003)

Ao realizar o ensaio potenciosônico, um multímetro, de alta impedância, é conectado as extremidades do eletrodo de trabalho e do eletrodo de referência, para que seja possível medir diretamente o potencial de corrosão, como exibido na Figura 5.

Ocorre também de se conectar ao multímetro um registrador, para que se tenha um acompanhamento do valor do potencial ao longo do tempo. (ASM HANDBOOK V.13A, 2003)

Figura 5: Modelo de ensaio potenciômetro.



Fonte: Técnicas Eletroquímicas em Corrosão. (Wolyniec, Stephan) EdUSP, 2003. São Paulo – SP.

Os principais ensaios de corrosão são o de acompanhamento do potencial em circuito aberto, as curvas de polarização e os ensaios de impedância eletroquímica.

a) Acompanhamento do potencial em circuito aberto ($E \times t$)

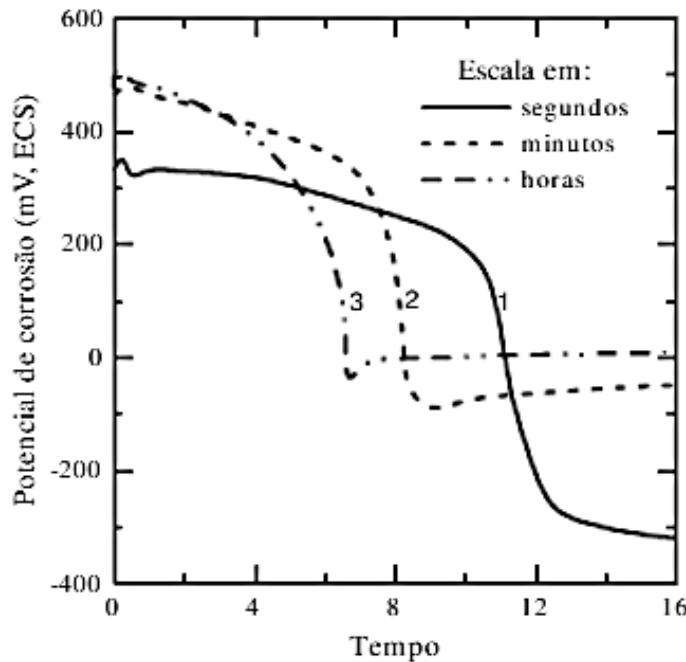
O metal ao sofrer corrosão numa solução de baixa resistividade elétrica, apresenta um potencial característico chamado potencial de corrosão. O potencial de corrosão é calculado a partir da intersecção da curva de polarização anódica com a de polarização catódica, ou pela intersecção das curvas-soma, caso haja mais de uma curva de uma espécie (Figura 6). É feito um acompanhamento da diferença de potencial entre o eletrodo de trabalho e o de referência na solução eletrolítica. (Wolyniec, 2003).

Desse acompanhamento do potencial de corrosão com o tempo é possível observar que alguns materiais apresentam dissolução de uma película fina de óxido quando imersos em uma solução corrosiva. Ocorre uma queda no valor do potencial devido à dissolução dessa película através do processo de dissolução redutiva. (Wolyniec, 2003).

Em alguns casos pode-se formar uma camada passiva ou pseudopassiva via precipitação, onde o potencial de corrosão aumenta. Esse fenômeno ocorre pois ao se iniciar a corrosão o material é inibido por reações de formação de óxidos. Como a

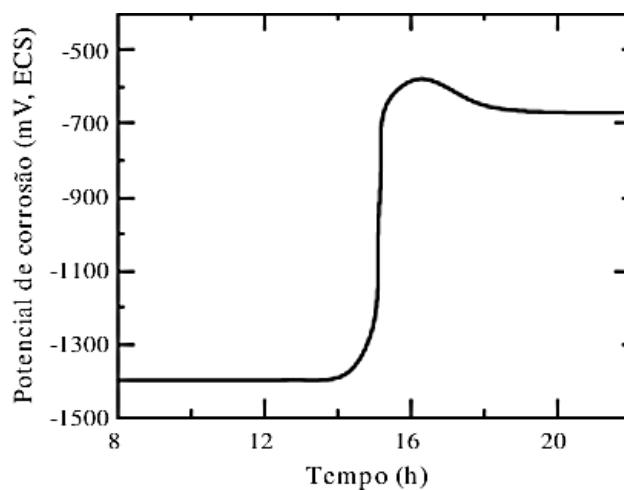
superfície que está sendo revestida é limitada, diminui-se o consumo de elétrons, aumentando assim o potencial do sistema.

Figura 6: Variação com o tempo do potencial de corrosão de aço inoxidável austenítico AISI 304 em solução 5 % HNO₃. Curva 1: corpo-de-prova lixado e exposto à atmosfera por 1,5 horas; curva 2: idem, por 170 horas; curva 3: corpo-de-prova passivado e exposto atmosfera por 1,5 horas s; curva 2: idem, por 170 horas; curva 3: corpo-de-prova passivado e exposto à atmosfera por 170 horas.



Fonte: Técnicas Eletroquímicas em Corrosão. (Wolyniec, Stephan) EdUSP, 2003.
São Paulo – SP.

Figura 7: Variação do potencial de corrosão do zinco em função do tempo na solução saturada de hidróxido de cálcio.



Fonte: Técnicas Eletroquímicas em Corrosão. (Wolyniec, Stephan) EdUSP, 2003.
São Paulo – SP.

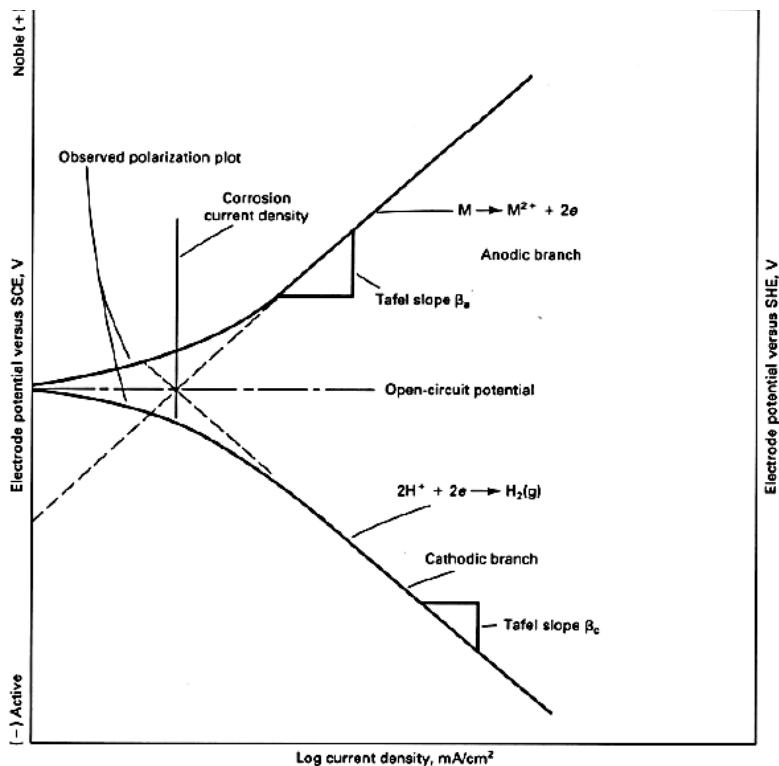
b) Curvas de polarização

O método potencioscópico e o método potenciodinâmico geram curva de polarização experimental. No método potencioscópico existem dois tipos para a obtenção da curva. Um tipo (Tipo 1) fornece a gravação da corrente como função do tempo em um potencial aplicado constante, E_{appl} . O outro (Tipo 2) fornece gravação da corrente estacionária como uma função de E_{appl} . (ASM HANDBOOK V.13A, 2003).

Informações como dependência do tempo da taxa de uma reação eletroquímica em um determinado potencial é obtido a partir do método Tipo 1. Já a partir do método do Tipo 2 é possível construir uma curva de polarização, que geralmente é plotada como E_{appl} versus o logaritmo da densidade de corrente medida, i. (ASM HANDBOOK V.13A, 2003)

Se tratando da técnica potenciodinâmica, há uma variação contínua do potencial de eletrodo E e registrando-se a variação Δi , que varia continuamente. Quando uma curva de polarização completa é gerada, existe uma parte catódica e uma parte anódica. É possível identificar a partir das medidas do potencial de corrosão a transição entre a corrosão passiva para a ativa, sendo possível determinar informações relacionadas a cinética das reações de corrosão e taxa de corrosão (ASM HANDBOOK V.13A, 2003). Um método de análise dos dados experimentais obtidos em termos de parâmetros, muito utilizado é a Extrapolação de Tafel, onde um software de computador registra e analisa as curvas, como exibido na Figura 8.

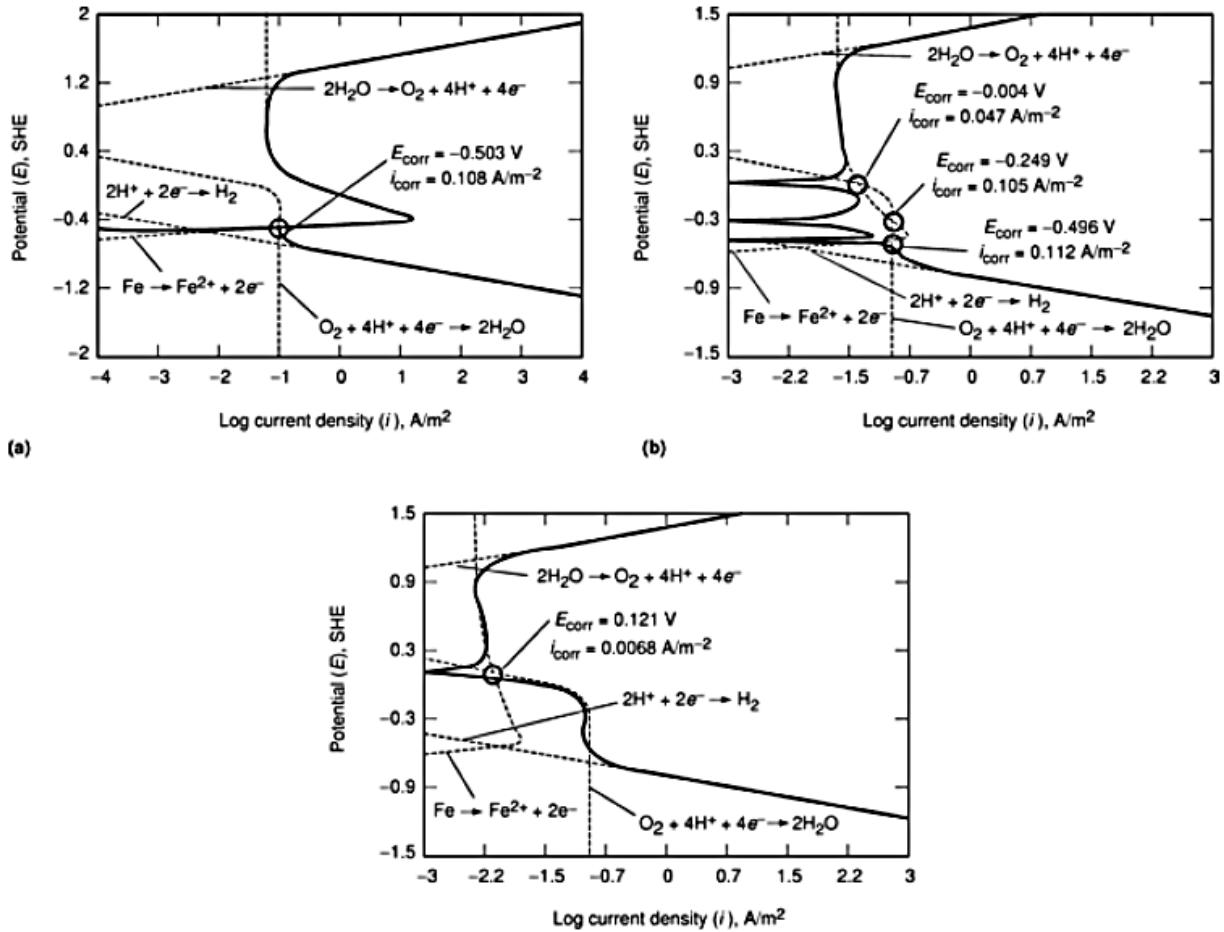
Figura 8: Curvas teóricas ilustrando o método de extrapolação de Tafel.



Fonte: ASM Handbook. Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection. Volume 13A ASM Handbook, 2003.

É possível obter o potencial de corrosão (E_{corr}), a densidade de corrente de corrosão (i_{corr}) e o comportamento ativo ou passivo do material no eletrólito através das curvas do potencial de corrosão em função do log da corrente de densidade, pelas extrapolações de Tafel (Figura 9).

Figura 9: Relação do potencial com densidade de corrente, incluindo processos anódicos e catódicos para o aço carbono em água gaseificada (a) sem Na₂SiO₃, (b) com 0,0014 m Na₂SiO₃ e (c) com 0,008 m Na₂SiO₃.



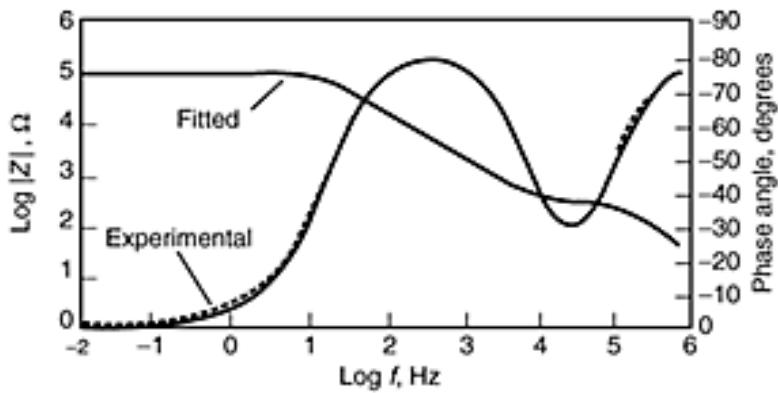
Fonte: Fonte: ASM Handbook. Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection. Volume 13A
ASM Handbook, 2003.

c) Ensaio de impedância eletroquímica

O ensaio de impedância coleta os valores de módulo de impedância, impedância real e imaginária e ângulo de fase em função da frequência/amplitude da senoidal aplicada com amplitude constante e pequena o suficiente para permanecer na região do potencial linear, ou seja, a região onde são coletados então. Constantemente, uma faixa de frequência muito grande necessita investigação para a obtenção do espectro de impedância completo. Na maioria dos estudos de corrosão, esta faixa de frequência se estende de 100 kHz a 1 mHz. (ASM HANDBOOK V.13A, 2003)

Os pontos são coletados, exibidos e analisado com o apoio de softwares que representam os resultados em gráficos, como apresentado na Figura 10, em escala logarítmica do módulo de impedância versus o ângulo de fase em função da frequência (ASM HANDBOOK V.13A, 2003).

Figura 10: Comparação entre uma curva experimental e curva ajustada para Mg AZ31 revestido com polímero exposto a 0,5 M NaCl.



Fonte: ASM Handbook. Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection. Volume 13A ASM Handbook, 2003.

Quando se deseja uma análise quantitativa dos dados de espectroscopia de impedância eletroquímica usa-se um circuito equivalente apropriado que descreve com precisão as propriedades físicas do sistema sob investigação, como mostrado na Tabela 2. Os circuitos contém resistores, capacitores, indutores, e elementos distribuídos como elemento de fase constante e impedância de Warburg. Eles são combinados em circuitos equivalentes complexos com agrupamentos em série ou paralelo que modelam o fenômeno que está ocorrendo na interface. Existindo diferentes modelos para cada fenômeno. (Manual Autolab).

Tabela 2: Impedâncias dos elementos do circuito equivalente

Elemento do circuito	Impedância
R, resistência	R
C, capacitor	$\frac{1}{j\omega C}$
L, indutor	$j\omega C$
CPE, elemento de fase constante	$\frac{1}{(j\omega C)^\alpha}$
W, impedância de Warburg Difusão infinita	$\frac{R}{\sqrt{j\omega}}$
W, impedância de Warburg Difusão finita	$R \frac{\tanh \sqrt{j\omega \tau}}{\sqrt{\tau}}$

Fonte: Manual Autolab

3.4. Aços resistentes à corrosão

A maneira mais popular de proteção contra corrosão é a criação de um revestimento sobre a superfície do metal, separando o metal-base do meio corrosivo. As formas de criação desse revestimento podem ser tanto artificiais quanto naturais. (Chiaverini, 2012).

Para a criação do revestimento é necessário fazer um depósito de uma outra substância (metálica ou orgânica) sobre a superfície do metal. Já de forma natural, a produção desse revestimento seria espontânea (de acordo com os fatores termodinâmicos), através da formação de um composto químico, resultante da reação dos elementos da liga introduzidos no metal com o meio circunvizinho. Este revestimento formado, quando aderente ao substrato e com uma camada protetora razoável, tende a postergar o substrato de corrosão a um determinado meio. (Chiaverini, 2012)

O mecanismo mais aceito de formação desse revestimento é a absorção de gás oxigênio por átomos na camada superficial dos aços dos elementos de liga. Os mais utilizados com o propósito de passivação do ferro são: cromo e níquel, e em menor grau, o cobre, o silício, o molibdênio e o alumínio. (Chiaverini, 2012)

Há 160 anos foi realizada a primeira experiência que comprovaria a existência desse revestimento, mais tarde sendo o fenômeno chamado de passividade. Uma amostra de aço-carbono, foi colocada em um bêquer com ácido nítrico diluído. A amostra rapidamente foi atacada pela produção de vapores nitrosos. Outra amostra, idêntica, foi inserida em outro bêquer, contendo ácido nítrico também, porém dessa vez, concentrado. A amostra não foi atacada. Ainda neste mesmo bêquer foi adicionado água, diluindo o ácido nítrico até que atingisse a mesma concentração do primeiro bêquer. A amostra continuou sem sofrer ataque. (Aperam, 2008)

A diferença entre as duas amostras era apenas a concentração do ácido nítrico inicial posto em contato, sendo a primeira amostra em contato com ácido nítrico diluído e a segunda amostra em contato primeiramente com o ácido nítrico concentrado. A explicação para a segunda amostra não sofrer ataque mesmo após a diluição do ácido nítrico se encontra na formação de um filme sobre a superfície do aço, protegendo o aço do ataque posterior quando diminuída a concentração do ácido. (Aperam, 2008)

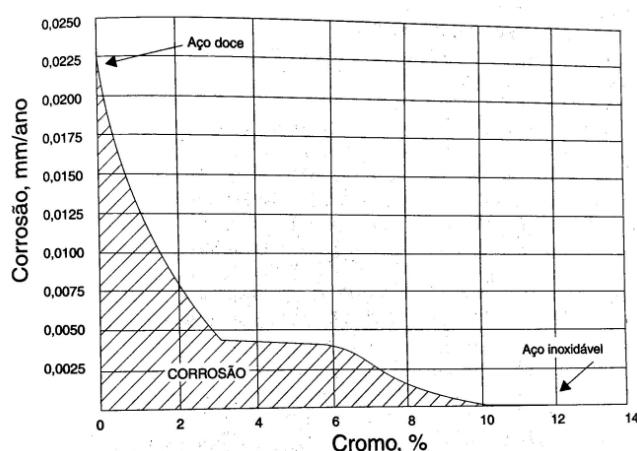
Para provar que se tratava de um filme, riscou-se a amostra e imediatamente os vapores nitrosos atacaram a região riscada. (Aperam, 2008)

Já a descoberta dos aços inoxidáveis ocorreu em 1912. O inglês Harry Brearly, realizava um estudo sobre uma liga Fe-Cr (13%) e ao acaso, ao tentar fazer observações

metalográficas, observou que a liga fabricada resistia a maioria dos reagentes utilizados na época na execução da metalografia. Em 1913, Eduard Maurer, na Alemanha, estudando também uma liga Fe-Cr, que continha, além dos mesmos elementos de Bearly, aproximadamente 8% de Ni, observou uma resistência da liga durante meses a vapores agressivos do laboratório em que trabalhava. (Gonçalves, 2011)

Pode-se dizer que a ciência do aço inoxidável é a ciência do cromo como elemento de liga no ferro. A medida que aumenta-se o teor de cromo no aço, em uma atmosfera industrial, o metal passa a sofrer menos corrosão, como é possível observar na Figura 11 apresentada abaixo:

Figura 11: Redução da taxa de corrosão em um aço em função da adição de Cromo em um meio industrial.



Fonte: Aços e Ferros fundidos. Vicente Chiaverini. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 7º Edição – 1996.

Assim sendo, o cromo consegue assegurar o oxigênio e manter a camada impermeável de oxigênio ou óxido estável. Essa camada, em meios oxidantes possui uma pressão tão baixa, que fornece ao material um comportamento nobre. Porém, em presença de cloretos, este revestimento pode perder adesão ao substrato, voltando a se tornar vulnerável novamente a corrosão por gases que compõem a atmosfera. (Chiaverini, 2012).

A classificação mais utilizada dos aços inoxidáveis é baseada na microestrutura que apresentam à temperatura ambiente:

- Grupo I: Aços inoxidáveis martensíticos ou endurecíveis;
- Grupo II: Aços inoxidáveis ferríticos ou não endurecíveis;
- Grupo III: Aços inoxidáveis austeníticos também não endurecíveis.

Além dessa classificação comum, há outros tipos de aços que vem sendo muito utilizados em condições especiais:

- Aços inoxidáveis duplex;
- Aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação;
- Aços inoxidáveis nitrônicos.

Nos aços inoxidáveis martensíticos a concentração de carbono fica na faixa permite a transformação de ferrita em austenita quando em altas temperaturas. Já em um resfriamento, a austenita se transforma em martensita. Em relação à concentração de cromo, são teores na faixa entre 11,5% a 18,0% de cromo. (Aperam, 2008)

Os aços inox martensíticos são aços ferro-magnéticos, que podem ser facilmente trabalhados (a quente ou a frio), principalmente quando o teor de carbono for baixo. Apresentam excelente resistência à corrosão quando expostos ao tempo, água e substâncias químicas. O níquel quando presente contribui para aumentar a resistência à corrosão. A têmpera também tem a propriedade de aumentar a resistência à corrosão, pois reduz a possibilidade de precipitação de carbonetos. As aplicações mais comuns dos aços inoxidáveis martensíticos são para o tipo AISI 403 e AISI 410. Tais aços possuem baixos teores de carbono, são fáceis de conformar a frio no estado recozido, muito utilizado em lâminas forjadas ou usinadas de turbina e compressores, tesouras, canos de fusil, componentes de micrômetros e instrumentos de medidas, além de componentes para a indústria petroquímica. Já o aço tipo AISI 420: alta dureza, razoável tenacidade, empregados em cutelaria, instrumentos cirúrgicos, eixos de bomba, válvulas, peças para bombas e aviões. Os aços de tipos AISI 414, AISI 416 Se e AISI 420 F são de fácil usinagem, muito utilizados para parafusos, porcas, hastes de válvulas, etc. Os tipos AISI 440 A, AISI 440 B e AISI 440 C: tem alto teor de carbono, alta resistência ao desgaste, muito empregados em instrumentos cirúrgicos e odontológicos, mancais, válvula, bocais e outras aplicações que exijam dureza e resistência a desgaste além de corrosão. (Chiaverini, 2012).

Os aços inoxidáveis ferríticos também possuem o cromo como principal elemento de liga, porém com teores superiores a 25%, maior do que dos martensíticos. Isso melhora a resistência à corrosão, porém prejudica algumas outras propriedades, como por exemplo a resistência ao impacto. Pelo fato do teor de carbono ser baixo, esses aços não são endurecíveis pela têmpera. (Aperam, 2008)

Os tipos e aplicações são os mais diversos, dentre eles os aços AISI 405 e AISI 409 com menores teores de cromo. O AISI 405 por ter alumínio adicionado tem sua

estrutura ferrítica garantida, além de evitar a formação de austenita quando aquecido em altas temperaturas. Essa característica tem grande relevância para operações de soldagem, sendo muito aplicados para tubos radiadores, caldeiras e recipientes para indústrias químicas. Já o tipo AISI 430 é o mais comum da categoria pois tem uma alta resistência à ação de ácidos, principalmente ácido nítrico e ácidos orgânicos, também tem boa resistência à ação da água do mar. Para melhorar sua usinabilidade é adicionado fósforo ou selênio, dando origem ao tipo AISI 430 F. Tanto o AISI 430 quanto suas variações são muito aplicadas em máquinas operatrizes automáticas, como parafusos, porcas e ferragens. Aços inox AISI 436 são muito semelhantes aos AISI 430, porém tem adição de molibdênio e nióbio, melhorando sua resistência à corrosão ao calor. O tipo AISI 442 possui uma melhor resistência à corrosão dentro da categoria, muito empregado quando não é necessária a conformação, como camâras de combustão. Já o AISI 446 possui melhor resistência à corrosão em altas temperaturas, sendo muito empregados em fornos, queimadores, recuperadores e radiadores. Porém, sua resistência mecânica é baixa em altas temperaturas, sendo assim, o aço do tipo AISI 310 se torna uma melhor opção. (Chiaverini, 2012).

Por fim, os aços inoxidáveis austeníticos são os aços mais empregados. Suas principais características são por não serem magnéticos, não serem endurecíveis e quando encruados, o aumento de sua dureza é superior ao quando comparado com demais aços que passam pelo mesmo processo. Os aços AISI 301, AISI 302, AISI 304 e AISI 302 B são os mais populares devido sua boa trabalhabilidade, podendo ser empregados em ornamentação, utensílios domésticos, fins estruturais, equipamentos para indústria química, naval, fabricação de alimentos e transporte. A diferença entre eles é que o AISI 302 B por ter presença de silício possui uma melhor resistência à formação de óxidos, sendo empregados em peças de forno. Já o AISI 304 é menos suscetível à corrosão intercristalina, devido seu teor mais baixo de carbono. O AISI 302 tem aplicações muito parecidas com o AISI 301. Ainda dentro da classe temos o AISI 303 que apresenta fácil usinabilidade, podendo ser aplicado em eixos, parafusos, porcas. O AISI 309 com boa resistência mecânica e à oxidação a altas temperaturas, utilizado para equipamentos de indústria química, peças de forno, estudas e peças de bombas. Os aços do tipo AISI 310 tem boa estabilidade à temperatura de soldagem e resiste à oxidação até temperaturas de 1050° ou 1100°. Já os AISI 316 são bons para corrosão química, sendo muito utilizados em indústrias químicas e de papel. Há ainda os aços AISI 201 e AISI 202 que possuem

resistência a corrosão inferior as do tipo Cr-Ni, porém apresentam resistência mecânica elevada. (Chiaverini, 2012).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Preparação das amostras

A amostra metálica de metalon utilizada no experimento foi retirada da despaletizadora durante a parada para manutenção. O corte da amostra foi realizado no laboratório de metalografia na Isometc com dimensões de 20x20x4 mm. Após o corte a amostra foi lixada por um esmeril de bancada com uma escova de aço circular, na Figura 12 (a). Para retirar a oxidação restante e tinta observada na Figura 12 (b), lixou-se a amostra com lixas de grana #500 e #220 até atingirmos uma superfície ideal para o ensaio químico, observado na Figura 12 (c).

A amostra de aço inox AISI 304, na Figura 13, teve seu corte também no laboratório de metalografia na Isometc, com dimensões de 20x20x3 mm de espessura.

Figura 12: Esmeril de bancada com escova de aço circular.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 13: Amostra de aço AISI 304 antes do preparo.



Fonte: Arquivo pessoal.

4.2. Imagens microscópio

Foram feitas imagens das áreas corroídas da amostra não lixada.. As imagens foram realizadas no Microscópio Zeiss AXIO Image M2m.

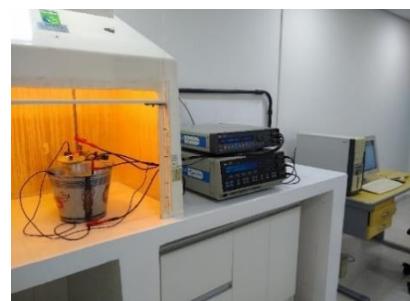
4.3. Ensaio eletroquímico

Foi realizado o ensaio eletroquímico da amostra da despaletizadora e depois de uma amostra de aço AISI 304.

A solução utilizada nos dois ensaios eletroquímico foi de NaCl 3,5% p a partir dos reagentes P.A. pelos técnicos do laboratório químico da EEL – USP, campus Lorena.

Para os ensaios eletroquímico utilizou-se uma célula eletroquímica exposta na Figura 14. A célula eletroquímica é composta por: bêquer alto de 500mL, eletrodo de trabalho (amostra), contra eletrodo (folha de platina com área de 18 cm²), eletrodo de referência com ponte salina (calomelano saturado, ECS, Hg/Hg₂Cl₂, KCl sat, com EECS = + 0,242 V/ENH) e balde (fazendo o papel da Gaiola de Faraday, impedindo interferências externas). O ensaio teve duração de 3 horas.

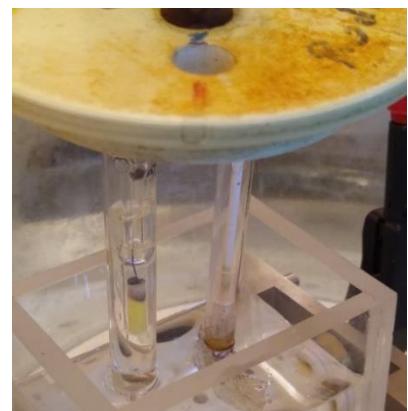
Figura 14: (a) Esquema utilizado no ensaio. (b) Contra eletrodo de platina e eletrodo de referência calamelano saturado. (c) Esquema com balde.



(a)



(c)



(b)

Fonte: Arquivo do autor.

Os equipamentos e softwares utilizados foram: Interface Eletroquímica marca SOLARTRON modelo 1287 A, um analisador de Resposta em Frequência marca

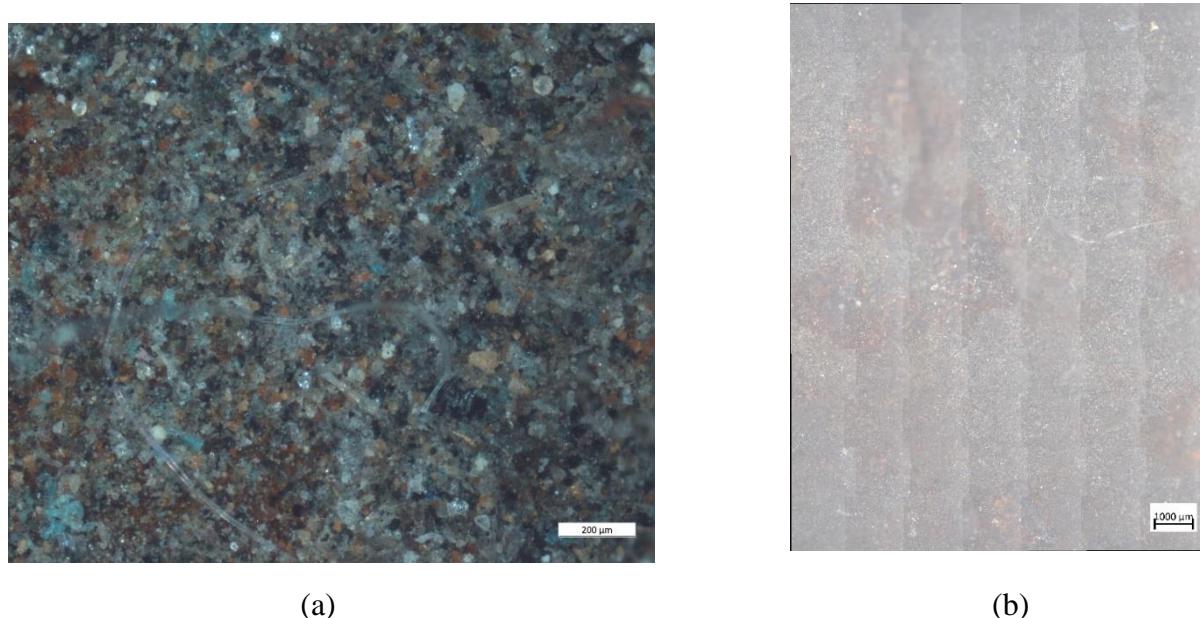
SOLARTRON modelo 12587 S e os softwares CorrWare/CorrView para técnicas eletroquímicas de corrente contínua e Zplot/ZView para EIS.

5. RESULTADOS

5.1. Imagens microscópio

A partir das imagens realizadas pelo microscópio, é possível verificar que a corrosão sofrida pela amostra durante esses 7 anos foi uma corrosão generalizada. Essa corrosão generalizada pode ter sido causada devido a dois fatores, um seria a exposição do material a um fluido agressivo, que não há controle de parâmetros, como pH e composição. Já o outro fator, se dá devido a estagnação desse fluido entre a proteção polimérica e a barra, agravando e acelerando a corrosão dele. Na Figura 15 verifica-se a corrosão generalizada sofrida pelo material exposto a essas condições.

Figura 15: Imagens realizadas pelo Microscópio Zeiss AXIO Image M2m.(a) Micrografia da amostra corroída. (b) Macrografia da amostra corroída.



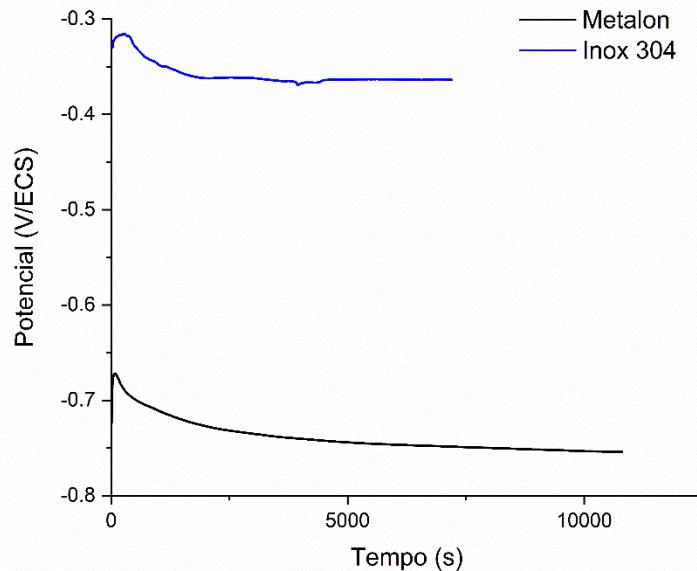
Fonte: Arquivo do autor.

5.2. Potencial de Corrosão

Observando a Figura 16, temos o gráfico com os potenciais de corrosão em circuito aberto das duas amostras, o metalon e o aço AISI 304, em um período de 3 horas. O potencial de corrosão em circuito aberto indica a nobreza do material, sendo assim,

quanto mais nobre o material, maior o potencial que ele apresenta. Como o potencial de corrosão em circuito aberto encontrado do aço AISI 304 é maior do que do aço carbono metalon, temos que o aço AISI 304 é um material mais nobre do que o metalon.

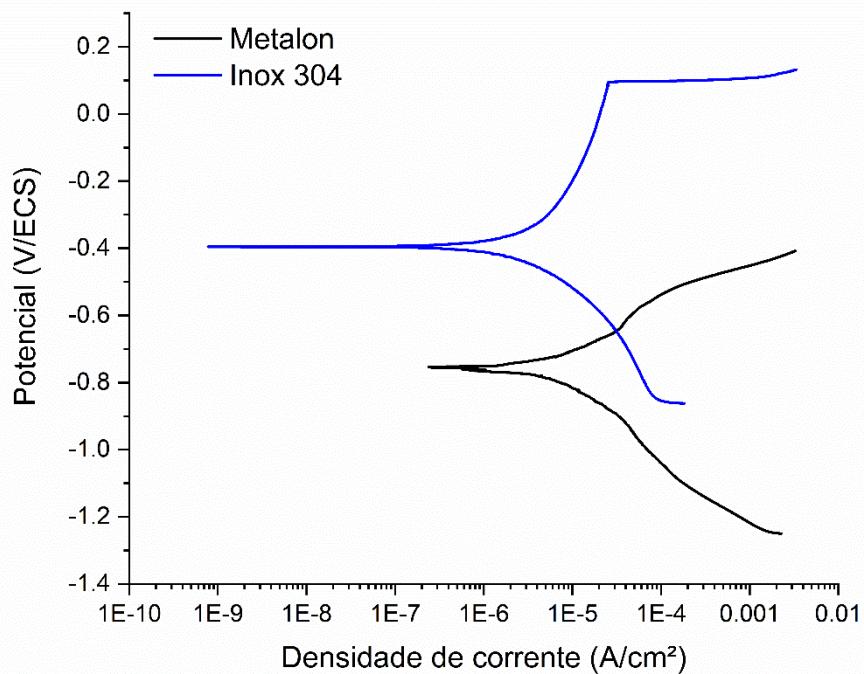
Figura 16: Gráfico de Potencial de Corrosão em circuito aberto obtido no ensaio.



Fonte: Arquivo do autor.

Já, ao oberservar o gráfico da Figura 17, temos a informação do potencial de corrosão do material. Para isso, foi realizado uma extrapolação da parte catódica e anódica, onde elas se cruzam obtem-se o valor da densidade de corrente no eixo x e do potencial de corrosão do material no eixo y.

Figura 17: Gráfico de Potencial de Corrosão obtido no ensaio.



Fonte: Arquivo do autor.

Ao realizar a extração encontra-se os seguintes valores para o potencial de corrosão:

Tabela 3: Valores do potencial de corrosão das amostras.

Material	E_{corr} (V)
metalon	-0,75
aço AISI 304	-0,30

Fonte: Arquivo do autor.

Pode-se observar que o valor do potencial de corrosão do aço AISI 304 é maior do que do metalon, sendo assim, ele tem uma resistência à corrosão maior que a do metalon.

Para a densidade de corrente de corrosão obtemos valores:

Tabela 4: Valores da densidade de corrente de corrosão das amostras.

Material	Io (A/cm ²)
metalon	1,34E -5
aço AISI 304	2,89E -6

Fonte: Arquivo do autor.

A densidade de corrente de corrosão indica a velocidade de corrosão. Sendo assim, temos que o aço AISI 304 tem uma velocidade de corrosão 20% menor que a do metalon. Demonstrando como o aço AISI 304 é mais indicado para as condições de trabalho apresentada, já que tem uma resistência à corrosão maior e uma velocidade de corrosão menor, tendo assim uma maior durabilidade.

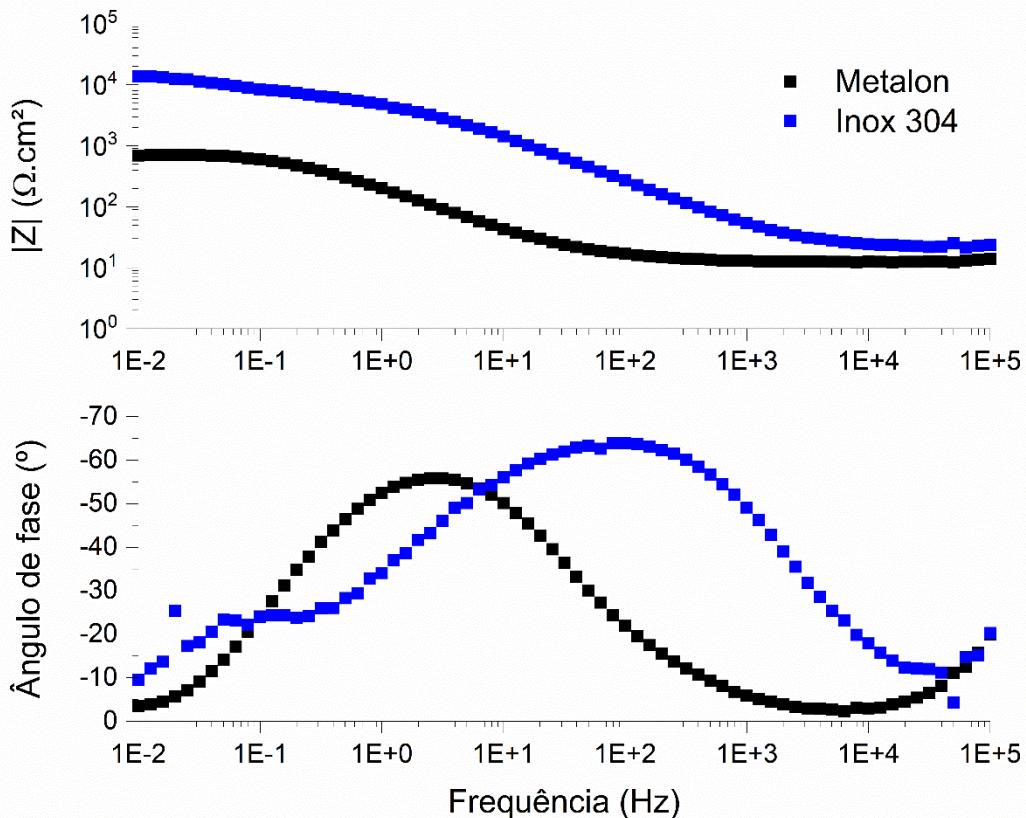
5.3. Módulo de Impedância

Os resultados relacionados ao ângulo de fase das amostras e ao módulo de impedância trazem mais insumos para a indicação do aço AISI 304 como sendo mais apropriado ao trabalho.

Ao analisar o gráfico de módulo de impedância, na Figura 18, medido em 0,01 Hz, obteve-se um valor de 695,55 Ω . Ao observar a Figura 21, medido em 0,01 Hz, temos um módulo de impedância para o aço AISI 304 de 13901,00 Ω . No diagrama de Bode o módulo total de impedância, $|Z|$, em baixa frequência (0,01 Hz), é um indicativo que correlaciona a resistência à corrosão da liga no meio. Observa-se que o valor de $|Z|$ à baixa frequência é maior para o aço AISI 304 comparado com o metalon. Isto sugere que o aço AISI304 apresentam melhores propriedades protetivas.

O ângulo de fase é a medida da resistência de passagem da corrente alternada. Quanto mais elevada a frequência, a corrosão se encontra mais na superfície. Ao contra ponto que quanto menor a frequência, a corrosão se encontra mais internamente. Observando o gráfico do ângulo de fase da amostra de metalon, na Figura 18, o pico acontece próximo a 1 Hz. Enquanto ao comparar com o pico da amostra do aço AISI 304, na Figura 18, o pico ocorre próximo de 10² Hz. Sendo assim, temos uma corrosão mais aprofundada no metalon do que no aço AISI 304, já que a frequência do pico do metalon é menor do que do aço AISI 304.

Figura 18: Gráfico do Módulo de Impedância e Ângulo de Fase da amostra metalon e da amostra do aço AISI 304.



Fonte: Arquivo do autor.

5.4. Análise financeira

Neste tópico estudou-se apenas valores gerais e tempo de vida das barras utilizadas na grelha. Não foi levado em conta o custo da mão de obra de cada manutenção.

Ao comparar a densidade de corrente de corrosão entre as duas amostras (metalon e aço AISI 304), temos que aço AISI 304 tem uma velocidade de corrosão cerca de 20% da do metalon, podendo então estimar uma vida útil de 5 vezes maior.

O metalon teve uma vida de 7 anos, já o AISI 304 pode-se projetar uma vida útil de 35 anos (5x maior que a do metalon). Na Tabela 5 há uma comparação entre os valores encontrados no mercado de uma barra de 1 metro de cada material. Já é possível observar uma economia de R\$48,57 por ano.

Tabela 5: Comparação entre o metalon e o aço AISI 304.

Material	Preço/barra (R\$)	Quantidade de barras usadas na estrutura	Vida útil (anos)	Custo por ano (R\$)
Metalon	25	20	7	71,43
AISI 304	40	20	35	22,86

Fonte: Arquivo do autor.

Além disso, também é possível realizar um estudo da necessidade da quantidade de barras de aço AISI 304 na estrutura, já que o aço AISI 304 tem uma resistência mecânica melhor do que o aço carbono.

E por fim, o metalon tem um gasto, não calculado neste trabalho, com a tintura protetora dele. Ao utilizar o aço AISI 304, não será necessário realizar a pintura, sendo assim, mais um custo a menos.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho possui a finalidade de avaliar as possíveis causas que levam à falha do componente estrutural da despelatizadora, bem como a ação do meio corrosivo sobre o material. Também, este trabalho propõe a busca por uma alternativa de material com melhor resistência à corrosão para esta aplicação estrutural, de modo a aumentar a vida útil do componente e a sua melhor performance durante a operação.

De acordo com os resultados obtidos pode ser concluído que:

- A mais provável causa da corrosão generalizada encontrada no material ocorre devido a uma falta de controle do fluido que entra em contato com o material, que acaba ficando preso entre a proteção e a barra de metal, acelerando a corrosão do material;
- A corrosão generalizada provavelmente é agravada pela tensão solicitada ao material sob essas condições, podendo causar corrosão sob tensão também, porém, não sendo essa a causa principal da corrosão, visto que se trata de uma corrosão generalizada;
- O material utilizado tem potencial de corrosão de $-0,75404$ V, e não é o melhor indicado devido as condições de trabalho encontradas na máquina;
- Apenas a tinta de proteção utilizada pelo fabricante não é suficiente para proteger o metal da corrosão generalizada;
- Alguns aços inoxidáveis poderiam ser utilizados no lugar do material atual, sendo eles o AISI 301, AISI 302, AISI 304 ou AISI 430 de acordo com a literatura;
- Após a realização do ensaio eletroquímico com o AISI 304, foi possível observar uma resistência à corrosão muito elevada ao comparar com o aço metalon. Observou-se um potencial de $-0,75$ V para o metalon, enquanto para o aço AISI 304 um potencial de $-0,30$ V. Sendo assim, o aço AISI 304 o material mais indicado para o trabalho realizado e suas condições, ao comparar tecnicamente os materiais;
- Com a análise financeira, é possível concluir que além de o aço AISI 304 ser um material mais resistente à corrosão quando comparado ao aço carbono metalon, ele também é mais econômico. O uso do aço inoxidável gera uma economia de aproximadamente R\$50,00 por ano no mínimo. Se acrescentar as

questões de necessidade de quantidade de barras ao utilizar o aço AISI 304 e a tintura do metalon, que não será necessária no aço AISI 304, a economia tende a ser maior ainda.

Dessa forma, com esse trabalho foi possível aplicar algumas técnicas aprendidas durante o curso e aprofundar o conhecimento em aços específicos. Entretanto, o estudo teve um viés mais acadêmico e menos empreendedor, sendo assim, uma continuação seria necessária para analisar quimicamente as condições da máquina por exemplo e outros aspectos que necessitam de uma análise mais aprofundada para poder realmente afirmar se a troca desse material teria um impacto para a companhia em questão.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se os seguintes pontos de aperfeiçoamento para trabalhos futuros:

- Análise química e ensaio corrosivo do perfil de proteção polimérico;
- Análise química das soluções que chegam na linha de envase e entram em contato com o material;
- Análise de custo e performance da máquina (relacionando a corrosão com as paradas da máquina);
- Análise química e ensaio corrosivo da tinta de proteção do material original.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASM HANDBOOK. Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection. Volume 13A. ASM Handbook, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CORROSÃO. Conceitos básicos da corrosão, 2008. Disponível em: <http://www.abraco.org.br/corros11.htm> . Acesso em: 16 dez 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6591: Tubos de aço-carbono com solda longitudinal de seção circular, quadrada, retangular e especial para fins industriais. Rio de Janeiro. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8261: Tubos de aço-carbono, com e sem solda, de seção circular, quadrada ou retangular para usos estruturais. Rio de Janeiro. 2019.

ATKINS, P.W.; JONES, Loretta. Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente. 3º Edição - Bookman, Porto Alegre, 2006.

BRAGA, Thiago Martins Teixeira; CÂNDIDO, Luiz Cláudio. Influência de concentradores geométricos de tensão na corrosão sob tensão do aço AISI 304 em meios contendo cloretos. 2010.

CHIAVERINI, VICENTE, Aços e Ferros fundidos. 7º Edição – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, São Paulo, 1996.

DELLA ROVERE, Carlos Alberto et al. Avaliação da resistência à corrosão de ligas inoxidáveis com efeito de memória de forma em ambientes contendo cloretos. 2012.

FERREIRA, G.L.M. Estudo da Susceptibilidade à Corrosão Sob Tensão e à Corrosão – Fadiga do Aço API X65 Aspergido Termicamente Utilizado em Componentes Offshore. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

FRUTUOSO, Francisca Geidlany Saraiva de Oliveira. Análise de corrosão dos aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 316L em solução de água do mar artifício. 2017.

GENTIL, VICENTE. Corrosão. 3ª Edição. LTC – Livros Técnicos e Científicos S.A., Rio de Janeiro – RJ, 1996.

GERÊNCIA EXECUTIVA DE DESENVOLVIMENTO DE MERCADO E ASSISTÊNCIA TÉCNICA INOX. Aços inoxidáveis: aplicações e especificações. São Paulo: Aperam, 2008. Color

GONÇALVES, Giselle Aline dos Santos. ESTUDO COMPARATIVO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DOS AÇOS INOXIDÁVEIS AISI 304 E 444 EM SOLUÇÕES DETERGENTES E SANITIZANTES DA INDÚSTRIA DE REFRIGERANTES. 2011. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

HONEYWELL. Aplicações de paletizadora e despaletizadora. In: Aplicações de paletizadora e despaletizadora. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://sps.honeywell.com/br/pt/products/automation/solutions-by-function/palletizer-depalletizer-applications>. Acesso em: 14 out. 2021.

KOCH G.H. Tests for Stress Corrosion. Advanced Materials & Processes. CC Technologies Inc, Dublin, Ohio, ago. 2001.

LOPES, Wellington. Estudo do encruamento dos aços AISI 304 e AISI 409 com uso da técnica de cisalhamento planar simples. 2009.

METROHM. Manual Autolab. [S. l.: s. n.], 2015

PARDAL, Juan Manuel et al. Uma Revisão da Resistência à Corrosão em Aços Inoxidáveis Duplex e Superduplex. Revista Virtual de Química, Rio de Janeiro, v. 5, n. 4, p. 659-677, 18 ago. 2013. Disponível em: <https://rvq-sub.sqb.org.br/index.php/rvq/article/view/417/356>. Acesso em: 16 dez. 2021.

Pesquisa de mercado com Loja InoxVale e Loja Esofer.

SANMARTIN. Componentes da despaletizadora. In: MANUAL Despaletizadora. [S. l.: s. n.], 2014.

STAEHLE, R.W. Estudo da Correlação Microestrutura-Propriedades Mecânicas de Aço da Classe API X80., C.R.W. Staehle, A.J. Party e D. Van Rooyen, EDS. National Association Corrosion Engineers, Houston, Texas, 1969.

VATAVUK, Jan. ANÁLISE TOPOGRÁFICA DE TRINCA DE CORROSÃO SOB TENSÃO EM AÇO AISI 304L: ESTUDO DE CASO. Revista Mackenzie de Engenharia e Computação, São Paulo, v. 4, n. 4, p. 151-163, 05 dez. 2014.

WOLYNCE, STEPHAN. Técnicas Eletroquímicas em Corrosão. EdUSP, São Paulo – SP, 2003.